

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

Институт энергетики и электротехники

(институт, факультет)

Энергетические машины и системы управления

(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой «ЭМСУ»

(подпись)

Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

« ____ »

2016 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение бакалаврской работы

Студент Кудашов Дмитрий Александрович

1. Тема проекта Автомобильный двигатель с улучшенными экономическими показателями

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

3. Исходные данные к проекту Двигатель на базе 8-ми клапанного двигателя ВАЗ, $i = 4$ $iV_h=1,5$ л, номинальная частота вращения коленчатого вала $n = 5600$ мин⁻¹. Степень сжатия $\varepsilon = 18$.

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

Введение;

Обзор состояния вопроса;

Тепловой расчет двигателя работающего при повышенной степени сжатия;

Тепловой баланс двигателя;

Кинематический расчет;

Динамический расчет двигателя

Расчет основных деталей двигателя;

Спец. часть.

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

Конструкторский чертеж форсунки - 1 лист формата А1;

6. Консультант по нормоконтролю _____

– д.т.н., профессор А.Г. Егоров

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

Руководитель бакалаврской работы _____

(подпись)

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению _____

(подпись)

Д.А. Кудашов

(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 Кудашов Дмитрий Александрович
 по теме Автомобильный двигатель с улучшенными экономическими показателями

| № этапов работы | Содержание этапов работы | Форма представления материала | Плановый срок выполнения этапа и представления его на контроль | Планируемый объем выполнения, % | Фактический объем выполнения, % | Отметка о выполнении |
|-----------------|--|--|--|---------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| 1 | Тепловой расчет двигателя <i>Чертеж диаграмм теплового расчета; ВСХ</i> | Таблицы, описания Демонстрационный лист | 30 апреля 2016 г. | 90% | | |
| 2 | Тепловой баланс двигателя <i>Чертеж диаграмм теплового баланса</i> | Таблицы, описания Демонстрационный лист | 5 мая 2016 г. | 90% | | |
| 3 | Расчет кинематики двигателя <i>Чертеж диаграмм кинематического расчетов</i> | Таблицы, описания Демонстрационный лист | 11 мая 2016 г. | 90% | | |
| 4 | Расчет динамики двигателя <i>Чертеж диаграмм динамического расчетов</i> | Таблицы, описания Демонстрационный лист | 15 мая 2016 г. | 90% | | |
| 5 | Описание конструкции спроектированной установки | Раздел записки Графический лист | 20 мая 2016 г. | 80% | | |
| 6 | Оформление и доработка пояснительной записки и листов графической части с учетом замечаний, полученных во время предварительной защиты | Сброшюрованная записка и подписанные чертежи | 14 июня 2016 г. | 100% | | |

Студент _____ Д.А. Кудашов
 (подпись) (И.О. Фамилия)
 Руководитель _____ В.В. Смоленский
 (подпись) (И.О. Фамилия)
 « ____ » _____ 2016 г.

АННОТАЦИЯ

Расчетно-пояснительная записка к бакалаврской работе:
107 страниц, 38 таблиц, 2 рисунков.

Целью данной работы является оценка возможностей и эффективности использования бензиновых двигателей с повышенной степенью сжатия.

Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка включает в себя тепловой расчет при выбранных условиях, также проведены кинематический и динамический расчеты, а также расчеты основных деталей и систем проектируемого двигателя.

В графической части проекта приводятся продольный и поперечный разрезы двигателя, а также графики кинематического и динамического расчетов, диаграмма ВСХ, результат патентного поиска, и специальная часть.

Результаты бакалаврской работы могут быть использованы при проектировании двигателей легковых автомобилей.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение | 8 |
| 1 Обзор состояния вопроса..... | 9 |
| 1.1 Период задержки воспламенения и очаг пламени | 9 |
| 1.2 Распространение фронта пламени в ДВС..... | 9 |
| 1.3 Время задержки самовоспламенения..... | 13 |
| 1.4 Продолжительность времени задержки самовоспламенения..... | 14 |
| 2 Тепловой расчет двигателя работающего при повышенной степени сжатия..... | 16 |
| 2.1 Топливо..... | 16 |
| 2.2 Параметры рабочего тела..... | 16 |
| 2.3 Параметры окружающей среды и остаточные газы..... | 18 |
| 2.4 Расчет процесса впуска..... | 18 |
| 2.5 Расчет процесса сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси..... | 19 |
| 2.6 Термодинамический расчёт процесса сгорания..... | 20 |
| 2.7 Расчет процессов расширения и выпуска. | 23 |
| 2.8 Индикаторные показатели рабочего цикла. | 24 |
| 2.9 Эффективные показатели и параметры двигателя | 25 |
| 3 Тепловой баланс двигателя..... | 27 |
| 4 Кинематический расчет..... | 29 |
| 5 Динамический расчет двигателя | 30 |
| 5.1 Силы давления газов..... | 30 |
| 5.2 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма..... | 30 |
| 5.3 Силы инерции..... | 31 |
| 5.4 Суммарные силы..... | 32 |
| 5.5 Крутящие моменты | 33 |
| 5.6 Расчет сил, действующих на шатунную шейку коленчатого вала.. | 34 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.7 | Силы, действующие на колено вала | 35 |
| 5.8 | Силы, действующие на коренные шейки. | 35 |
| 5.9 | Уравновешивание двигателя. | 37 |
| 5.10 | Равномерность крутящего момента и равномерность хода двигателя. | 40 |
| 6 | Расчет основных деталей двигателя. | 41 |
| 6.1 | Расчет поршневой группы | 41 |
| 6.1.1 | Расчет поршня. | 41 |
| 6.1.2 | Расчёт поршневого кольца. | 43 |
| 6.1.3 | Расчет поршневого пальца. | 45 |
| 7 | Специальная часть. | 48 |
| 7.1 | Линия расширения. | 48 |
| 7.2 | Влияние и состояние температур. | 49 |
| 7.3 | Технические проблемы. | 50 |
| | Заключение | 52 |
| | Список использованных источников. | 53 |
| | Приложение А - Результаты теплового расчета. | 56 |
| | Приложение Б - Результаты кинематического расчета. | 66 |
| | Приложение В - Результаты динамического расчета. | 68 |
| | Приложение Г - результаты расчетов сил действующих в КШМ. | 74 |
| | Приложение Д – Расчет шатунной группы | 90 |
| | Приложение Е – Спецификация сборочного чертежа. | 105 |

ВВЕДЕНИЕ

Современный автомобильный двигатель внутреннего сгорания является достаточно совершенной и сложной машиной. Трудно даже представить, что в столь привычных для многих двигателях автомобилей семейства ВАЗ каждый из 4^x поршней способен совершать 200 ходов в секунду. В мире существуют двигатели с номинальной частотой в 2, а то даже в 3 раза большей, чем у ВАЗа, т.е. каждый из поршней этих двигателей способен совершать по 400-600 ходов за секунду. Какие же огромные должны быть при этом силы инерции деталей КШМ, какими напряжениями по времени являются процессы двигателя? Но с другой стороны в бензиновом двигателе всего не более 30% энергии заключенного в сгораемом топливе удастся преобразовать в полезную механическую работу и то на режимах полных нагрузок, а на частичных режимах, на которых в основном и работает автомобильный двигатель, эффективный КПД в разы меньше. С этой стороны считать автомобильный двигатель совершенной машиной не справедливо. Отсюда и понятны более столетние поиски ученых, исследователей, конструкторов путей повышения эффективного КПД двигателя. На мой взгляд, единственным способом существенного повышения эффективного КПД двигателя, является повышение степени сжатия. Всем известно, что ограничение на повышение степени сжатия в бензиновом двигателе ставит детонационное сгорание. Ибадуллаевым Г.А изготовлены экспериментальные образцы бензиновых двигателей со степенями сжатия 20, 25 и 30, хотя экспериментальными образцами их можно назвать условно, поскольку они изготовлены не в заводских, а в кустарных условиях. Двигатели эти работают без детонации, один из них установлен на автомобиль ВАЗ-2110 и на сегодняшний день имеет пробег 40 тыс. км. Со слов автора, двигатель не раз перебирался и состояние деталей КШМ идеальное.

1 Обор состояния вопроса

1.1 Период задержки воспламенения и очаг пламени

При разряде тока между электродами свечи появляется искра. Явление, подразумеваемое под термином «искра», представляет собой видимое глазу свечение нагретых до высоких температур (до 6000^0 С) молекул газа.

Нагретые молекулы вступают в реакцию окисления. Реакция окисления молекул углеводорода молекулами кислорода сопровождается выделением большого количества тепла и нагреванием соседних с окисляемыми компонентами слоями.

Т.е., приведенные явления выражают суть видимого глазом процесса создания очага высокой температуры и распространения этой температуры по камере сгорания.

Часть топливно-воздушной смеси в зоне искрового разряда, охваченная устойчивым процессом окисления, является очагом пламени. Время, за которое очаг пламени возникает, называется периодом задержки воспламенения.

1.2 Распространение фронта пламени в ДВС

Чем меньше расстояние между молекулами и меньше разница температур между участком искрового разряда и окружающей смесью, тем лучше условия формирования очага пламени. Чем меньше разница температур между очагом пламени и окружающей смесью и выше давление, тем лучше происходит распространение пламени по фронту. Поэтому, чем выше степень сжатия смеси, тем перечисленные условия лучше.

В момент формирования очага пламени в камере сгорания двигателя возникают две области чрезвычайно контрастных физических состояний. Нагревание газов, примерно от 600^0 С до 2700^0 С в очаге пламени приводит к резкому увеличению их объема.

Очаг пламени развивается в виде увеличивающегося в размерах огненно-

го шара вокруг места искрового разряда. Соприкоснувшись со стенкой камеры сгорания, шар принимает форму полусферы. Затем соприкоснувшись с днищем поршня, полусфера деформируется, приобретает по краям плоскую цилиндрическую форму.

При дальнейшем горении в точке, которая была очагом пламени, смесь выгорает. Там возникает зона продуктов сгорания (выгоревшая зона). Выгоревшая зона и зона смеси разделяются слоем – фронтом пламени. Толщина этого слоя от нескольких долей миллиметра до нескольких сантиметров в зависимости от режима распространения пламени (ламинарный и турбулентный). В этом слое и происходит горение и выделение теплоты. За счет выделения теплоты этот слой нагревается и пытается расшириться, сжимая при этом и зону еще не сгоревшей смеси, и зону, в которой горение завершилось и находятся продукты сгорания.

Любое возмущение в жидкостях и газах распространяется со скоростью звука. Так как размеры камер сгорания поршневых двигателей малы, а скорость звука 500-600 м/с, то давление через доли микросекунд выравнивается по всему объему. Еще до прихода фронта сгорания давление в зоне свежей смеси увеличиваются, что влечет за собой и увеличение температуры. Если поджатие свежей смеси интенсивное, ее давление и температура могут достигнуть таких значений, которые достаточны для детонационного сгорания. При превышении определенного предела давления и температур происходит взрыв.

Таким образом, характер происходящих процессов требует совместить, казалось бы, несовместимые вещи. Чтобы улучшить процессы формирования очага пламени и его распространения по фронту, давление и температура смеси должны быть высокими. Чтобы не было детонации, они должны быть относительно низкими.

Детонационные давления и температура появляются в области смеси в завершающей стадии такта сжатия и исчезают с исчезновением области смеси. Такой отрезок такта сжатия в дальнейшем будет называться «завершением сжатия», а такта расширения «началом расширения». В координатах рабочего такта

линия «начала расширения» и линия «полного распространения пламени по фронту» или «момент завершения распространения пламени по фронту» имеют одинаковую длину. Т.е. указанные термины выражают суть одного и того же процесса.

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

а) Уменьшение в объеме за счет вовлечения в зону пламени (нейтральный фактор).

б) Уменьшение в объеме за счет сжатия давлением, исходящим от области пламени (отрицательный).

в) Уменьшение в объеме из-за сжатия на такте сжатия (отрицательный).

г) Уменьшение в объеме из-за теплоотвода в стенки камеры сгорания (положительный).

д) Увеличение в объеме из-за расширения камеры сгорания на такте расширения (положительный).

Если исключить положительные факторы, то окажется, что область пламени в период его увеличения на тактах сжатия и расширения содержит в себе одну общую причину, вызывающую детонацию. Это- перепад давлений в зоне пламени и в зоне смеси. Высокое давление, исходящее от зоны горения поджимает зону смеси. Поднимает ее давление, тем самым увеличивает и температуру. И тем самым создает условия для возникновения детонации.

Процесс возникновения самовоспламенения на сжатии выглядит следующим образом:

По достижении в цилиндре определенного давления подается искра, формируется очаг пламени, начинается ввод теплоты в рабочее тело. В какой степени ввод теплоты на сжатии влияет на область смеси видно из расчетов для двигателя со степенью сжатия 9,9 при частоте работы 2200 об/мин, при полном наполнении, при температуре смеси на впускном клапане 65°C .

1. Угол начала ввода теплоты 15° до ВМТ. В момент достижения порш-

нем ВМТ температура в камере сгорания 834°C , давление 33.2 кг/см^2 .

2. При угле ввода теплоты в 0 градусов в момент достижения поршнем ВМТ температура смеси составляла 385°C , давление 19.5 кг/см^2 .

т.е. увеличение температуры рабочего тела на 449°C и давления на 13.7 кг/см^2 на такте сжатия получено за счет ввода теплоты.

Это показывает, что ввод теплоты на сжатии означает принудительное увеличение давления и температуры смеси для обеспечения лучших условий ее сгорания. Но вместе с тем это означает, что искусственным путем создаются и условия для возникновения детонации.

При тех же условиях для моего двигателя со степенью сжатия 22 оптимальная точка ввода теплоты составляет 0° ПКВ. Давление конца сжатия в ВМТ составляет 60 кг/см^2 , температура T_c составляет, примерно $700-750^{\circ}\text{C}$. При этих параметрах оба двигателя работают без детонации.

(Вместе с тем индикаторная диаграмма цикла показывает, что это – не оптимальная, а вынужденная точка, при которой удается избежать детонации за счет понижения эффективности цикла. Для решения вопроса о том, как эти моменты соотносятся между собой нужен полноценный двигатель).

Приведенные цифры давления и температуры конца сжатия являются преддетонационными. Незначительное их дальнейшее увеличение должно повлечь за собой детонационное сгорание. Тем не менее двигатель работает без детонации. Объяснение этому следующее:

Скорость движения поршня на сжатии и расширении одинакова. Но на расширении перемещение поршня от ВМТ увеличивает объем камеры сгорания, т.е. фактор становится положительным. К этому добавляется и действие фактора: уменьшение в объеме из-за теплоотвода в стенки камеры сгорания.

При создании двигателя со сверхвысокой степенью сжатия задача состояла в том, чтобы компенсировать увеличение давления таким же увеличением объема камеры сгорания. При исключении из процесса фактора сжатия зоны смеси исходное давление конца сжатия в камере сгорания может быть значительно выше (от 55 кг/см^2). В зависимости от условий протекания процесса го-

рения оно может увеличиваться до сверхвысоких значений (до 100 кг/см² и выше).

1.3 Время задержки самовоспламенения

Эксперименты показывают, что детонационные давления и температуры возникают в любом современно бензиновом двигателе. Но детонационное сгорание происходит только в том случае, если повышенные температура и давление сохраняются в продолжение некоторого отрезка времени.

Т.е., как инициируемому извне процессу создания очага пламени предшествует период задержки воспламенения, так и процессу самовоспламенения предшествует период или время задержки самовоспламенения.

Различие между периодом задержки воспламенения и периодом задержки самовоспламенения заключается в том, что формирование очага пламени при искровом разряде происходит при существенно более благоприятных условиях и быстрее (температура 6000⁰ С), чем формирование очага детонационного сгорания (температура 600-900⁰ С).

Поэтому процесс детонационного горения происходит совершенно по-иному, чем в очаге пламени. Различия условий протекания и последствия произошедших реакций окисления столь велики, что участок детонационного сгорания не может, как очаг пламени, стать источником распространения пламени по фронту. При сверхвысоких давлениях и температурах конца сжатия он может стать только источником детонационного взрыва всей смеси.

Детонационное сгорание, по сравнению со скоростью распространения пламени, почти мгновенный процесс. В этом процессе часть теплоты, заключенная в молекулах топлива, утрачивается (образование сажи). Другая часть теплоты превращается в температуру, температура в давление, давление в ударную волну, а ударная волна снова в температуру.

1.4 Продолжительность времени задержки самовоспламенения

Детонационное горение, как реакция окисления, может возникнуть только при условии, если будут преодолены нижние пороги требуемых для этого величин температуры и давления. При этом величины температуры и давления имеют между собой прямую зависимость. Для условий работы современного бензинового ДВС нижним порогом возникновения детонации являются температура, примерно, 400°C , давление сжатия, примерно $16-18\text{ кг/см}^2$. Ниже этого порога детонации не возникают. При этом пороге время задержки самовоспламенения имеет максимальную продолжительность. При дальнейшем повышении давления и температуры продолжительность времени задержки самовоспламенения уменьшается. Верхним порогом возникновения детонационного горения являются такие уровни температур и давлений, при которых время задержки самовоспламенения имеет продолжительность равную нулю.

Возникновение в сжатой смеси детонационных давления и температуры вовсе не означает, что в цилиндре произойдет детонационное горение. Если завершение сжатия и начало расширения закончатся быстрее времени задержки самовоспламенения, детонационное сгорание не произойдет.

Поэтому, если на сжатии обеспечить необходимое соотношение между временем завершения сжатия, временем задержки самовоспламенения, давлением и температурой смеси, а на расширении достичь синхронизации процесса увеличения объема области пламени и объема камеры сгорания, детонации не будет ни на сжатии ни на расширении. Влияния двух приведенных выше положительных факторов на состояние смеси, т.е. увеличение объема смеси за счет перемещения поршня от ВМТ и уменьшение в объеме из-за теплоотвода в стенки камеры сгорания вполне хватает, чтобы удержать смесь от самовоспламенения.

При соблюдении перечисленных условий величина степени сжатия двигателя (в разумных пределах) практически не имеет значения.

Время задержки самовоспламенения величина переменная. Оно зависит

от давления и температуры смеси. Чем они выше тем время задержки самовоспламенения меньше и наоборот.

Итоги раздела 1

Из изложенного следует, что для обеспечения работы бензинового ДВС со сверхвысокой степенью сжатия необходимо чтобы в определенном диапазоне частот:

1. На завершении такта сжатия при положении поршня в ВМТ в цилиндре двигателя достигалось бы максимально возможное преддетонационное давление P_1 .

2. Сжатие завершилось бы раньше времени задержки самовоспламенения.

3. Ввод теплоты начинался бы в момент завершения такта сжатия.

4. В начале расширения область пламени лишилась бы возможности поджимать область смеси.

5. Полное распространение пламени по фронту на такте расширения (начало расширения), произошло бы при постоянном давлении P_1 .

2 Тепловой расчет и тепловой баланс двигателя работающего при повышенной степени сжатия

Исходные данные: Двигатель ВАЗ четырехцилиндровый, $i = 4$ $iV_h = 1,5$ л, частота вращения коленчатого вала $n = 5600$ об/мин. Степень сжатия $\varepsilon = 18$.

При проведении теплового расчёта для нескольких скоростных режимов обычно выбирают 5 основных режима:

- режим минимальной частоты вращения $n_{min} = 850 \text{ мин}^{-1}$;
- режим $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$;
- режим максимально крутящего момента при $n_M = 3200 \text{ мин}^{-1}$;
- режим максимальной (номинальной) мощности $n_N = 5600 \text{ мин}^{-1}$;
- режим максимальной скорости движения автомобиля при $n_{max} = 6000 \text{ мин}^{-1}$.

2.1 Топливо

Средний элементарный состав и молекулярная масса топлива: $C = 0,855$; $H = 0,145$ и $m_T = 115$ кг/кмоль.

Низшая теплота сгорания топлива:

$$H_u = 33,91C + 125,6H - 10,89(O - S) - 2,51 \cdot (9H + W); \text{ кДж/кг} \quad (2.1)$$

$$H_u = 33,91 \cdot 0,855 + 125,6 \cdot 0,145 - 2,51 \cdot 9 \cdot 0,145 = 43930 \text{ кДж/кг.}$$

2.2 Параметры рабочего тела

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания топлива:

$$L_0 = \frac{1}{0,208} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) = \frac{1}{0,208} \left(\frac{0,855}{12} + \frac{0,145}{4} \right) = 0,516 \text{ кмоль возд/кг топл;} \quad (2.2)$$

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} C + 8H - O \right) = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} \cdot 0,855 + 8 \cdot 0,145 \right) = 14,957 \text{ кг возд/кг топл.} \quad (2.3)$$

Примем $\alpha = 1$ на всех режимах, как для базового так и для спроектированного двигателя.

Далее проводятся расчетные формулы, а результаты расчета для всех режимов приводятся в виде таблиц.

Количество горючей смеси:

$$M_1 = \alpha L_0 + 1/m_T ; \text{ кмоль гор. см./кг топл.} \quad (2.4)$$

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

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

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

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

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

$$M_{N_2} = 0,792 \cdot \alpha \cdot L_0 ; \text{ кмоль } N_2/\text{кг топл.} \quad (2.9)$$

Общее количество продуктов сгорания:

$$M_2 = M_{CO_2} + M_{CO} + M_{H_2O} + M_{H_2} + M_{N_2} ; \text{ кмоль пр.сг./кг топл.} \quad (2.10)$$

Коэффициент молекулярного изменения свежей смеси

$$\mu_0 = M_2 / M_1 \quad (2.11)$$

Результаты расчета параметров рабочего тела приведены в таблице 2.1, так как состав смеси одинаковый то параметры рабочего тела для всех режимах одинаковые поэтому приведен один режим.

Таблица 2.1 - Параметры рабочего тела

| $n, \text{ мин}^{-1}$ | α | $M_1, \text{ кмоль гор. см./кг топл.}$ | $M_{CO_2}, \text{ кмоль } CO_2/\text{кг топл.}$ | $M_{CO}, \text{ кмоль } CO/\text{кг топл.}$ | $M_{H_2O}, \text{ кмоль } H_2O/\text{кг топл.}$ | $M_{H_2}, \text{ кмоль } H_2/\text{кг топл.}$ | $M_{N_2}, \text{ кмоль } N_2/\text{кг топл.}$ | $M_2, \text{ кмоль пр.сг./кг топл.}$ | μ_0 |
|-----------------------|----------|--|---|---|---|---|---|--------------------------------------|----------|
| 900 | 1 | 0,525523 | 0,07125 | 0 | 0,0725 | 0 | 0,409327 | 0,553077 | 1,052432 |

2.3 Параметры окружающей среды и остаточные газы

Атмосферные условия: $p_0 = 0,1$ МПа и $T_0 = 293$ К.

Давление остаточных газов:

$$p_r = p_k(1,035 + A_p \cdot 10^{-8} n^2), \quad (2.12)$$

где $p_{rN} = 1,18p_0 = 1,18 \cdot 0,1 = 0,118$ МПа; $A_p = (p_{rN} - p_0 \cdot 1,035) 10^8 / (n_N^2 p_0)$.

Результаты расчета параметров окружающей среды и остаточных газов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Параметры окружающей среды и остаточных газов

| $n, \text{мин}^{-1}$ | $\rho_k, \text{кг/м}^3$ | $T_k, \text{К}$ | $p_k, \text{Мпа}$ | $T_r, \text{К}$ | $p_r, \text{Мпа}$ |
|----------------------|-------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| 900 | 1,189 | 293 | 0,1 | 1160 | 0,103875 |
| 2000 | 1,189 | 293 | 0,1 | 1170 | 0,105349 |
| 3500 | 1,189 | 293 | 0,1 | 1195 | 0,109164 |
| 5000 | 1,189 | 293 | 0,1 | 1235 | 0,115059 |
| 5600 | 1,189 | 293 | 0,1 | 1300 | 0,118 |
| Двигатель ВАЗ-2112 | | | | | |
| 900 | 1,189 | 293 | 0,1 | 1080 | 0,109 |
| 2600 | 1,189 | 293 | 0,1 | 1161 | 0,112 |
| 3700 | 1,189 | 293 | 0,1 | 1245 | 0,114 |
| 5000 | 1,189 | 293 | 0,1 | 1265 | 0,116 |
| 5600 | 1,189 | 293 | 0,1 | 1305 | 0,118 |

2.4 Расчет процесса впуска

Принимается $\Delta T_N = 10^\circ\text{C}$, тогда, $A_T = \Delta T_N / (110 - 0,0125n_N)$, следовательно ΔT :

$$\Delta T = A_T(110 - 0,0125n). \quad (2.13)$$

Плотность заряда на впуске: $\rho_k = p_k \cdot 10^6 / (R_B T_k)$; кг/м^3 .

Потери давления на впуске.

$$\Delta p_a = (\beta^2 + \xi_{вп}) A_n^2 n^2 \rho_k \cdot 10^{-6} / 2 \text{ МПа}. \quad (2.14)$$

Давление в конце впуска:

$$p_a = p_k - \Delta p_a; \text{ МПа}. \quad (2.15)$$

Коэффициент остаточных газов:

$$\gamma_r = \frac{T_k + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{\varphi_{оч} p_r}{\varepsilon \varphi_{доз} p_a - \varphi_{оч} p_r}, \quad (2.16)$$

где $\varphi_{оч}$ – коэффициент очистки; $\varphi_{доз}$ – коэффициент дозарядки.

Температура в конце впуска:

$$T_a = (T_k + \Delta T + \gamma_r T_r) / (1 + \gamma_r); \text{ К.} \quad (2.17)$$

Коэффициент наполнения:

$$\eta_v = \frac{T_k}{T_k - \Delta T} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{p_k} (\varphi_{доз} \cdot \varepsilon \cdot p_a - \varphi_{оч} \cdot p_r). \quad (2.18)$$

Удельный объем рабочего тела в конце процесса наполнения

$$V_a = 8.314 \cdot 10^{-3} \left[\left(\alpha \cdot \frac{l_0}{\mu_B} + \frac{1}{\mu_m} \right) T_a \right] / \left[(1 + \alpha \cdot l_0) p_a \right] \quad (M^3), \quad (2.19)$$

Результаты расчета процесса впуска приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Расчет процесса впуска

| n, мин ⁻¹ | ΔT, °C | Δp, Мпа | p _a , Мпа | φ _{оч} | φ _{доз} | γ _r | T _a , К | η _v | V _a , К |
|----------------------|---------|-----------|----------------------|-----------------|------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|
| 900 | 24,6875 | 0,006783 | 0,093217 | 0,99 | 0,9 | 0,036197 | 347,1114 | 0,755371 | 1,0209 |
| 2000 | 21,25 | 0,010275 | 0,089725 | 0,94 | 0,96 | 0,033024 | 341,6072 | 0,790464 | 1,04618 |
| 3500 | 16,5625 | 0,013004 | 0,086996 | 0,88 | 1,02 | 0,029779 | 335,1675 | 0,832584 | 1,058665 |
| 5000 | 11,875 | 0,0176995 | 0,0823 | 0,84 | 0,97 | 0,032173 | 333,8676 | 0,750205 | 1,114729 |
| 5600 | 10 | 0,019425 | 0,080575 | 0,8 | 0,95 | 0,031019 | 332,9951 | 0,722023 | 1,133133 |
| Двигатель ВАЗ-2112 | | | | | | | | | |
| 900 | 19,75 | 0,005779 | 0,094221 | 1 | 0,85 | 0,043126 | 344,4703 | 0,721787 | 1,000492 |
| 2600 | 15,5 | 0,010275 | 0,089725 | 0,94 | 0,93 | 0,036289 | 338,3532 | 0,770691 | 1,033941 |
| 3700 | 12,75 | 0,013588 | 0,086412 | 0,98 | 1 | 0,033797 | 336,4559 | 0,804532 | 1,067569 |
| 5000 | 9,5 | 0,016054 | 0,083946 | 0,81 | 0,95 | 0,029931 | 330,4714 | 0,758778 | 1,079382 |
| 5600 | 8 | 0,019425 | 0,080575 | 0,77 | 0,94 | 0,029751 | 330,0071 | 0,721778 | 1,122965 |

2.5 Расчет процесса сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси

Коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси

$$\mu = (\mu_0 + \gamma_r) / (1 + \gamma_r) \quad (2.20)$$

Значение показателя политропы сжатия находится методом последовательных приближений

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

Давление, температура и удельный объём в конце сжатия:

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

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

Удельный объём, давление и температура рабочего тела в момент воспламенения, при угле опережения зажигания Θ ,

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

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

Результаты расчета процесса сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Давление, температура и удельный объём в конце сжатия и воспламенения:

| п, мин ⁻¹ | μ | n _l | P _c , МПа | T _c , К | Θ°ПКВ | V _y , м ³ /кг | P _y , МПа | T _y , 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 |
| Двигатель ВА3-2112 | | | | | | | | |
| 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 χ 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 2.5.

Таблица 2.5 - Коэффициенты термодинамического расчета

| n, мин ⁻¹ | δ | Ψ | ξ | q _z , Дж/кг | E ₂ , МПа | φ_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 |
| Двигатель ВАЗ-2112 | | | | | | | |
| 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 – 1^0 ПКВ и приведен в Приложении А и на плакате теплового расчёта.

2.7 Расчет процессов расширения и выпуска

Степень последующего расширения при V_z

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

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:

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

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

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

Для оценки правильности выбора значения температуры отработавших газов, произведём проверку

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

погрешность расчёта Δ :

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

Результаты расчета процесса расширения и выпуска приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Расчет процесса расширения и выпуска

| $n, \text{мин}^{-1}$ | $V_z, \text{м}^3$ | $T_z, \text{К}$ | $P_z, \text{МПа}$ | δ | 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 |
| Двигатель ВАЗ-2112 | | | | | | | | | |
| 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

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

Результаты расчета индикаторных показателей рабочего цикла приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Индикаторные показатели рабочего цикла

| $n, \text{ мин}^{-1}$ | $L_i, \text{ кДж}$ | $P_i, \text{ МПа}$ | $N_i, \text{ кВт}$ | η_i | $g_i, \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$ |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------|-------------------------------------|
| 900 | 1,1718807 | 1,26863 | 14,27209 | 0,489426 | 167,4399 |
| 2000 | 1,1166917 | 1,17975 | 29,49376 | 0,456318 | 179,5886 |
| 3500 | 1,1498939 | 1,200507 | 52,5222 | 0,440856 | 185,8873 |
| 5000 | 1,1350542 | 1,125416 | 70,33848 | 0,458662 | 178,6709 |
| 5600 | 1,2659878 | 1,234851 | 86,43956 | 0,498398 | 164,4257 |
| Двигатель ВА3-2112 | | | | | |
| 900 | 1,0012 | 1,1060343 | 12,442886 | 0,4289854 | 191,03093 |
| 2600 | 1,09 | 1,1651984 | 37,868947 | 0,4405874 | 186,00051 |
| 3700 | 1,1957 | 1,2379594 | 57,255621 | 0,4484105 | 182,75552 |
| 5000 | 1,224 | 1,2533459 | 78,334121 | 0,4813589 | 170,24613 |
| 5600 | 1,2406 | 1,2210353 | 85,47247 | 0,4929888 | 166,22992 |

2.9 Эффективные показатели и параметры двигателя

Давление механических потерь при $S/D = 71/82 = 0.865$, если средняя ско-

рость поршня: $v_n = \frac{Sn}{30}, \text{ м/с}$

Среднее давление механических потерь

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

Среднее эффективное давление

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

Механический К.П.Д.

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

Эффективный К.П.Д.

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

Удельный эффективный расход топлива

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

Эффективная мощность

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

Часовой расход топлива

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

Крутящий момент

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

Результаты расчета эффективных показателей двигателя приведены в таблице 2.8. Графически они представлены на плакате ВСХ.

Таблица 2.8 - Эффективные показатели двигателя

| n, мин ⁻¹ | V _{п.ср} , м/с | p _м , Мпа | p _е , Мпа | η _м | η _е | g _е , г/(кВт.ч) | Ne, кВт | Me, Н.м | G _T , кг/ч |
|----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------------------|---------|---------|-----------------------|
| 900 | 2,13 | 0,0671 | 1,2035 | 0,9471 | 0,4643 | 176,4996 | 13,539 | 143,64 | 2,389 |
| 2000 | 4,733 | 0,10148 | 1,0827 | 0,9143 | 0,4188 | 195,6686 | 27,069 | 129,23 | 5,296 |
| 3500 | 8,283 | 0,14834 | 1,0537 | 0,8765 | 0,3869 | 211,7794 | 46,1 | 125,76 | 9,763 |
| 5000 | 11,833 | 0,1952 | 0,9290 | 0,8263 | 0,3786 | 216,43 | 58,067 | 110,88 | 12,567 |
| 5600 | 13,253 | 0,2139 | 1,0188 | 0,8264 | 0,4112 | 199,2899 | 71,317 | 121,59 | 14,212 |
| Двигатель ВА3-2112 | | | | | | | | | |
| 900 | 2,13 | 0,0671 | 1,0389 | 0,9393 | 0,4029 | 273,3719 | 11,68 | 123,99 | 3,377 |
| 2600 | 6,153 | 0,1202 | 1,0449 | 0,8968 | 0,3951 | 267,3998 | 33,96 | 124,72 | 9,043 |
| 3700 | 8,756 | 0,1546 | 1,0834 | 0,8751 | 0,3924 | 258,8332 | 50,11 | 129,3 | 12,464 |
| 5000 | 11,833 | 0,1952 | 1,0581 | 0,8442 | 0,4064 | 261,652 | 66,13 | 126,29 | 15,336 |
| 5600 | 13,253 | 0,2139 | 1,0071 | 0,8248 | 0,4066 | 271,5434 | 70,49 | 120,19 | 17,208 |

3 Тепловой баланс двигателя

Общее количество теплоты, введенной в двигатель с топливом: [1]

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

Теплота, эквивалентная эффективной работе за 1 с:

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

Теплота, передаваемая охлаждающей среде:

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

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

Теплота, унесенная с отработанными газами:

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

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

где $(mc_V'')_{t_o}^{t_{20}} = 20.775$ кДж/(кмоль * град) – теплоемкость свежего заряда (воздуха) (определяется по таблице 6 – [1]) при 20°C.

$(mc_V'')_{t_o}^{t_r}$ - теплоемкость остаточных газов, определяется по (таблице 7 – [1]) методом интерполяции при соответствующих α и t_r .

Теплота, потерянная из-за химической неполноты сгорания топлива отсутствует, так как на всех режимах поддерживается стехиометрический состав топливовоздушной смеси.

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

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

Неучтенные потери теплоты:

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

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

Результаты расчетов тепловой баланс двигателя сводим в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 - Тепловой баланс разрабатываемого двигателя

| п, мин ⁻¹ | G _T , кг/ч | Q ₀ , Дж/с | Q _e , Дж/с | q _e , % | Q _B , Дж/с | q _B , % | Q _r , Дж/с | q _r , % | Q _{н.с.} , Дж/с | q _{н.с.} , % | Q _{ост} , Дж/с | q _{ост} , % |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------|
| 900 | 2,389 | 23363 | 8432 | 36,1 | 6352 | 27,2 | 6080 | 26,0 | 0 | 0 | 1181 | 5,1 |
| 2000 | 5,296 | 42977 | 16556 | 38,5 | 12405 | 28,9 | 12509 | 29,1 | 0 | 0 | 1508 | 3,5 |
| 3500 | 9,763 | 60525 | 22048 | 36,4 | 18022 | 29,8 | 18004 | 29,7 | 0 | 0 | 2450 | 4,0 |
| 5000 | 12,56 | 107949 | 33381 | 30,9 | 34522 | 32,0 | 35201 | 32,6 | 0 | 0 | 4845 | 4,5 |
| 5600 | 14,21 | 115752 | 33212 | 28,7 | 35804 | 30,9 | 36961 | 31,9 | 0 | 0 | 6514 | 5,6 |

4 Кинематический расчет

В целях уменьшения высоты двигателя без значительного увеличения инерционных и нормальных сил величина отношения радиуса кривошипа к длине шатуна предварительно была принята в тепловом расчете $\lambda=0,285$. При этих условиях

$$L_{ш} = R/\lambda = 35,5/0,293 = 121 \text{ мм.} \quad (4.1)$$

Перемещение поршня рассчитывается по формуле

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

Расчет S_x производится аналитически через каждые 30° угла поворота коленчатого вала. Диаграмма перемещения поршня приведена на рисунке 3.

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;

$$\omega = 3,14 \cdot 5600 / 30 = 586,13 \text{ рад/с.} \quad (4.3)$$

Средняя скорость поршня

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

Диаграмма скорости поршня приведена на рисунке 4.

Ускорение поршня рассчитывается по следующей формуле

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

Диаграмма перемещения, скорости и ускорения поршня приведена на плакатах.

5 Динамический расчет двигателя

5.1 Силы давления газов

Индикаторную диаграмму, полученную в тепловом расчете, развертывают по углу поворота кривошипа по методу Брикса.

Масштабы развернутой диаграммы: хода поршня $S_x=1$ мм в мм, давлений $M_p=0,08$ МПа в мм, сил $M_f=M_p \cdot F_{\text{плш}}=0,08 \cdot 0,005282=0,42$ кН в мм, угла поворота кривошипа $M_\varphi=4^\circ$ в мм или

$$M_\varphi = \frac{4 \cdot \pi}{OB} = \frac{4 \cdot 3,14}{180} = 0,0697 \text{ рад в мм} \quad (5.1)$$

Поправка Брикса определяется по формуле

$$\frac{R \cdot \lambda}{2 \cdot M_s} = \frac{35,5 \cdot 0,293}{2 \cdot 1} = 5,06 \text{ мм} \quad (5.2)$$

По развернутой индикаторной диаграмме через каждые 10° угла поворота кривошипа определяют значения $\Delta p, p_r$. Строят графики зависимости Δp , и p_r , в зависимости от угла поворота φ .

5.2 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 (для поршня из алюминиевого сплава $m_{\text{п}}=100$ кг/м²)

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

- масса шатуна (для стального ковального шатуна $m_{ш}=150 \text{ кг/м}^2$)

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

- масса неуравновешенных частей одного колена вала без противовесов
(для стального ковального вала $m_k=140 \text{ кг/м}^2$)

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

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

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

5.3 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

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

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа

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

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа:

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

5.4 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

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

Полная тангенциальная сила (кН)

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

Результаты динамического расчета графически представлены на плакатах.

5.5 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° 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:

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

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

5.6 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

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

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 данным таблицы 25 по каждому лучу откладываем величины суммарных сил $\sum R_{ш.ш.i}$ от окружности к центру. По лучам 4 и 5 силы $\sum R_{ш.ш.i}$ действуют только в интервале $350^\circ < \varphi < 360^\circ$.

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

5.7 Силы, действующие на колено вала

Суммарная сила, действующая на колено вала по радиусу кривошипа

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

Результирующая сила, действующая на колено вала

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

5.8 Силы, действующие на коренные шейки

Сила, действующая на первую коренную шейку

$$R_{к.ш.1} = -0,5 * R_{k1} \text{ (таблица 26, графы 1 - 4).} \quad (5.30)$$

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

$$R_{к.ш.3} = \sqrt{T_{k3}^2 + K_{k3}^2}, \quad (5.34)$$

ГДЕ:

$$T_{k3} = -0.5 * (T_2 + T_3 * \cos \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} * \sin \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0.5 * (T_2 + T_3 * \cos 0^\circ - K_{pk3} * \sin 0^\circ) * \cos 180^\circ = 0.5 * (T_2 + T_3); \quad (5.35)$$

$$K_{k3} = -0.5 * (K_{pk2} + T_3 * \sin \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} * \cos \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0.5 * (K_{pk2} + T_3 * \sin 0^\circ - K_{pk3} * \cos 0^\circ) * \cos 180^\circ = 0.5 * (K_{pk2} - K_{pk3}). \quad (5.36)$$

Расчет силы $R_{к.ш.3}$ приведен в табл. 26 (гр. 12 -16).

По данным таблице 26 строим полярные диаграммы нагрузки на первую, вторую и третью коренные шейки.

Нагрузки на 4-ю и 5-ю коренные шейки в соответствии с порядком работы двигателя и расположением кривошипов равны нагрузкам, действующим на 2-ю и 1-ю шейки, но смещены на 360° .

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

- для 1 (5)-й коренной шейки:

$$R_{к.ш1ср} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш1i} + R_{к.ш1i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 9325 H, \quad (5.36)$$

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

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

- для 2 (4)-й коренной шейки:

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

$$R_{к.ш2max} = 16359 H,$$

$$R_{к.ш2min} = 1128 H.$$

- для 3-й коренной шейки:

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

$$R_{к.ш3max} = 21090 H,$$

$$R_{к.ш3min} = 7251 H.$$

5.9 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

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

Уравновешивание сил инерции второго порядка в рассчитываемом двигателе нецелесообразно, так как применение двухвальной системы с противовесами для уравновешивания $\sum P_{j2}$ значительно усложнит конструкцию двигателя.

Моменты от сил инерции второго порядка в связи с зеркальным расположением цилиндров полностью уравновешены

$$\sum M_{j2} = 0. \quad (5.42)$$

В целях разгрузки 3-й коренной шейки от местных инерционных сил целесообразно установить противовесы на продолжении щек, прилегающих к ней.

Сила инерции одного противовеса

$$P_{PP} = -0,5 * P_{PP3} * l / l_1 = 0,5 * (-16000) * 0.094 / 0.070 = 10743 \text{ Н} ; \quad (5.43)$$

- масса каждого противовеса

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

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

Для уравнивания центробежных сил $P_{пр}$ противовесов, расположенных на продолжении щек, прилегающих к 3-й коренной шейке, и для уменьшения нагрузки на 1-ю и 5-ю коренные шейки целесообразно на продолжении щек, прилегающих к 1-й и 5-й шейкам, также установить противовесы

$$P_{пр1} = P_{пр5} = 0,5P_{пр3} \quad (5.45)$$

Центры полярных диаграмм в связи с установкой противовесов сместятся на величину, пропорциональную реакции от противовесов, $P'_{пр1(5)} = 0,5P'_{пр3} 8000$ Н.

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

- для 1 (5)-й коренной шейки:

$$R_{к.ш1(5)ср}^{np} = F_{1(5)}^{np} / 720^\circ = 913848 / 720^\circ = 1269.2H, \quad (5.46)$$

$$R_{к.ш1(5)max}^{np} = 4355 H, \quad (5.47)$$

$$R_{к.ш1(5)min}^{np} = -3866 H. \quad (5.48)$$

- для 3-й коренной шейки:

$$R_{к.ш3ср}^{np} = F_3^{np} / 720^\circ = 1402046 / 720^\circ = 1947 H,$$

$$R_{к.ш3max}^{np} = 5090 H,$$

$$R_{к.ш3min}^{np} = -8749 H.$$

5.10 Равномерность крутящего момента и равномерность хода двигателя

Равномерность крутящего момента

$$\mu = (M_{кр.маx} - M_{кр.мин}) / M_{кр.ср.} = [499,87 - (201,57)] / 147,93 = 4,74 \quad (5.49)$$

Избыточная работа крутящего момента

$$L_{изб} = A * 4 * \pi / (4 * 90) = 16961 * 4 * \pi / 360 = 592,05 \text{ Дж} \quad (5.50)$$

где $L_{изб}$ - площадь над прямой среднего крутящего момента.

Равномерность хода двигателя принимаем $\delta = 0,015$.

Момент инерции движущихся масс двигателя, приведенных к оси коленчатого вала

$$I_0 = L_{изб} / (\delta * \omega^2) = 592,02 / (0,015 * 586^2) = 0,115 \text{ кг} * \text{м}^2 \quad (5.51)$$

6 Расчет основных деталей двигателя

6.1 Расчет поршневой группы

6.1.1 Расчет поршня

Напряжение изгиба в днище поршня

$$\sigma_{из} = P_{z0} * (r_i / \delta)^2 = 7,539 * (29,8/8)^2 = 104,6 \text{ МПа} , \quad (6.1)$$

где

$$r_i = D/2 - (s + t + \Delta t) = 82/2 - (7 + 3,5 + 0,7) = 29,8 \text{ мм} . \quad (6.2)$$

Днище поршня должно быть усилено ребрами жесткости.

Напряжение сжатия в сечении x – x

$$\sigma_{сж} = P_{z0} / F_{x-x} = 0,0398 / 0,001366 = 29,1 \text{ МПа} ,$$

где:

$$P_{z0} = p_{z0} * F_{II} = 7,539 * 52,81 * 10^{-4} = 0,0398 \text{ МН} , \quad (6.3)$$

$$F_{x-x} = (\pi/4) * (d_k^2 * d_i^2) * -n'_M F' = [(3,14/4) * (73,6^2 - 60^2) - 4 * 15] * 10^{-6} = 0,001366 \text{ м}^2 ; \quad (6.4)$$

$$d_k = D - 2 * (t + \Delta t) = 82 - 2 * (3,5 + 0,7) = 73,6 \text{ мм} \\ F' = (d_k - d_i) * d_M / 2 = (73,6 - 60) * 3 / 2 = 15 \text{ мм}^2 ; \quad (6.5)$$

Напряжение разрыва в сечении x - x:

- максимальная угловая скорость холостого хода

$$\omega_{x.x. \max} = \pi * n_{x.x. \max} / 30 = 3,14 * 6000 / 30 = 628 \text{ рад/сж} , \quad (6.6)$$

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

$$m_{x.x.} = 0,5 * m_{\Pi} = 0,5 * 0,422 = 0,211 \text{ кг}; \quad (6.7)$$

- максимальная разрывающая сила

$$Pj = m_{x.x.} * R * \omega_{x.x.\text{max}}^2 * (1 + \lambda) = 0,211 * 0,0375 * 628^2 * (1 + 0,3125) * 10^{-6} = 0,00606 \text{ МН}; \quad (6.8)$$

- напряжение разрыва

$$\sigma_p = Pj / F_{x-x} = 0,00606 / 0,001366 = 4,44 \text{ МПа}. \quad (6.10)$$

Напряжения в верхней кольцевой перемычке:

- среза

$$\tau = 0,0314 p_{z0} D / h_{\Pi} = 0,0314 * 7,539 * 82 / 3,5 = 5,54 \text{ МПа}; \quad (6.11)$$

- изгиба

$$\sigma_{из} = 0,0045 p_{z0} (D / h_{\Pi})^2 = 0,0045 * 7,539 * (82 / 3,5)^2 = 18,62 \text{ МПа}; \quad (6.12)$$

- сложное

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{из}^2 + 4\tau^2} = \sqrt{18,62^2 + 4 * 5,54^2} = 21,67 \text{ МПа}. \quad (6.13)$$

Удельное давление поршня на стенку цилиндра:

$$q_1 = N_{\text{max}} / (h_{\text{ю}} * D) = 0,0019806 / (0,045 * 0,082) = 0,54 \text{ МПа}; \quad (6.14)$$

$$q_2 = N_{\max} / (H * D) = 0,0019806 / (0,064 * 0,082) = 0,38 \text{ МПа.} \quad (6.15)$$

Диаметры головки и юбки поршня:

$$D_{\Gamma} = D - \Delta_{\Gamma} = 82 - 0,57 = 81,43 \text{ мм;} \quad (6.16)$$

$$D_{\text{ю}} = D - \Delta_{\text{ю}} = 82 - 0,16 = 81,84 \text{ мм,} \quad (6.17)$$

где :

$$\Delta_{\Gamma} = 0,007D = 0,007 * 82 = 0,57 \text{ мм;} \quad (6.18)$$

$$\Delta_{\text{ю}} = 0,002D = 0,002 * 82 = 0,16 \text{ мм.} \quad (6.19)$$

Диаметральные зазоры в горячем состоянии:

$$\Delta'_{\Gamma} = D * [1 + \alpha_{\text{ц}}(T_{\text{ц}} - T_0)] - D_{\Gamma} * [1 + \alpha_{\text{п}}(T_{\Gamma} - T_0)] = 82 [1 + 11 * 10^{-6} (383 - 293)] - 81,43 [1 + 22 * 10^{-6} (593 - 293)] = 0,114 \text{ мм;} \quad (6.20)$$

$$\Delta'_{\text{ю}} = D * [1 + \alpha_{\text{ц}}(T_{\text{ц}} - T_0)] - D_{\text{ю}} * [1 + \alpha_{\text{п}}(T_{\text{ю}} - T_0)] = 82 [1 + 11 * 10^{-6} (383 - 293)] - 81,84 [1 + 22 * 10^{-6} (413 - 293)] = 0,025 \text{ мм;} \quad (6.21)$$

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

6.1.2 Расчет поршневого кольца

Среднее давление кольца на стенку цилиндра

$$P_{\text{ср}} = 0,152 * E * \frac{A_0 / t}{(D/t - 1)^3 * (D/t)} = 0,152 * 10^5 * \frac{10,5 / 3,5}{(82 / 2,5)^3 * (82 / 3,5)} = 0,173 \text{ МПа} \quad (6.22)$$

где

$$A_0 = 3t = 3 * 3,5 = 10,5 \text{ мм} \quad (6.23)$$

Давление кольца на стенку цилиндра в различных точках окружности

$$p = p_{cp} * \mu_k \quad (6.24)$$

Результаты расчета p , а также μ_k для различных углов φ приведены в таблице 29

Таблица 29 – Результаты расчета

| φ , град | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| μ_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

$$\sigma_{из1} = 2,61 * p_{cp} * (D/t - 1)^2 = 2,61 * 0,173 * (82/3,5 - 1)^2 = 227 \text{ МПа} \quad (6.25)$$

Напряжение изгиба при надевании кольца на поршень

$$\sigma_{из2} = \frac{4E * (1 - 0,114 * A_0 / t)}{m * (D/t - 1,4) * (D/t)} = \frac{4 * 10^5 * (1 - 0,114 * 10,5 / 3,5)}{1,57 * (82 / 3,5 * 1,4) * (82 / 3,5)} = 325 \text{ МПа} \quad (6.26)$$

Монтажный зазор в замке поршневого кольца

$$\Delta_k = \Delta'_k + \pi D * [\alpha_k (T_k - T_0)] - \alpha_{ц} * (T_{ц} - T_0) = 0,08 + 3,14 * 82 * [11 * 10^{-6} * (493 - 293)] - 11 * 10^{-6} * (383 - 293) = 0,392 \text{ мм}, \quad (6.27)$$

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

6.1.3 Расчет поршневого пальца

Расчетная сила, действующая на поршневой палец:

- газовая

$$P_{Z_{\max}} = p_{Z_{\max}} * F_{\Pi} = 7,539 * 52,81 * 10^{-4} = 0,0398 \text{ МН}; \quad (6.28)$$

- инерционная

$$P_j = -m_{\Pi} * R * \omega_M^2 * (1 + \lambda) * 10^{-6} = -0,422 * 335^2 * 0,0375 * (1 + 0,3125) * 10^{-6} = \\ = -0,00233 \text{ МН}, \quad (6.29)$$

где

$$\omega_M = \pi * n_M / 30 = 3,14 * 3200 / 30 = 335 \text{ рад/сж}; \quad (6.30)$$

- расчетная

$$P = P_{Z_{\max}} + k * P_j = 0,0398 - 0,82 * 0,00233 = 0,0379 \text{ МН}. \quad (6.31)$$

Удельное давление пальца на втулку поршневой головки

$$q_w = P / (d_{\Pi} * l_w) = 0,0379 / (22 * 26 * 10^{-6}) = 66,3 \text{ МПа}. \quad (6.32)$$

Удельное давление пальца на бобышки

$$q_{\delta} = P / (d_{\Pi} * (l_{\Pi} - b)) = 0,0379 / (0,022 * (0,06 - 0,03)) = 57,4 \text{ МПа}. \quad (6.33)$$

Напряжение изгиба в среднем сечении пальца

$$\sigma_{из} = P(l_{II} + 2b - 1,5l_{из}) / (1,2(1 - \alpha^4) * d_{II}^3) = 0,0379 * (0,06 + 2 * 0,03 - 1,5 * 0,026) / (1,2 * (1 - 0,682^4) * 0,022^3) = 351 \text{ МПа}, \quad (6.34)$$

где

$$\alpha = d_B / d_{II} = 15/22 = 0,682. \quad (6.35)$$

Касательные напряжения среза в сечениях между бобышками и головкой шатуна

$$\tau = 0,85 * P * (1 + \alpha + \alpha^2) / ((1 - \alpha^4) * d_{II}^2) = 0,85 * 0,0379 * (1 + 0,682 + 0,682^2) / (1 - 0,682^4) * 0,022^2 = 182 \text{ МПа}. \quad (6.36)$$

Наибольшее увеличение горизонтального диаметра пальца при овализации

$$\Delta d_{n \max} = \frac{1,35 * P}{E * l_{II}} * \left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^3 * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \frac{1,35 * 0,0379}{2 * 10^5 * 0,6} * \left(\frac{1 + 0,682}{1 - 0,682} \right)^3 * [0,1 - (0,682 - 0,4)^3] * 1000 = 0,049 \text{ мм} \quad (6.37)$$

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

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

$$\sigma_{\alpha 0^\circ} = \frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[0,19 * \frac{(2 + \alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} - \frac{1}{1 - \alpha} \right] * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \frac{15 * 0,0379}{0,06 * 0,022} * \left[0,19 * \frac{(2 + 0,682) * (1 + 0,682)}{(1 - 0,682)^2} - \frac{1}{1 - 0,682} \right] * [0,1 - (0,682 - 0,4)^3] = 178 \text{ МПа} \quad ;(6.38)$$

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

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha 90^\circ} &= \frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[0,174 * \frac{(2 + \alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} + \frac{0,636}{1 - \alpha} \right] * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \frac{15 * 0,0379}{0,06 * 0,022} * \\ &* \left[0,174 * \frac{(2 + 0,682) * (1 + 0,682)}{(1 - 0,682)^2} + \frac{0,636}{1 - 0,682} \right] * [0,1 - (0,682 - 0,4)^3] = -286 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (6.39)$$

Напряжения овализации на внутренней поверхности пальца:

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

$$\begin{aligned} \sigma_{i0^\circ} &= -\frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[0,19 * \frac{(1 + 2\alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2 * \alpha} + \frac{1}{1 - \alpha} \right] * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = -\frac{15 * 0,0379}{0,06 * 0,022} * \\ &* \left[0,19 * \frac{(1 + 2 * 0,682) * (1 + 0,682)}{(1 - 0,682)^2 * 0,682} + \frac{1}{1 - 0,682} \right] * [0,1 - (0,682 - 0,4)^3] = -341 \text{ МПа} \end{aligned} \quad ;(6.40)$$

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

$$\begin{aligned} \sigma_{i90^\circ} &= \frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[0,174 * \frac{(1 + 2\alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2 * \alpha} + \frac{0,636}{1 - \alpha} \right] * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \frac{15 * 0,0379}{0,06 * 0,022} * \\ &* \left[0,174 * \frac{(1 + 2 * 0,682) * (1 + 0,682)}{(1 - 0,682)^2 * 0,682} + \frac{0,636}{1 - 0,682} \right] * [0,1 - (0,682 - 0,4)^3] = 268 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (6.41)$$

Наибольшее напряжение овализации возникает на внутренней поверхности пальца в горизонтальной плоскости. Это напряжение не должно превышать 300...350 МПа

7 Специальная часть

1. Выше дано описание рабочих процессов, происходящих в камере сгорания двигателя со сверхвысокой степенью сжатия при его работе по внешней скоростной характеристике в определенном диапазоне частот.

2. Ввод теплоты в ВМТ позволяет при относительно небольших значениях температуры поднять давление сжатия рабочего тела P_1 до сверхвысоких значений.

3. Сихронизация скорости увеличения объема рабочего тела и его расширения при постоянном давлении P_1 позволяет исключить детонацию из процесса.

7.1 Линия расширения

На линии расширения интенсивность увеличения объема камеры сгорания существенно выше роста давления рабочего тела. При осмыслении процессов, происходящих в моем двигателе, предполагают, что линия расширения в нем имеет те же координаты, что и в традиционном двигателе. Однако, это совершенно не так.

Если взять за основу расчетов бензиновые двигатели со степенями сжатия 10 и 25 (обозначим их D_1 и D_2), сравнение происходящих в них процессов на такте расширения в плане изменения объемов дает следующую картину.

В обоих двигателях продолжительность тепловыделения 50° по углам ПКВ.

В D_1 при нахождении поршня в 15° после ВМТ высота камеры сгорания 11.53 мм.

В D_2 при таком же положении поршня высота камеры сгорания 5,28 мм.

В D_1 при нахождении поршня в 35° после ВМТ высота камеры сгорания 18.14 мм.

В D_2 при таком же положении поршня высота камеры сгорания 11,53 мм.

Т. е., в двигателе со степенью сжатия 25 при положении поршня в 35° ПКВ после ВМТ камера сгорания имеет такой же объем, какой имеет камера сгорания двигателя со степенью сжатия 10 при положении поршня в 15° ПКВ после ВМТ. Только, если во втором двигателе 15° является точкой возникновения и завершения Pz, то в первом двигателе точка 35° является точкой завершения линии Pz и началом линии расширения.

Из изложенного видно, что линия расширения жестко связана со степенью сжатия двигателя. По мере повышения степени сжатия в координатах цикла она смещается вправо, в зону больших углов и начинается позже.

Решение перечисленных вопросов приводит к тому, что между процессами в традиционном двигателе и между процессами, которые происходят в двигателе со сверхвысокой степенью сжатия, возникает большая разница. В частности, из-за ввода теплоты на такте сжатия в двигателе со степенью сжатия 9,9, работающем при полном наполнении с частотой 3200 об/мин в момент завершения сжатия температура смеси составляет, примерно, 900° С, давление сжатия, примерно 32 атм. В двигателе со степенью сжатия 22, при этих же параметрах соответственно: температура, примерно, 700° С, а давление сжатия, примерно, 52-54 атм. Эксперименты показывают, что давление в 52-54 атм и температура 700° С не являются предельными и могут быть увеличены еще не менее, чем в полтора раза.

7.2 Влияние и состояние температур

В ДВС со степенью сжатия 9,9:

На сжатии за 15° до ВМТ сформировался очаг пламени, начался ввод теплоты. В ВМТ давление 32 атм, температура 900° С. В 15° после ВМТ давление 56 атм., температура 2100° С. В 35° ПКВ после ВМТ, когда горение завершилось, давление 35 кг/см^2 , температура 2400° С.

В ДВС со степенью сжатия 25:

В ВМТ давление 60 атм. Температура 700° С. Сформировался очаг пла-

мени, начался ввод теплоты.

Суммарная тепловая нагруженность рабочего тела в ВМТ обоих двигателей примерно одинакова (там выше температура, а здесь давление). Но в первом случае ввод теплоты и распространение пламени по фронту начинается при давлении $15,5 \text{ кг/см}^2$, а во втором - при 60 кг/см^2 . В первом случае максимальное давление в 56 кг/см^2 достигается только в момент завершения распространения пламени, а во втором случае давление неизменно на весь период. Т.е. при одинаковой скорости распространения пламени по фронту во втором двигателе в среднем в один и тот же промежуток времени в процесс горения вовлекается, примерно, в два раза больше смеси. Это означает, что в первом двигателе распространение пламени по фронту происходит в течении 30° ПКВ (15° до ВМТ и 15° после ВМТ), а во втором двигателе в течении, примерно, 15° после ВМТ. Но скорость горения (если нет детонационного сгорания) тоже является величиной постоянной. Поэтому время горения смеси во втором двигателе по углам ПКВ будет равно времени горения смеси в первом двигателе. Расчетная температура в указанной точке, т.е. в 15° ПКВ после ВМТ составляет, примерно $1150-1200^\circ \text{ С}$, но и объем рабочего тела вдвое меньше. В 35° ПКВ после ВМТ давление 60 кг/см^2 , температура 2700° С . Объем камеры сгорания меньше в 1,57 раз. Дальше на линии расширения происходит догорание остатков еще не окислившихся молекул.

7.3 Технические проблемы

Чтобы уменьшить объем камеры сгорания приходится стачивать головку блока цилиндров на 3мм. Заводская толщина ее стенки составляет 9,2 мм. Остается всего 6 мм. Т.е. стенка головки блока цилиндров над поршнем сильно ослабляется. Уменьшение высоты головки блока цилиндров приводит к смещению фаз газораспределения почти на 10 градусов, что отрицательно влияет на работу двигателя. Есть еще много проблем, связанных непосредственно с блоком цилиндров, КШМ, поршнями и пр. К примеру, поршня заказываю в

МАМИ. Они выполняются без углубления на днище и на 40 грамм тяжелее, чем серийные.

Много проблем связано с системой зажигания. Серийные свечи зажигания рассчитаны на искрообразование при давлениях до 8 атм. Даже самые лучшие импортные свечи зажигания при проверке на стенде перестают давать искру при давлении 12 атм. В моем двигателе со степенью сжатия 22 при работе на внешней скоростной характеристике свеча должна давать искру при 50-60 атм., т.е. она должна работать в условиях в 5 раз превышающих ее физические возможности. Приходится переделывать свечи, уменьшать зазор до минимально возможных 0,25 мм (вместо 1,1 мм по стандарту), что, естественно, отрицательно сказывается на результатах работы двигателя. Для надежной работы двигателя нужны свечи, которые были бы рассчитаны на работу хотя бы при 70 атм.

Серийные катушки зажигания рассчитаны на работу с напряжением разряда не выше 12 к/вольт. Лучшие катушки БОШ могут выдать 25 к/вольт, но при такой нагрузке быстро выходят из строя. Нужны катушки способные обеспечить напряжение разряда 75-80 к/вольт. Свечи и катушки для своего двигателя я уже запатентовал.

Но самый слабый узел - это программа бортового компьютера Январь 5.1, которую я использую. Во-первых, программа сама по себе содержит много недостатков. Во-вторых, для моего двигателя нужна совершенно другая программа. Алгоритмы ее работы разработаны.

Последовательное соединение катушек дает возможность увеличить напряжение разряда до 50 К/вольт. При таком соединении двигатель показывает невероятную мощность, а автомобиль становится практически неуправляемым. Но сильный обратный сигнал разряда нарушает работу бортового компьютера. Тот через 30-60 секунд работы начинает выдавать какие попало углы зажигания до 127 градусов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе произведена расчетная оценка возможности использования и подходы к практической реализации рабочего процесса бензинового двигателя с повышенной степенью сжатия равной 18. Показаны преимущества и основные недостатки рассматриваемой концепции. По результатам работ были сделаны следующие основные выводы:

- спроектирован двигатель на базе двигателя ВАЗ 11186 и камера сгорания для реализации рабочего процесса при повышенной степени сжатия;
- проведены расчеты, показавшие работоспособность двигателя;
- эффективный КПД двигателя при использовании предложенной схемы подачи топлива по результатам расчета увеличивается в среднем на 15-25%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Колчин А. И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей : учеб. пособие для вузов / А. И. Колчин, В. П. Демидов. - Изд. 4-е, стер. ; Гриф МО. - Москва : Высш. шк., 2008. - 496 с. : ил. - Библиогр.: с. 493.
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. Кавтарадзе Р. З. Теория поршневых двигателей : спец. гл. : учеб. для студ. вузов, обучающихся по спец. "Двигатели внутреннего сгорания" / Р. З. Кавтарадзе. - Гриф УМО. - Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. - 719 с. : ил. - Библиогр.: с. 679-700. - Предм. указ.: с. 701-705. - Имен. указ.: с. 706-713.
5. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] /Д.Н. Вырубков, 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. Двигатели внутреннего сгорания : учеб. для вузов. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов / В. Н. Луканин [и др.] ; под ред. В. Н. Луканина [и др.]. - Изд. 3-е, перераб. и испр. - Москва : Высш. шк., 2007. - 479 с. : ил. - Библиогр.: с. 476
7. Вибе, И.И. Уточненный тепловой расчет двигателя [Текст] / И.И. Вибе// М. Машиностроение, 1971. - с.282
8. Бензиновый двигатель внутреннего сгорания со сверхвысокой степенью сжатия / Ибадуллаев Г.А. – Махачкала: ДГТУ, 2007.

9. «Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей». Москва. 1971 г. Издательство «Машиностроение». (МВТУ имени Н.Э.Баумана).
10. «Теплотехника». Москва, 2004 г. Издательство МГТУ имени Н.Э.Баумана.
11. А.Н.Воинов. «Сгорание в быстроходных поршневых двигателях». Москва, 1977 г. Издательство «Машиностроение».
12. И.М. Ленин. «Автомобильные и тракторные двигатели». Часть 1 и 2. Москва 1976 г. Издательство «Высшая школа».
13. «Двигатели внутреннего сгорания», том 1, «Теория рабочих процессов». Москва 2005 г. Издательство «Высшая школа». МАДИ (ГТУ).
14. Проф. Д.Д. Брозе. «Сгорание в поршневых двигателях». Москва 1969 г. Издательство «Машиностроение».
15. В.И.Сороко-Новицкий, доц. В.А.Петров. «Двигатели внутреннего сгорания», том 1, «Теория легких двигателей». Москва 1938 г. Издательство «ОНТИ-НКТП-СССР».
16. «Сборник научных трудов по материалам Международной конференции Двигатель-2007, посвященной 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э.Баумана». Москва. 2007 г. Издательство МГТУ имени Н.Э.Баумана.
17. И.П. Базаров. «Термодинамика», Москва. 1961 г. Государственное издательство физико-математической литературы.
18. К.В.Рыжков. «Сто великих изобретений». Москва 2001 г.. Издательство «Вече». Nlootat G., et al, “A Model for Converting SI Engine Flame Arrival Signals into Flame Contours”, SAE, SP 1099, №950109, стр. 99-110, 1999.
19. Khalighi B., et al, “ Computation and Measurement of Flow and Combustion in a Four-Valve Engine with Intake Variations”, SAE, SP 1101, №950287, стр. 147-179, 2001.
20. Jones P., et al, “Full Cycle Computational Fluid Dynamics Calculations in a Motored Four Valve Pent Roof Combustion Chamber and Comparison with Experiment”, SAE, SP 1101, №950286, 131-146, 2001.

21. Наканиши К., и др, “Разработка новой системы впуска для четырёхклапанного двигателя, работающего на бедных смесях”, SAE, SP 1097, №95050, стр. 25-43, 1997.
22. Хашимото Н., и др, “Разработка низкотоксичной, высокоэффективной камеры сгорания для высокомоощного четырехклапанного двигателя”, SAE, SP 1098, №95068, стр. 347-365, 1998.
23. Аносов Ю.М. “Основы отраслевых технологий и организации производства”. С-П., Политехника, 2002.
24. Каргин, С.А. Теоретическое обоснование и экспериментальное исследование рабочего процесса судового ДВС с комбинированным смесеобразованием и принудительным воспламенением : канд. техн. наук : 05.08.05 / Каргин Сергей Александрович. – Астрахань, 2006. – 177 с.
25. Каменев, В.Ф. Научные основы и пути совершенствования токсических характеристик автомобильных двигателей с искровым зажиганием: Дисс. . докт.техн.наук: 05.04.02 ГНЦ НАМИ / Каменев Владимир Федорович. - Москва, 1996. - 454 с.
26. Кутенёв, В.Ф. Комплексное решение проблем снижения выбросов вредных веществ и расхода топлива автомобильными двигателями. Автореф. дисс. докт. техн. наук. 05.04.02 / Кутенёв Вадим Федорович. - М.: МАМИ. - 1990. - 45 с.
27. Машиностроение. Энциклопедия : в 40 т. / гл. ред. К.В. Фролов (пред.) и др.-М.: Машиностроение, 2013. - Т. IV: Двигатели внутреннего сгорания.-784с.
28. Семенов, Е.С. Исследование турбулентности в цилиндре поршневого двигателя / Е.С. Семенов, А.С. Соколик // Известия АН СССР. – 1958. - № 8. - С. 130-140.
29. Стечкин, Б.С. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя / Б.С. Стечкин, К.И. Генкин, В.С. Золотаревский. – М.: АН СССР, 1960. – 200 с.
30. Рахимов, Р.Р. Улучшение показателей двигателей с искровым зажиганием путем интенсификации сгорания бедных смесей: автореферат дис. ... кандидата технических наук / Р. Р. Рахимов. - Волгоград: ВолГТУ, 1999.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$

| ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------|----------|---------------|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|---------|------------------|---------|--------|-------------|----------|
| θ | ϕ | α | ε | μ | P_u | T_u | V_a | ζ | E_2 | γ | λ | μ | | | | | |
| 12 | 48 | 1 | 18 | 1,05243 | 3,524691 | 884,1305 | 0,9986 | 0,86 | 83,67027 | 0,020126 | 0,2933884 | 3 | | | | | |
| Расчёт процесса сгорания | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ϕ | ϕ_1 | $V_{ст}$ | σ | $\psi(\phi_1)$ | X1-2 | Tпред | T1 | T2 | T2истина | T1-2 | k1-2 | K1-2 | ΔX_{1-2} | P | μ | μ_{1-2} | X |
| 0 | -12 | 0,06878 | 0,02820 | 1,23970 | 0,00000 | 884,1305 | 884,1305 | 893,7667 | 884,1305 | 888,9486 | | | 0,00000 | 3,52469 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | -11 | 0,06666 | 0,02372 | 1,20160 | 0,00001 | 893,7667 | 893,7667 | 903,1104 | 893,7696 | 898,4386 | 1,34528 | 6,79238 | 0,00002 | 3,67608 | 1 | 1 | 1,3E-06 |
| 2 | -10 | 0,06473 | 0,01962 | 1,16676 | 0,00004 | 903,1104 | 903,1104 | 912,3136 | 903,1224 | 907,712 | 1,34437 | 6,80773 | 0,00008 | 3,82548 | 1 | 1 | 2,08E-05 |
| 3 | -9 | 0,06298 | 0,01590 | 1,13518 | 0,00011 | 912,3136 | 912,3136 | 921,6159 | 912,3387 | 916,9648 | 1,34349 | 6,82253 | 0,00023 | 3,97203 | 1 | 1 | 0,000105 |
| 4 | -8 | 0,06141 | 0,01257 | 1,10688 | 0,00024 | 921,6159 | 921,6159 | 931,3406 | 921,6558 | 926,4783 | 1,34264 | 6,83710 | 0,00048 | 4,11521 | 1 | 1 | 0,000333 |
| 5 | -7 | 0,06002 | 0,00963 | 1,08188 | 0,00044 | 931,3406 | 931,3406 | 941,8949 | 931,397 | 936,6178 | 1,34177 | 6,85191 | 0,00087 | 4,25488 | 1 | 1 | 0,000813 |
| 6 | -6 | 0,05882 | 0,00708 | 1,06019 | 0,00072 | 941,8949 | 941,8949 | 953,7668 | 941,9707 | 947,8309 | 1,34086 | 6,86750 | 0,00143 | 4,39138 | 1,0001 | 1,0001 | 0,001685 |
| 7 | -5 | 0,05780 | 0,00492 | 1,04182 | 0,00110 | 953,7668 | 953,7668 | 967,517 | 953,8659 | 960,6419 | 1,33988 | 6,88450 | 0,00220 | 4,52552 | 1,0002 | 1,0001 | 0,00312 |
| 8 | -4 | 0,05696 | 0,00315 | 1,02677 | 0,00159 | 967,517 | 967,517 | 983,7692 | 967,645 | 975,6431 | 1,33878 | 6,90360 | 0,00319 | 4,65860 | 1,0003 | 1,0002 | 0,005316 |
| 9 | -3 | 0,05631 | 0,00177 | 1,01506 | 0,00221 | 983,7692 | 983,7692 | 1003,194 | 983,9334 | 993,4817 | 1,33752 | 6,92552 | 0,00443 | 4,79232 | 1,0004 | 1,0004 | 0,008502 |
| 10 | -2 | 0,05585 | 0,00079 | 1,00670 | 0,00297 | 1003,194 | 1003,194 | 1026,491 | 1003,404 | 1014,842 | 1,33608 | 6,95096 | 0,00594 | 4,92874 | 1,0007 | 1,0006 | 0,012929 |
| 11 | -1 | 0,05557 | 0,00020 | 1,00167 | 0,00388 | 1026,491 | 1026,491 | 1054,36 | 1026,759 | 1040,425 | 1,33442 | 6,98054 | 0,00775 | 5,07010 | 1,001 | 1,0008 | 0,018872 |
| 12 | 0 | 0,05548 | 0,00000 | 1,00000 | 0,00493 | 1054,36 | 1054,36 | 1087,481 | 1054,702 | 1070,921 | 1,33252 | 7,01476 | 0,00986 | 5,21863 | 1,0014 | 1,0012 | 0,026624 |
| 13 | 1 | 0,05557 | 0,00020 | 1,00167 | 0,00614 | 1087,481 | 1087,481 | 1126,474 | 1087,912 | 1106,978 | 1,33037 | 7,05389 | 0,01228 | 5,37639 | 1,0019 | 1,0016 | 0,036485 |
| 14 | 2 | 0,05585 | 0,00079 | 1,00670 | 0,00750 | 1126,474 | 1126,474 | 1171,873 | 1127,015 | 1149,173 | 1,32798 | 7,09799 | 0,01499 | 5,54499 | 1,0025 | 1,0022 | 0,048763 |
| 15 | 3 | 0,05631 | 0,00177 | 1,01506 | 0,00900 | 1171,873 | 1171,873 | 1224,088 | 1172,543 | 1197,98 | 1,32537 | 7,14684 | 0,01799 | 5,72544 | 1,0033 | 1,0029 | 0,063757 |
| 16 | 4 | 0,05696 | 0,00315 | 1,02677 | 0,01062 | 1224,088 | 1224,088 | 1283,378 | 1224,907 | 1253,733 | 1,32258 | 7,19994 | 0,02124 | 5,91792 | 1,0042 | 1,0037 | 0,081748 |
| 17 | 5 | 0,05780 | 0,00492 | 1,04182 | 0,01235 | 1283,378 | 1283,378 | 1349,818 | 1284,363 | 1316,598 | 1,31966 | 7,25656 | 0,02470 | 6,12171 | 1,0053 | 1,0047 | 0,10299 |
| 18 | 6 | 0,05882 | 0,00708 | 1,06019 | 0,01415 | 1349,818 | 1349,818 | 1423,275 | 1350,983 | 1386,546 | 1,31667 | 7,31576 | 0,02830 | 6,33509 | 1,0066 | 1,0059 | 0,127688 |
| 19 | 7 | 0,06002 | 0,00963 | 1,08188 | 0,01599 | 1423,275 | 1423,275 | 1503,389 | 1424,631 | 1463,332 | 1,31365 | 7,37648 | 0,03198 | 6,55536 | 1,008 | 1,0073 | 0,15599 |
| 20 | 8 | 0,06141 | 0,01257 | 1,10688 | 0,01782 | 1503,389 | 1503,389 | 1589,561 | 1504,941 | 1546,475 | 1,31067 | 7,43762 | 0,03563 | 6,77890 | 1,0097 | 1,0088 | 0,187966 |
| 21 | 9 | 0,06298 | 0,01590 | 1,13518 | 0,01958 | 1589,561 | 1589,561 | 1680,948 | 1591,308 | 1635,255 | 1,30778 | 7,49811 | 0,03916 | 7,00130 | 1,0115 | 1,0106 | 0,223597 |
| 22 | 10 | 0,06473 | 0,01962 | 1,16676 | 0,02123 | 1680,948 | 1680,948 | 1776,469 | 1682,884 | 1728,708 | 1,30502 | 7,55694 | 0,04246 | 7,21752 | 1,0135 | 1,0125 | 0,262762 |
| 23 | 11 | 0,06666 | 0,02372 | 1,20160 | 0,02270 | 1776,469 | 1776,469 | 1874,826 | 1778,584 | 1825,647 | 1,30242 | 7,61326 | 0,04540 | 7,42210 | 1,0157 | 1,0146 | 0,305224 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|--------|--------|----------|
| 24 | 12 | 0,06878 | 0,02820 | 1,23970 | 0,02394 | 1874,826 | 1874,826 | 1974,536 | 1877,107 | 1924,681 | 1,30002 | 7,66633 | 0,04787 | 7,60944 | 1,018 | 1,0169 | 0,350628 |
| 25 | 13 | 0,07107 | 0,03306 | 1,28102 | 0,02488 | 1974,536 | 1974,536 | 2073,977 | 1976,966 | 2024,257 | 1,29781 | 7,71561 | 0,04976 | 7,77400 | 1,0205 | 1,0193 | 0,398502 |
| 26 | 14 | 0,07354 | 0,03830 | 1,32555 | 0,02548 | 2073,977 | 2073,977 | 2171,441 | 2076,538 | 2122,709 | 1,29583 | 7,76069 | 0,05096 | 7,91063 | 1,023 | 1,0218 | 0,448259 |
| 27 | 15 | 0,07619 | 0,04392 | 1,37328 | 0,02570 | 2171,441 | 2171,441 | 2265,209 | 2174,114 | 2218,325 | 1,29406 | 7,80131 | 0,05140 | 8,01478 | 1,0257 | 1,0243 | 0,499216 |
| 28 | 16 | 0,07901 | 0,04990 | 1,42417 | 0,02551 | 2265,209 | 2265,209 | 2353,621 | 2267,975 | 2309,415 | 1,29251 | 7,83735 | 0,05103 | 8,08275 | 1,0283 | 1,027 | 0,550613 |
| 29 | 17 | 0,08201 | 0,05626 | 1,47819 | 0,02492 | 2353,621 | 2353,621 | 2435,153 | 2356,461 | 2394,387 | 1,29117 | 7,86880 | 0,04984 | 8,11190 | 1,0309 | 1,0296 | 0,601643 |
| 30 | 18 | 0,08518 | 0,06298 | 1,53533 | 0,02393 | 2435,153 | 2435,153 | 2508,491 | 2438,051 | 2471,822 | 1,29003 | 7,89574 | 0,04786 | 8,10075 | 1,0335 | 1,0322 | 0,651486 |
| 31 | 19 | 0,08852 | 0,07007 | 1,59556 | 0,02258 | 2508,491 | 2508,491 | 2572,593 | 2511,43 | 2540,542 | 1,28909 | 7,91833 | 0,04515 | 8,04912 | 1,0359 | 1,0347 | 0,699349 |
| 32 | 20 | 0,09203 | 0,07751 | 1,65884 | 0,02091 | 2572,593 | 2572,593 | 2626,736 | 2575,557 | 2599,664 | 1,28832 | 7,93680 | 0,04182 | 7,95809 | 1,0383 | 1,0371 | 0,744503 |
| 33 | 21 | 0,09571 | 0,08531 | 1,72515 | 0,01899 | 2626,736 | 2626,736 | 2670,547 | 2629,713 | 2648,641 | 1,28771 | 7,95143 | 0,03799 | 7,82996 | 1,0404 | 1,0393 | 0,78632 |
| 34 | 22 | 0,09955 | 0,09346 | 1,79445 | 0,01691 | 2670,547 | 2670,547 | 2704,01 | 2673,527 | 2687,278 | 1,28725 | 7,96253 | 0,03382 | 7,66810 | 1,0424 | 1,0414 | 0,824306 |
| 35 | 23 | 0,10356 | 0,10197 | 1,86670 | 0,01474 | 2704,01 | 2704,01 | 2727,445 | 2706,981 | 2715,728 | 1,28693 | 7,97044 | 0,02948 | 7,47674 | 1,0441 | 1,0432 | 0,858125 |
| 36 | 24 | 0,10773 | 0,11081 | 1,94188 | 0,01257 | 2727,445 | 2727,445 | 2741,475 | 2730,4 | 2734,46 | 1,28672 | 7,97550 | 0,02514 | 7,26076 | 1,0456 | 1,0449 | 0,887605 |
| 37 | 25 | 0,11206 | 0,11999 | 2,01995 | 0,01047 | 2741,475 | 2741,475 | 2746,962 | 2744,406 | 2744,219 | 1,28661 | 7,97808 | 0,02095 | 7,02538 | 1,0469 | 1,0463 | 0,912743 |
| 38 | 26 | 0,11655 | 0,12951 | 2,10087 | 0,00852 | 2746,962 | 2746,962 | 2744,945 | 2749,864 | 2745,954 | 1,28659 | 7,97852 | 0,01704 | 6,77589 | 1,048 | 1,0475 | 0,933692 |
| 39 | 27 | 0,12120 | 0,13936 | 2,18459 | 0,00676 | 2744,945 | 2744,945 | 2736,558 | 2747,812 | 2740,751 | 1,28665 | 7,97716 | 0,01352 | 6,51741 | 1,0489 | 1,0484 | 0,950735 |
| 40 | 28 | 0,12600 | 0,14954 | 2,27108 | 0,00523 | 2736,558 | 2736,558 | 2722,961 | 2739,386 | 2729,76 | 1,28677 | 7,97431 | 0,01045 | 6,25466 | 1,0496 | 1,0492 | 0,964257 |
| 41 | 29 | 0,13094 | 0,16004 | 2,36030 | 0,00393 | 2722,961 | 2722,961 | 2705,274 | 2725,748 | 2714,118 | 1,286934 | 7,97026 | 0,00786 | 5,99179 | 1,0501 | 1,0498 | 0,974707 |
| 42 | 30 | 0,13604 | 0,17085 | 2,45220 | 0,00287 | 2705,274 | 2705,274 | 2684,521 | 2708,017 | 2694,897 | 1,28714 | 7,96525 | 0,00574 | 5,73228 | 1,0505 | 1,0503 | 0,982566 |
| 43 | 31 | 0,14129 | 0,18197 | 2,54675 | 0,00204 | 2684,521 | 2684,521 | 2661,6 | 2687,219 | 2673,06 | 1,287376 | 7,95952 | 0,00407 | 5,47892 | 1,0508 | 1,0506 | 0,98831 |
| 44 | 32 | 0,14668 | 0,19340 | 2,64388 | 0,00140 | 2661,6 | 2661,6 | 2637,259 | 2664,252 | 2649,43 | 1,287635 | 7,95325 | 0,00280 | 5,23378 | 1,051 | 1,0509 | 0,992384 |
| 45 | 33 | 0,15221 | 0,20512 | 2,74356 | 0,00093 | 2637,259 | 2637,259 | 2612,098 | 2639,866 | 2624,679 | 1,287911 | 7,94660 | 0,00187 | 4,99830 | 1,0512 | 1,0511 | 0,995186 |
| 46 | 34 | 0,15788 | 0,21715 | 2,84574 | 0,00060 | 2612,098 | 2612,098 | 2586,573 | 2614,658 | 2599,336 | 1,288198 | 7,93968 | 0,00120 | 4,77336 | 1,0512 | 1,0512 | 0,997052 |
| 47 | 35 | 0,16368 | 0,22946 | 2,95037 | 0,00037 | 2586,573 | 2586,573 | 2561,017 | 2589,087 | 2573,795 | 1,288492 | 7,93260 | 0,00075 | 4,55939 | 1,0513 | 1,0513 | 0,998253 |
| 48 | 36 | 0,16962 | 0,24205 | 3,05740 | 0,00022 | 2561,017 | 2561,017 | 2535,662 | 2563,486 | 2548,339 | 1,288791 | 7,92542 | 0,00045 | 4,35648 | 1,0513 | 1,0513 | 0,999 |

Таблица А2 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 850 \text{ мин}^{-1}$

| ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|----------|---------------|--------------|--------|----------|--------|---------|----------|----------|-----------|-------|-------|---|---|------|---|
| θ | ϕ | α | ε | μ | P_y | T_y | V_a | ζ | E_2 | γ | λ | μ | | | | | |
| 8 | 40 | 0,96 | 18 | 1,0631 | 4,3068 | 929,3536 | 0,9603 | 0,7643 | 80,0552 | 0,0237 | 0,2934 | 3,2 | | | | | |
| Расчёт процесса сгорания | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| f | f1 | Vст | s | $\gamma(f1)$ | X1-2 | Tпред | T1 | T2 | T2истина | T1-2 | k1-2 | K1-2 | DX1-2 | P | m | m1-2 | X |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|---------|--------|--------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|
| 0 | -8 | 0,05905 | 0,0126 | 1,1069 | 6,5E-07 | 929,3536 | 929,3536 | 936,6868 | 929,3536 | 933,0202 | | | 1,3E-06 | 4,30677 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | -7 | 0,05772 | 0,0096 | 1,0819 | 1,1E-05 | 936,6868 | 936,6868 | 943,4539 | 936,687 | 940,0704 | 1,3412 | 6,8616 | 2,2E-05 | 4,44106 | 1 | 1 | 1,3E-06 |
| 2 | -6 | 0,05656 | 0,0071 | 1,0602 | 5,3E-05 | 943,4539 | 943,4539 | 949,8873 | 943,4547 | 946,6706 | 1,3406 | 6,8722 | 0,00011 | 4,56468 | 1 | 1 | 2,4E-05 |
| 3 | -5 | 0,05558 | 0,0049 | 1,0418 | 0,00015 | 949,8873 | 949,8873 | 956,3716 | 949,8892 | 953,1295 | 1,34 | 6,8821 | 0,00031 | 4,67688 | 1 | 1 | 0,00013 |
| 4 | -4 | 0,05478 | 0,0031 | 1,0268 | 0,00034 | 956,3716 | 956,3716 | 963,4508 | 956,3752 | 959,9112 | 1,3395 | 6,8917 | 0,00068 | 4,77787 | 1 | 1 | 0,00044 |
| 5 | -3 | 0,05415 | 0,0018 | 1,0151 | 0,00064 | 963,4508 | 963,4508 | 971,8289 | 963,4568 | 967,6398 | 1,3389 | 6,9018 | 0,00128 | 4,86891 | 1,0001 | 1 | 0,00111 |
| 6 | -2 | 0,05371 | 0,0008 | 1,0067 | 0,00109 | 971,8289 | 971,8289 | 982,365 | 971,8386 | 977,0969 | 1,3382 | 6,9133 | 0,00217 | 4,95239 | 1,0001 | 1,0001 | 0,00239 |
| 7 | -1 | 0,05344 | 0,0002 | 1,0017 | 0,00171 | 982,365 | 982,365 | 996,0567 | 982,3802 | 989,2108 | 1,3374 | 6,9272 | 0,00342 | 5,03175 | 1,0003 | 1,0002 | 0,00456 |
| 8 | 0 | 0,05335 | 0 | 1 | 0,00254 | 996,0567 | 996,0567 | 1014,014 | 996,0809 | 1005,035 | 1,3364 | 6,9447 | 0,00507 | 5,11135 | 1,0005 | 1,0004 | 0,00798 |
| 9 | 1 | 0,05344 | 0,0002 | 1,0017 | 0,0036 | 1014,014 | 1014,014 | 1037,418 | 1014,053 | 1025,716 | 1,3352 | 6,9671 | 0,00719 | 5,19623 | 1,0008 | 1,0006 | 0,01305 |
| 10 | 2 | 0,05371 | 0,0008 | 1,0067 | 0,00491 | 1037,418 | 1037,418 | 1067,468 | 1037,479 | 1052,443 | 1,3336 | 6,9955 | 0,00981 | 5,29174 | 1,0012 | 1,001 | 0,02024 |
| 11 | 3 | 0,05415 | 0,0018 | 1,0151 | 0,00649 | 1067,468 | 1067,468 | 1105,309 | 1067,562 | 1086,388 | 1,3316 | 7,031 | 0,01297 | 5,40312 | 1,0019 | 1,0016 | 0,03006 |
| 12 | 4 | 0,05478 | 0,0031 | 1,0268 | 0,00834 | 1105,309 | 1105,309 | 1151,961 | 1105,451 | 1128,635 | 1,3293 | 7,0741 | 0,01667 | 5,53496 | 1,0027 | 1,0023 | 0,04303 |
| 13 | 5 | 0,05558 | 0,0049 | 1,0418 | 0,01045 | 1151,961 | 1151,961 | 1208,232 | 1152,17 | 1180,097 | 1,3265 | 7,1248 | 0,0209 | 5,69076 | 1,0037 | 1,0032 | 0,0597 |
| 14 | 6 | 0,05656 | 0,0071 | 1,0602 | 0,0128 | 1208,232 | 1208,232 | 1274,633 | 1208,527 | 1241,433 | 1,3235 | 7,1827 | 0,0256 | 5,87244 | 1,005 | 1,0043 | 0,0806 |
| 15 | 7 | 0,05772 | 0,0096 | 1,0819 | 0,01535 | 1274,633 | 1274,633 | 1351,306 | 1275,035 | 1312,97 | 1,3202 | 7,2467 | 0,03071 | 6,08006 | 1,0065 | 1,0058 | 0,1062 |
| 16 | 8 | 0,05905 | 0,0126 | 1,1069 | 0,01804 | 1351,306 | 1351,306 | 1437,948 | 1351,832 | 1394,627 | 1,3167 | 7,3152 | 0,03607 | 6,31154 | 1,0084 | 1,0075 | 0,13691 |
| 17 | 9 | 0,06056 | 0,0159 | 1,1352 | 0,02077 | 1437,948 | 1437,948 | 1533,771 | 1438,613 | 1485,859 | 1,3132 | 7,3864 | 0,04154 | 6,56267 | 1,0107 | 1,0096 | 0,17298 |
| 18 | 10 | 0,06225 | 0,0196 | 1,1668 | 0,02345 | 1533,771 | 1533,771 | 1637,466 | 1534,582 | 1585,618 | 1,3097 | 7,4583 | 0,04689 | 6,82713 | 1,0132 | 1,0119 | 0,21452 |
| 19 | 11 | 0,06411 | 0,0237 | 1,2016 | 0,02594 | 1637,466 | 1637,466 | 1747,217 | 1638,426 | 1692,341 | 1,3063 | 7,5289 | 0,05189 | 7,0968 | 1,0161 | 1,0147 | 0,26141 |
| 20 | 12 | 0,06614 | 0,0282 | 1,2397 | 0,02813 | 1747,217 | 1747,217 | 1860,737 | 1748,321 | 1803,977 | 1,3032 | 7,5965 | 0,05626 | 7,36213 | 1,0193 | 1,0177 | 0,3133 |
| 21 | 13 | 0,06834 | 0,0331 | 1,281 | 0,02987 | 1860,737 | 1860,737 | 1975,361 | 1861,976 | 1918,049 | 1,3003 | 7,6597 | 0,05974 | 7,61265 | 1,0228 | 1,021 | 0,36956 |
| 22 | 14 | 0,07072 | 0,0383 | 1,3256 | 0,03103 | 1975,361 | 1975,361 | 2088,172 | 1976,722 | 2031,767 | 1,2977 | 7,7174 | 0,06206 | 7,8376 | 1,0265 | 1,0246 | 0,4293 |
| 23 | 15 | 0,07326 | 0,0439 | 1,3733 | 0,03152 | 2088,172 | 2088,172 | 2196,173 | 2089,639 | 2142,173 | 1,2955 | 7,7687 | 0,06304 | 8,02669 | 1,0303 | 1,0284 | 0,49136 |
| 24 | 16 | 0,07598 | 0,0499 | 1,4242 | 0,03126 | 2196,173 | 2196,173 | 2296,477 | 2197,727 | 2246,325 | 1,2935 | 7,8134 | 0,06252 | 8,17075 | 1,0342 | 1,0322 | 0,5544 |
| 25 | 17 | 0,07886 | 0,0563 | 1,4782 | 0,03024 | 2296,477 | 2296,477 | 2386,515 | 2298,102 | 2341,496 | 1,2919 | 7,8512 | 0,06048 | 8,2625 | 1,038 | 1,0361 | 0,61692 |
| 26 | 18 | 0,08191 | 0,063 | 1,5353 | 0,02849 | 2386,515 | 2386,515 | 2464,222 | 2388,194 | 2425,369 | 1,2906 | 7,8822 | 0,05697 | 8,2971 | 1,0418 | 1,0399 | 0,6774 |
| 27 | 19 | 0,08512 | 0,0701 | 1,5956 | 0,0261 | 2464,222 | 2464,222 | 2528,188 | 2465,939 | 2496,205 | 1,2896 | 7,9069 | 0,05219 | 8,27252 | 1,0453 | 1,0435 | 0,73437 |
| 28 | 20 | 0,0885 | 0,0775 | 1,6588 | 0,02321 | 2528,188 | 2528,188 | 2577,747 | 2529,928 | 2552,967 | 1,2888 | 7,9255 | 0,04642 | 8,18974 | 1,0485 | 1,0469 | 0,78656 |
| 29 | 21 | 0,09204 | 0,0853 | 1,7251 | 0,02001 | 2577,747 | 2577,747 | 2612,998 | 2579,499 | 2595,373 | 1,2882 | 7,9388 | 0,04001 | 8,05257 | 1,0513 | 1,0499 | 0,83298 |
| 30 | 22 | 0,09573 | 0,0935 | 1,7944 | 0,01668 | 2612,998 | 2612,998 | 2634,744 | 2614,751 | 2623,871 | 1,2879 | 7,9474 | 0,03336 | 7,8673 | 1,0538 | 1,0526 | 0,87299 |
| 31 | 23 | 0,09959 | 0,102 | 1,8667 | 0,01342 | 2634,744 | 2634,744 | 2644,362 | 2636,489 | 2639,553 | 1,2877 | 7,952 | 0,02685 | 7,64202 | 1,0559 | 1,0548 | 0,90635 |
| 32 | 24 | 0,1036 | 0,1108 | 1,9419 | 0,01041 | 2644,362 | 2644,362 | 2643,627 | 2646,093 | 2643,995 | 1,2876 | 7,9532 | 0,02081 | 7,38589 | 1,0575 | 1,0567 | 0,9332 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|---------|--------|--------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|
| 33 | 25 | 0,10776 | 0,12 | 2,02 | 0,00775 | 2643,627 | 2643,627 | 2634,509 | 2645,338 | 2639,068 | 1,2877 | 7,9518 | 0,01551 | 7,10828 | 1,0588 | 1,0582 | 0,95401 |
| 34 | 26 | 0,11208 | 0,1295 | 2,1009 | 0,00554 | 2634,509 | 2634,509 | 2618,977 | 2636,195 | 2626,743 | 1,2878 | 7,9483 | 0,01108 | 6,81809 | 1,0598 | 1,0593 | 0,96952 |
| 35 | 27 | 0,11655 | 0,1394 | 2,1846 | 0,00379 | 2618,977 | 2618,977 | 2598,842 | 2620,636 | 2608,909 | 1,288 | 7,9433 | 0,00758 | 6,52313 | 1,0604 | 1,0601 | 0,9806 |
| 36 | 28 | 0,12116 | 0,1495 | 2,2711 | 0,00247 | 2598,842 | 2598,842 | 2575,644 | 2600,47 | 2587,243 | 1,2883 | 7,9372 | 0,00494 | 6,22979 | 1,0609 | 1,0607 | 0,98818 |
| 37 | 29 | 0,12592 | 0,16 | 2,3603 | 0,00153 | 2575,644 | 2575,644 | 2550,607 | 2577,242 | 2563,125 | 1,2886 | 7,9304 | 0,00307 | 5,94293 | 1,0612 | 1,0611 | 0,99312 |
| 38 | 30 | 0,13083 | 0,1708 | 2,4522 | 0,0009 | 2550,607 | 2550,607 | 2524,632 | 2552,173 | 2537,62 | 1,2889 | 7,9231 | 0,00181 | 5,66588 | 1,0614 | 1,0613 | 0,99619 |
| 39 | 31 | 0,13587 | 0,182 | 2,5467 | 0,0005 | 2524,632 | 2524,632 | 2498,343 | 2526,166 | 2511,488 | 1,2892 | 7,9155 | 0,00101 | 5,40072 | 1,0615 | 1,0615 | 0,99799 |
| 40 | 32 | 0,14105 | 0,1934 | 2,6439 | 0,00026 | 2498,343 | 2498,343 | 2472,138 | 2499,845 | 2485,24 | 1,2895 | 7,9078 | 0,00053 | 5,14851 | 1,0616 | 1,0615 | 0,999 |

Таблица А3 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 3200 \text{ мин}^{-1}$

| ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|----------|---------------|----------|---------|------------|----------|----------|---------------|----------|-----------|---------|------------|---------|---------|-----------|---------|
| θ | ϕ | α | ε | μ | P_y | T_y | V_a | ζ | E_2 | γ | λ | μ | | | | | |
| 16 | 55 | 1 | 18 | 1,0524 | 2,8119 | 834,804 | 1,0288 | 0,96 | 90,7829 | 0,0187 | 0,2934 | 3,4 | | | | | |
| Расчёт процесса сгорания | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| f | f_1 | $V_{ст}$ | s | $y(f_1)$ | X1-2 | $T_{пред}$ | T_1 | T_2 | $T_{2истина}$ | T_1-2 | k_1-2 | K_1-2 | D_{X1-2} | P | m | m_{1-2} | X |
| 0 | -16 | 0,0814 | 0,0499 | 1,4242 | 7,6E-08 | 834,8004 | 834,8004 | 845,5221 | 834,8004 | 840,1612 | | | 1,52E-07 | 2,81192 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | -15 | 0,0785 | 0,0439 | 1,3733 | 1,5E-06 | 845,5221 | 845,5221 | 856,0828 | 845,5225 | 850,8024 | 1,35029 | 6,70952 | 3,06E-06 | 2,95358 | 1 | 1 | 1,5E-07 |
| 2 | -14 | 0,0758 | 0,0383 | 1,3256 | 7,9E-06 | 856,0828 | 856,0828 | 866,4867 | 856,085 | 861,2848 | 1,34915 | 6,7282 | 1,59E-05 | 3,09814 | 1 | 1 | 3,2E-06 |
| 3 | -13 | 0,0732 | 0,0331 | 1,281 | 2,4E-05 | 866,4867 | 866,4867 | 876,7718 | 866,4924 | 871,6293 | 1,34805 | 6,74627 | 4,86E-05 | 3,24482 | 1 | 1 | 1,9E-05 |
| 4 | -12 | 0,0709 | 0,0282 | 1,2397 | 5,7E-05 | 876,7718 | 876,7718 | 887,0147 | 876,7825 | 881,8933 | 1,34699 | 6,76379 | 0,000113 | 3,39281 | 1 | 1 | 6,8E-05 |
| 5 | -11 | 0,0687 | 0,0237 | 1,2016 | 0,00011 | 887,0147 | 887,0147 | 897,3344 | 887,032 | 892,1746 | 1,34597 | 6,78089 | 0,000222 | 3,5413 | 1,00001 | 1,00001 | 0,00018 |
| 6 | -10 | 0,0667 | 0,0196 | 1,1668 | 0,0002 | 897,3344 | 897,3344 | 907,8963 | 897,3601 | 902,6153 | 1,34496 | 6,79775 | 0,000391 | 3,68956 | 1,00002 | 1,00002 | 0,0004 |
| 7 | -9 | 0,0649 | 0,0159 | 1,1352 | 0,00032 | 907,8963 | 907,8963 | 918,9143 | 907,932 | 913,4053 | 1,34396 | 6,81459 | 0,000635 | 3,83693 | 1,00004 | 1,00003 | 0,00079 |
| 8 | -8 | 0,0633 | 0,0126 | 1,1069 | 0,00048 | 918,9143 | 918,9143 | 930,6534 | 918,9622 | 924,7839 | 1,34295 | 6,83173 | 0,000969 | 3,98293 | 1,00007 | 1,00006 | 0,00143 |
| 9 | -7 | 0,0618 | 0,0096 | 1,0819 | 0,00071 | 930,6534 | 930,6534 | 943,4296 | 930,7159 | 937,0415 | 1,34191 | 6,84951 | 0,001412 | 4,12725 | 1,00012 | 1,0001 | 0,0024 |
| 10 | -6 | 0,0606 | 0,0071 | 1,0602 | 0,00099 | 943,4296 | 943,4296 | 957,6095 | 943,5099 | 950,5196 | 1,34081 | 6,86833 | 0,001979 | 4,26986 | 1,0002 | 1,00016 | 0,00381 |
| 11 | -5 | 0,0595 | 0,0049 | 1,0418 | 0,00134 | 957,6095 | 957,6095 | 973,607 | 957,7117 | 965,6082 | 1,33964 | 6,88864 | 0,002689 | 4,41094 | 1,0003 | 1,00025 | 0,00579 |
| 12 | -4 | 0,0587 | 0,0031 | 1,0268 | 0,00178 | 973,607 | 973,607 | 991,8781 | 973,7361 | 982,7425 | 1,33836 | 6,9109 | 0,003558 | 4,55101 | 1,00044 | 1,00037 | 0,00848 |
| 13 | -3 | 0,058 | 0,0018 | 1,0151 | 0,0023 | 991,8781 | 991,8781 | 1012,914 | 992,0408 | 1002,396 | 1,33695 | 6,93557 | 0,004601 | 4,6908 | 1,00062 | 1,00053 | 0,01204 |
| 14 | -2 | 0,0575 | 0,0008 | 1,0067 | 0,00292 | 1012,914 | 1012,914 | 1037,228 | 1013,118 | 1025,071 | 1,3354 | 6,9631 | 0,005834 | 4,83129 | 1,00086 | 1,00074 | 0,01664 |
| 15 | -1 | 0,0573 | 0,0002 | 1,0017 | 0,00363 | 1037,228 | 1037,228 | 1065,346 | 1037,483 | 1051,287 | 1,33367 | 6,99388 | 0,007269 | 4,97362 | 1,00116 | 1,00101 | 0,02247 |
| 16 | 0 | 0,0572 | 0 | 1 | 0,00446 | 1065,346 | 1065,346 | 1097,788 | 1065,665 | 1081,567 | 1,33177 | 7,02821 | 0,008914 | 5,119 | 1,00153 | 1,00134 | 0,02974 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|--------|--------|--------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| 17 | 1 | 0,0573 | 0,0002 | 1,0017 | 0,00539 | 1097,788 | 1097,788 | 1135,051 | 1098,183 | 1116,42 | 1,32969 | 7,06626 | 0,010776 | 5,26858 | 1,00199 | 1,00176 | 0,03865 |
| 18 | 2 | 0,0575 | 0,0008 | 1,0067 | 0,00643 | 1135,051 | 1135,051 | 1177,588 | 1135,535 | 1156,319 | 1,32744 | 7,10808 | 0,012854 | 5,42334 | 1,00254 | 1,00227 | 0,04943 |
| 19 | 3 | 0,058 | 0,0018 | 1,0151 | 0,00757 | 1177,588 | 1177,588 | 1225,788 | 1178,177 | 1201,688 | 1,32502 | 7,15352 | 0,015145 | 5,584 | 1,00321 | 1,00287 | 0,06228 |
| 20 | 4 | 0,0587 | 0,0031 | 1,0268 | 0,00882 | 1225,788 | 1225,788 | 1279,956 | 1226,497 | 1252,872 | 1,32246 | 7,2023 | 0,017634 | 5,75085 | 1,00399 | 1,0036 | 0,07743 |
| 21 | 5 | 0,0595 | 0,0049 | 1,0418 | 0,01015 | 1279,956 | 1279,956 | 1340,288 | 1280,798 | 1310,122 | 1,3198 | 7,25395 | 0,020301 | 5,92371 | 1,00489 | 1,00444 | 0,09506 |
| 22 | 6 | 0,0606 | 0,0071 | 1,0602 | 0,01156 | 1340,288 | 1340,288 | 1406,854 | 1341,275 | 1373,571 | 1,31706 | 7,30787 | 0,023118 | 6,10184 | 1,00594 | 1,00542 | 0,11536 |
| 23 | 7 | 0,0618 | 0,0096 | 1,0819 | 0,01302 | 1406,854 | 1406,854 | 1479,578 | 1407,996 | 1443,216 | 1,3143 | 7,36338 | 0,026045 | 6,28392 | 1,00713 | 1,00653 | 0,13848 |
| 24 | 8 | 0,0633 | 0,0126 | 1,1069 | 0,01452 | 1479,578 | 1479,578 | 1558,222 | 1480,88 | 1518,9 | 1,31154 | 7,41969 | 0,029033 | 6,46805 | 1,00847 | 1,0078 | 0,16453 |
| 25 | 9 | 0,0649 | 0,0159 | 1,1352 | 0,01601 | 1558,222 | 1558,222 | 1642,372 | 1559,686 | 1600,297 | 1,30883 | 7,47604 | 0,032024 | 6,65178 | 1,00996 | 1,00922 | 0,19356 |
| 26 | 10 | 0,0667 | 0,0196 | 1,1668 | 0,01747 | 1642,372 | 1642,372 | 1731,433 | 1643,997 | 1686,903 | 1,3062 | 7,53165 | 0,034949 | 6,83221 | 1,01161 | 1,01079 | 0,22558 |
| 27 | 11 | 0,0687 | 0,0237 | 1,2016 | 0,01887 | 1731,433 | 1731,433 | 1824,624 | 1733,214 | 1778,028 | 1,30368 | 7,58583 | 0,037734 | 7,00603 | 1,01341 | 1,01251 | 0,26053 |
| 28 | 12 | 0,0709 | 0,0282 | 1,2397 | 0,02015 | 1824,624 | 1824,624 | 1920,984 | 1826,551 | 1872,804 | 1,3013 | 7,63794 | 0,040296 | 7,16967 | 1,01535 | 1,01438 | 0,29827 |
| 29 | 13 | 0,0732 | 0,0331 | 1,281 | 0,02128 | 1920,984 | 1920,984 | 2019,392 | 1923,049 | 1970,188 | 1,29907 | 7,68744 | 0,04255 | 7,3194 | 1,01743 | 1,01639 | 0,33856 |
| 30 | 14 | 0,0758 | 0,0383 | 1,3256 | 0,02221 | 2019,392 | 2019,392 | 2118,579 | 2021,58 | 2068,985 | 1,297 | 7,73391 | 0,044415 | 7,45151 | 1,01962 | 1,01852 | 0,38111 |
| 31 | 15 | 0,0785 | 0,0439 | 1,3733 | 0,02291 | 2118,579 | 2118,579 | 2217,171 | 2120,878 | 2167,875 | 1,29512 | 7,777 | 0,04581 | 7,56244 | 1,0219 | 1,02076 | 0,42553 |
| 32 | 16 | 0,0814 | 0,0499 | 1,4242 | 0,02333 | 2217,171 | 2217,171 | 2313,726 | 2219,566 | 2265,449 | 1,29341 | 7,81648 | 0,046668 | 7,6489 | 1,02426 | 1,02308 | 0,47134 |
| 33 | 17 | 0,0845 | 0,0563 | 1,4782 | 0,02347 | 2313,726 | 2313,726 | 2406,783 | 2316,202 | 2360,255 | 1,29188 | 7,8522 | 0,046933 | 7,70807 | 1,02666 | 1,02546 | 0,51801 |
| 34 | 18 | 0,0878 | 0,063 | 1,5353 | 0,02329 | 2406,783 | 2406,783 | 2494,918 | 2409,326 | 2450,851 | 1,29052 | 7,8841 | 0,046571 | 7,7377 | 1,02908 | 1,02787 | 0,56494 |
| 35 | 19 | 0,0912 | 0,0701 | 1,5956 | 0,02278 | 2494,918 | 2494,918 | 2576,802 | 2497,514 | 2535,86 | 1,28934 | 7,91219 | 0,045569 | 7,73623 | 1,03147 | 1,03028 | 0,61151 |
| 36 | 20 | 0,0948 | 0,0775 | 1,6588 | 0,02197 | 2576,802 | 2576,802 | 2651,256 | 2579,438 | 2614,029 | 1,28833 | 7,93653 | 0,043941 | 7,70288 | 1,03382 | 1,03265 | 0,65708 |
| 37 | 21 | 0,0986 | 0,0853 | 1,7251 | 0,02086 | 2651,256 | 2651,256 | 2717,305 | 2653,92 | 2684,281 | 1,28747 | 7,95724 | 0,041728 | 7,6377 | 1,03608 | 1,03495 | 0,70102 |
| 38 | 22 | 0,1026 | 0,0935 | 1,7944 | 0,0195 | 2717,305 | 2717,305 | 2774,219 | 2719,987 | 2745,762 | 1,28676 | 7,97449 | 0,038996 | 7,54156 | 1,03823 | 1,03715 | 0,74275 |
| 39 | 23 | 0,1067 | 0,102 | 1,8667 | 0,01792 | 2774,219 | 2774,219 | 2821,546 | 2776,909 | 2797,883 | 1,28619 | 7,98848 | 0,035837 | 7,41618 | 1,04024 | 1,03923 | 0,78175 |
| 40 | 24 | 0,111 | 0,1108 | 1,9419 | 0,01618 | 2821,546 | 2821,546 | 2859,122 | 2824,234 | 2840,334 | 1,28574 | 7,99943 | 0,032359 | 7,26399 | 1,04208 | 1,04116 | 0,81758 |
| 41 | 25 | 0,1155 | 0,12 | 2,02 | 0,01434 | 2859,122 | 2859,122 | 2887,079 | 2861,803 | 2873,101 | 1,2854 | 8,0076 | 0,028686 | 7,08808 | 1,04375 | 1,04291 | 0,84994 |
| 42 | 26 | 0,1201 | 0,1295 | 2,1009 | 0,01247 | 2887,079 | 2887,079 | 2905,816 | 2889,745 | 2896,448 | 1,28517 | 8,01324 | 0,024942 | 6,89199 | 1,04522 | 1,04448 | 0,87863 |
| 43 | 27 | 0,1249 | 0,1394 | 2,1846 | 0,01063 | 2905,816 | 2905,816 | 2915,971 | 2908,463 | 2910,894 | 1,28504 | 8,01664 | 0,021253 | 6,67959 | 1,04651 | 1,04586 | 0,90357 |
| 44 | 28 | 0,1298 | 0,1495 | 2,2711 | 0,00886 | 2915,971 | 2915,971 | 2918,369 | 2918,593 | 2917,17 | 1,28498 | 8,01807 | 0,01773 | 6,45491 | 1,0476 | 1,04705 | 0,92482 |
| 45 | 29 | 0,1349 | 0,16 | 2,3603 | 0,00723 | 2918,369 | 2918,369 | 2913,968 | 2920,962 | 2916,168 | 1,28499 | 8,01778 | 0,014465 | 6,22192 | 1,04851 | 1,04806 | 0,94255 |
| 46 | 30 | 0,1402 | 0,1708 | 2,4522 | 0,00577 | 2913,968 | 2913,968 | 2903,799 | 2916,53 | 2908,883 | 1,28506 | 8,01605 | 0,011531 | 5,98438 | 1,04926 | 1,04888 | 0,95702 |
| 47 | 31 | 0,1456 | 0,182 | 2,5467 | 0,00449 | 2903,799 | 2903,799 | 2888,904 | 2906,327 | 2896,351 | 1,28518 | 8,01311 | 0,00897 | 5,74572 | 1,04985 | 1,04955 | 0,96855 |
| 48 | 32 | 0,1511 | 0,1934 | 2,6439 | 0,0034 | 2888,904 | 2888,904 | 2870,286 | 2891,397 | 2879,595 | 1,28534 | 8,0092 | 0,006803 | 5,50896 | 1,05031 | 1,05008 | 0,97752 |
| 49 | 33 | 0,1568 | 0,2051 | 2,7436 | 0,00251 | 2870,286 | 2870,286 | 2848,867 | 2872,742 | 2859,576 | 1,28553 | 8,0045 | 0,005024 | 5,2766 | 1,05066 | 1,05049 | 0,98432 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|--------|--------|--------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| 50 | 34 | 0,1627 | 0,2171 | 2,8457 | 0,0018 | 2848,867 | 2848,867 | 2825,457 | 2851,286 | 2837,162 | 1,28575 | 7,9992 | 0,003608 | 5,0506 | 1,05092 | 1,05079 | 0,98935 |
| 51 | 35 | 0,1686 | 0,2295 | 2,9504 | 0,00126 | 2825,457 | 2825,457 | 2800,738 | 2827,837 | 2813,097 | 1,28598 | 7,99346 | 0,002517 | 4,83245 | 1,05111 | 1,05101 | 0,99295 |
| 52 | 36 | 0,1747 | 0,242 | 3,0574 | 0,00085 | 2800,738 | 2800,738 | 2775,262 | 2803,08 | 2788 | 1,28623 | 7,98739 | 0,001704 | 4,62315 | 1,05124 | 1,05117 | 0,99547 |
| 53 | 37 | 0,181 | 0,2549 | 3,1668 | 0,00056 | 2775,262 | 2775,262 | 2749,456 | 2777,566 | 2762,359 | 1,28649 | 7,98111 | 0,001117 | 4,4233 | 1,05132 | 1,05128 | 0,99717 |
| 54 | 38 | 0,1874 | 0,2681 | 3,2785 | 0,00035 | 2749,456 | 2749,456 | 2723,635 | 2751,722 | 2736,545 | 1,28675 | 7,97468 | 0,000709 | 4,23317 | 1,05138 | 1,05135 | 0,99829 |
| 55 | 39 | 0,1939 | 0,2815 | 3,3924 | 0,00022 | 2723,635 | 2723,635 | 2698,023 | 2725,864 | 2710,829 | 1,28702 | 7,96818 | 0,000434 | 4,05275 | 1,05142 | 1,0514 | 0,999 |

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

| ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|----------|---------------|--------|---------|---------|----------|---------|----------|----------|-----------|----------|----------|---------|---------|------------------|----------|
| θ | ϕ | α | ε | μ | P_y | T_y | V_a | ζ | E_2 | γ | λ | μ | θ | | | | |
| 20 | 58 | 1 | 18 | 1,052 | 2,221 | 772,021 | 1,034 | 0,97 | 91,442 | 0,017 | 0,293 | 3,4 | 20 | | | | |
| 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 | m ₁₋₂ | X |
| 0 | -20 | 0,0953 | 0,0775 | 1,6588 | 6E-08 | 772,021 | 772,0208 | 782,85 | 772,021 | 777,434 | | | 1,2E-07 | 2,22077 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | -19 | 0,0917 | 0,0701 | 1,5956 | 1,2E-06 | 782,848 | 782,8478 | 793,7 | 782,848 | 788,274 | 1,35766 | 6,591937 | 2,42E-06 | 2,34123 | 1 | 1 | 1,2E-07 |
| 2 | -18 | 0,0882 | 0,063 | 1,5353 | 6,3E-06 | 793,7 | 793,6998 | 804,59 | 793,702 | 799,145 | 1,3563 | 6,613232 | 1,26E-05 | 2,46681 | 1 | 1 | 2,54E-06 |
| 3 | -17 | 0,0849 | 0,0563 | 1,4782 | 1,9E-05 | 804,59 | 804,5902 | 815,56 | 804,596 | 810,075 | 1,35498 | 6,634171 | 3,85E-05 | 2,59733 | 1 | 1 | 1,51E-05 |
| 4 | -16 | 0,0818 | 0,0499 | 1,4242 | 4,5E-05 | 815,559 | 815,5592 | 826,68 | 815,57 | 821,118 | 1,35368 | 6,654817 | 8,95E-05 | 2,73264 | 1 | 1,000002 | 5,36E-05 |
| 5 | -15 | 0,0789 | 0,0439 | 1,3733 | 8,8E-05 | 826,677 | 826,6766 | 838,05 | 826,694 | 832,361 | 1,35241 | 6,675279 | 0,000176 | 2,87256 | 1,00001 | 1,000005 | 0,000143 |
| 6 | -14 | 0,0762 | 0,0383 | 1,3256 | 0,00015 | 838,045 | 838,0451 | 849,8 | 838,072 | 843,924 | 1,35114 | 6,695715 | 0,00031 | 3,01696 | 1,00002 | 1,000012 | 0,000319 |
| 7 | -13 | 0,0736 | 0,0331 | 1,281 | 0,00025 | 849,802 | 849,8022 | 862,12 | 849,84 | 855,962 | 1,34987 | 6,716333 | 0,000503 | 3,16572 | 1,00003 | 1,000024 | 0,000629 |
| 8 | -12 | 0,0712 | 0,0282 | 1,2397 | 0,00038 | 862,122 | 862,1219 | 875,22 | 862,173 | 868,669 | 1,34859 | 6,737384 | 0,000768 | 3,31879 | 1,00006 | 1,000045 | 0,001131 |
| 9 | -11 | 0,069 | 0,0237 | 1,2016 | 0,00056 | 875,216 | 875,2159 | 889,33 | 875,284 | 882,275 | 1,34727 | 6,759159 | 0,001118 | 3,47618 | 1,0001 | 1,000078 | 0,001899 |
| 10 | -10 | 0,067 | 0,0196 | 1,1668 | 0,00078 | 889,334 | 889,3341 | 904,76 | 889,422 | 897,049 | 1,3459 | 6,781985 | 0,001568 | 3,638 | 1,00016 | 1,000127 | 0,003017 |
| 11 | -9 | 0,0652 | 0,0159 | 1,1352 | 0,00107 | 904,763 | 904,7634 | 921,83 | 904,876 | 913,295 | 1,34446 | 6,806214 | 0,002132 | 3,80444 | 1,00024 | 1,000196 | 0,004586 |
| 12 | -8 | 0,0636 | 0,0126 | 1,1069 | 0,00141 | 921,826 | 921,8262 | 940,88 | 921,969 | 931,352 | 1,34292 | 6,832208 | 0,002822 | 3,97577 | 1,00035 | 1,000292 | 0,006717 |
| 13 | -7 | 0,0622 | 0,0096 | 1,0819 | 0,00183 | 940,877 | 940,8771 | 962,3 | 941,056 | 951,588 | 1,34128 | 6,860327 | 0,003653 | 4,15239 | 1,00049 | 1,000419 | 0,00954 |
| 14 | -6 | 0,0609 | 0,0071 | 1,0602 | 0,00232 | 962,298 | 962,298 | 986,49 | 962,522 | 974,395 | 1,33951 | 6,890908 | 0,004638 | 4,33472 | 1,00068 | 1,000586 | 0,013193 |
| 15 | -5 | 0,0599 | 0,0049 | 1,0418 | 0,00289 | 986,491 | 986,4914 | 1013,9 | 986,769 | 1000,18 | 1,3376 | 6,924244 | 0,005786 | 4,52326 | 1,00092 | 1,0008 | 0,017831 |
| 16 | -4 | 0,059 | 0,0031 | 1,0268 | 0,00355 | 1013,87 | 1013,872 | 1044,9 | 1014,21 | 1029,37 | 1,33554 | 6,96056 | 0,007108 | 4,71845 | 1,00122 | 1,001069 | 0,023617 |
| 17 | -3 | 0,0583 | 0,0018 | 1,0151 | 0,00431 | 1044,86 | 1044,858 | 1079,9 | 1045,28 | 1062,36 | 1,33333 | 6,999995 | 0,008611 | 4,9207 | 1,00158 | 1,001401 | 0,030725 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|--------|--------|--------|---------|---------|----------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|----------|----------|
| 18 | -2 | 0,0578 | 0,0008 | 1,0067 | 0,00515 | 1079,86 | 1079,857 | 1119,3 | 1080,37 | 1099,56 | 1,33098 | 7,042578 | 0,010298 | 5,13023 | 1,00203 | 1,001807 | 0,039335 |
| 19 | -1 | 0,0576 | 0,0002 | 1,0017 | 0,00609 | 1119,26 | 1119,255 | 1163,4 | 1119,87 | 1141,33 | 1,3285 | 7,088222 | 0,012171 | 5,34708 | 1,00256 | 1,002295 | 0,049634 |
| 20 | 0 | 0,0575 | 0 | 1 | 0,00711 | 1163,4 | 1163,401 | 1212,6 | 1164,13 | 1188 | 1,32591 | 7,136711 | 0,014224 | 5,57096 | 1,00319 | 1,002874 | 0,061805 |
| 21 | 1 | 0,0576 | 0,0002 | 1,0017 | 0,00822 | 1212,59 | 1212,592 | 1267,1 | 1213,46 | 1239,83 | 1,32322 | 7,187712 | 0,016447 | 5,80123 | 1,00392 | 1,003555 | 0,076029 |
| 22 | 2 | 0,0578 | 0,0008 | 1,0067 | 0,00941 | 1267,06 | 1267,059 | 1326,9 | 1268,07 | 1297 | 1,32047 | 7,24078 | 0,018826 | 6,03683 | 1,00477 | 1,004346 | 0,092476 |
| 23 | 3 | 0,0583 | 0,0018 | 1,0151 | 0,01067 | 1326,95 | 1326,949 | 1392,3 | 1328,12 | 1359,63 | 1,31769 | 7,295382 | 0,021336 | 6,27625 | 1,00574 | 1,005255 | 0,111301 |
| 24 | 4 | 0,059 | 0,0031 | 1,0268 | 0,01197 | 1392,31 | 1392,313 | 1463,1 | 1393,65 | 1427,7 | 1,31491 | 7,350926 | 0,023948 | 6,51752 | 1,00684 | 1,006291 | 0,132637 |
| 25 | 5 | 0,0599 | 0,0049 | 1,0418 | 0,01331 | 1463,09 | 1463,089 | 1539,1 | 1464,59 | 1501,09 | 1,31217 | 7,406782 | 0,026624 | 6,75823 | 1,00808 | 1,007459 | 0,156585 |
| 26 | 6 | 0,0609 | 0,0071 | 1,0602 | 0,01466 | 1539,09 | 1539,091 | 1620 | 1540,76 | 1579,54 | 1,30949 | 7,462321 | 0,02932 | 6,99555 | 1,00945 | 1,008763 | 0,18321 |
| 27 | 7 | 0,0622 | 0,0096 | 1,0819 | 0,01599 | 1619,99 | 1619,995 | 1705,3 | 1621,84 | 1662,67 | 1,30689 | 7,516933 | 0,031982 | 7,22633 | 1,01096 | 1,010206 | 0,21253 |
| 28 | 8 | 0,0636 | 0,0126 | 1,1069 | 0,01728 | 1705,34 | 1705,337 | 1794,5 | 1707,35 | 1749,92 | 1,30441 | 7,570057 | 0,034552 | 7,44714 | 1,01261 | 1,011787 | 0,244512 |
| 29 | 9 | 0,0652 | 0,0159 | 1,1352 | 0,01848 | 1794,51 | 1794,507 | 1886,7 | 1796,67 | 1840,63 | 1,30206 | 7,621189 | 0,036966 | 7,65438 | 1,01439 | 1,013503 | 0,279064 |
| 30 | 10 | 0,067 | 0,0196 | 1,1668 | 0,01958 | 1886,75 | 1886,75 | 1981,2 | 1889,06 | 1933,96 | 1,29985 | 7,669898 | 0,039156 | 7,84442 | 1,0163 | 1,015348 | 0,31603 |
| 31 | 11 | 0,069 | 0,0237 | 1,2016 | 0,02053 | 1981,17 | 1981,172 | 2076,8 | 1983,62 | 2028,96 | 1,2978 | 7,715831 | 0,041054 | 8,01367 | 1,01832 | 1,017311 | 0,355186 |
| 32 | 12 | 0,0712 | 0,0282 | 1,2397 | 0,0213 | 2076,76 | 2076,756 | 2172,4 | 2079,32 | 2124,57 | 1,29591 | 7,758712 | 0,042593 | 8,15874 | 1,02044 | 1,01938 | 0,39624 |
| 33 | 13 | 0,0736 | 0,0331 | 1,281 | 0,02186 | 2172,38 | 2172,383 | 2266,9 | 2175,05 | 2219,62 | 1,29419 | 7,798336 | 0,043713 | 8,27654 | 1,02264 | 1,021537 | 0,438833 |
| 34 | 14 | 0,0762 | 0,0383 | 1,3256 | 0,02218 | 2266,86 | 2266,856 | 2358,9 | 2269,62 | 2312,9 | 1,29263 | 7,834571 | 0,044359 | 8,36441 | 1,02489 | 1,023763 | 0,482546 |
| 35 | 15 | 0,0789 | 0,0439 | 1,3733 | 0,02225 | 2358,94 | 2358,938 | 2447,4 | 2361,78 | 2403,16 | 1,29123 | 7,867347 | 0,044493 | 8,42021 | 1,02718 | 1,026034 | 0,526905 |
| 36 | 16 | 0,0818 | 0,0499 | 1,4242 | 0,02204 | 2447,39 | 2447,386 | 2531 | 2450,29 | 2489,19 | 1,29 | 7,896648 | 0,044088 | 8,44244 | 1,02947 | 1,028326 | 0,571399 |
| 37 | 17 | 0,0849 | 0,0563 | 1,4782 | 0,02157 | 2531 | 2530,998 | 2608,7 | 2533,95 | 2569,83 | 1,28891 | 7,922511 | 0,043138 | 8,43027 | 1,03175 | 1,03061 | 0,615487 |
| 38 | 18 | 0,0882 | 0,063 | 1,5353 | 0,02083 | 2608,65 | 2608,654 | 2679,4 | 2611,64 | 2644,01 | 1,28798 | 7,945011 | 0,041655 | 8,38364 | 1,03397 | 1,03286 | 0,658625 |
| 39 | 19 | 0,0917 | 0,0701 | 1,5956 | 0,01984 | 2679,36 | 2679,363 | 2742,3 | 2682,38 | 2710,83 | 1,28718 | 7,964265 | 0,039673 | 8,30323 | 1,03612 | 1,035047 | 0,70028 |
| 40 | 20 | 0,0953 | 0,0775 | 1,6588 | 0,01862 | 2742,3 | 2742,299 | 2796,8 | 2745,33 | 2769,57 | 1,28652 | 7,980416 | 0,037246 | 8,19047 | 1,03817 | 1,037144 | 0,739953 |
| 41 | 21 | 0,0991 | 0,0853 | 1,7251 | 0,01722 | 2796,83 | 2796,834 | 2842,6 | 2799,87 | 2819,7 | 1,28597 | 7,993637 | 0,034445 | 8,04749 | 1,04009 | 1,039128 | 0,777199 |
| 42 | 22 | 0,1031 | 0,0935 | 1,7944 | 0,01568 | 2842,57 | 2842,566 | 2879,3 | 2845,59 | 2860,95 | 1,28555 | 8,004119 | 0,031359 | 7,87706 | 1,04187 | 1,040977 | 0,811644 |
| 43 | 23 | 0,1073 | 0,102 | 1,8667 | 0,01404 | 2879,33 | 2879,329 | 2907,2 | 2882,35 | 2893,26 | 1,28522 | 8,01207 | 0,028084 | 7,68245 | 1,04348 | 1,042674 | 0,843003 |
| 44 | 24 | 0,1116 | 0,1108 | 1,9419 | 0,01236 | 2907,19 | 2907,195 | 2926,5 | 2910,19 | 2916,83 | 1,28499 | 8,01771 | 0,024723 | 7,46734 | 1,04493 | 1,044207 | 0,871087 |
| 45 | 25 | 0,1161 | 0,12 | 2,02 | 0,01069 | 2926,46 | 2926,463 | 2937,6 | 2929,44 | 2932,05 | 1,28485 | 8,021265 | 0,021377 | 7,23564 | 1,04621 | 1,045569 | 0,89581 |
| 46 | 26 | 0,1207 | 0,1295 | 2,1009 | 0,00907 | 2937,63 | 2937,634 | 2941,4 | 2940,58 | 2939,51 | 1,28478 | 8,022963 | 0,01814 | 6,99136 | 1,04731 | 1,046758 | 0,917187 |
| 47 | 27 | 0,1255 | 0,1394 | 2,1846 | 0,00755 | 2941,38 | 2941,377 | 2938,5 | 2944,29 | 2939,93 | 1,28478 | 8,02303 | 0,015095 | 6,73846 | 1,04824 | 1,047777 | 0,935327 |
| 48 | 28 | 0,1305 | 0,1495 | 2,2711 | 0,00615 | 2938,49 | 2938,491 | 2929,9 | 2941,37 | 2934,17 | 1,28483 | 8,021687 | 0,012306 | 6,4807 | 1,04902 | 1,048634 | 0,950422 |
| 49 | 29 | 0,1356 | 0,16 | 2,3603 | 0,00491 | 2929,85 | 2929,852 | 2916,4 | 2932,7 | 2923,11 | 1,28494 | 8,019144 | 0,00982 | 6,22152 | 1,04966 | 1,049341 | 0,962728 |
| 50 | 30 | 0,1409 | 0,1708 | 2,4522 | 0,00383 | 2916,37 | 2916,372 | 2899 | 2919,18 | 2907,66 | 1,28508 | 8,015599 | 0,007663 | 5,96399 | 1,05016 | 1,049911 | 0,972548 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|--------|--------|--------|---------|---------|----------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|----------|----------|
| 51 | 31 | 0,1463 | 0,182 | 2,5467 | 0,00292 | 2898,95 | 2898,953 | 2878,4 | 2901,72 | 2888,7 | 1,28526 | 8,011234 | 0,005842 | 5,7107 | 1,05056 | 1,050362 | 0,980211 |
| 52 | 32 | 0,1519 | 0,1934 | 2,6439 | 0,00217 | 2878,45 | 2878,449 | 2855,6 | 2881,17 | 2867,04 | 1,28546 | 8,006214 | 0,004347 | 5,46375 | 1,05086 | 1,050711 | 0,986053 |
| 53 | 33 | 0,1576 | 0,2051 | 2,7436 | 0,00158 | 2855,64 | 2855,638 | 2831,2 | 2858,32 | 2843,42 | 1,28569 | 8,000683 | 0,003154 | 5,22478 | 1,05109 | 1,050973 | 0,9904 |
| 54 | 34 | 0,1635 | 0,2171 | 2,8457 | 0,00111 | 2831,2 | 2831,198 | 2805,7 | 2833,84 | 2818,45 | 1,28593 | 7,994767 | 0,002228 | 4,99495 | 1,05125 | 1,051167 | 0,993554 |
| 55 | 35 | 0,1695 | 0,2295 | 2,9504 | 0,00077 | 2805,7 | 2805,704 | 2779,6 | 2808,3 | 2792,66 | 1,28618 | 7,988571 | 0,001532 | 4,77503 | 1,05136 | 1,051306 | 0,995782 |
| 56 | 36 | 0,1757 | 0,242 | 3,0574 | 0,00051 | 2779,62 | 2779,62 | 2753,3 | 2782,17 | 2766,46 | 1,28644 | 7,982181 | 0,001023 | 4,56543 | 1,05144 | 1,051403 | 0,997314 |
| 57 | 37 | 0,182 | 0,2549 | 3,1668 | 0,00033 | 2753,31 | 2753,308 | 2727 | 2755,82 | 2740,17 | 1,28671 | 7,975664 | 0,000663 | 4,36626 | 1,05149 | 1,051468 | 0,998337 |
| 58 | 38 | 0,1884 | 0,2681 | 3,2785 | 0,00021 | 2727,04 | 2727,041 | 2701 | 2729,51 | 2714,03 | 1,28698 | 7,969073 | 0,000417 | 4,17744 | 1,05153 | 1,051512 | 0,999 |

Таблица А5 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 6000 \text{ мин}^{-1}$

| ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|----------|---------------|----------|----------|----------|--------|---------|----------|----------|-----------|-------|----------|----------|----------|-----------|----------|
| θ | ϕ | α | ε | μ | P_y | T_y | V_a | ζ | E_2 | γ | λ | μ | | | | | |
| 24 | 60 | 1 | 18 | 1,0524 | 1,7226 | 731,7442 | 1,0796 | 0,8 | 57,8013 | 0,0165 | 0,285 | 3 | | | | | |
| Расчёт процесса сгорания | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| f | f_1 | V_{cr} | s | $y(f_1)$ | X1-2 | Tпред | T1 | T2 | T2истина | T1-2 | k1-2 | K1-2 | DX1-2 | P | m | m_{1-2} | X |
| 0 | -24 | 0,1165 | 0,11081 | 1,9419 | 2,67E-07 | 731,74 | 731,74 | 742,33 | 731,74 | 737,04 | | | 5,33E-07 | 1,722587 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | -23 | 0,112 | 0,10197 | 1,8667 | 4E-06 | 742,33 | 742,33 | 753,08 | 742,33 | 747,71 | 1,363 | 6,51 | 8E-06 | 1,817892 | 1 | 1 | 5,33E-07 |
| 2 | -22 | 0,1076 | 0,09346 | 1,7944 | 1,73E-05 | 753,08 | 753,08 | 764,05 | 753,09 | 758,57 | 1,362 | 6,53 | 3,46E-05 | 1,918496 | 1 | 1 | 8,53E-06 |
| 3 | -21 | 0,1035 | 0,08531 | 1,7251 | 4,66E-05 | 764,05 | 764,05 | 775,30 | 764,06 | 769,68 | 1,360 | 6,55 | 9,33E-05 | 2,024644 | 1,000002 | 1,000001 | 4,32E-05 |
| 4 | -20 | 0,0995 | 0,07751 | 1,6588 | 9,83E-05 | 775,30 | 775,30 | 786,94 | 775,33 | 781,12 | 1,359 | 6,58 | 0,000197 | 2,136628 | 1,000007 | 1,000005 | 0,000136 |
| 5 | -19 | 0,0957 | 0,07007 | 1,5956 | 0,000179 | 786,94 | 786,94 | 799,09 | 786,99 | 793,02 | 1,357 | 6,60 | 0,000357 | 2,254787 | 1,000017 | 1,000012 | 0,000333 |
| 6 | -18 | 0,0921 | 0,06298 | 1,5353 | 0,000294 | 799,09 | 799,09 | 811,88 | 799,16 | 805,49 | 1,356 | 6,62 | 0,000588 | 2,379506 | 1,000036 | 1,000026 | 0,000691 |
| 7 | -17 | 0,0887 | 0,05626 | 1,4782 | 0,000451 | 811,88 | 811,88 | 825,49 | 811,99 | 818,69 | 1,354 | 6,65 | 0,000902 | 2,511216 | 1,000066 | 1,000051 | 0,001279 |
| 8 | -16 | 0,0854 | 0,0499 | 1,4242 | 0,000655 | 825,49 | 825,49 | 840,09 | 825,63 | 832,79 | 1,353 | 6,67 | 0,00131 | 2,650386 | 1,000112 | 1,000089 | 0,002181 |
| 9 | -15 | 0,0824 | 0,04392 | 1,3733 | 0,000912 | 840,09 | 840,09 | 855,87 | 840,28 | 847,98 | 1,351 | 6,70 | 0,001825 | 2,797516 | 1,00018 | 1,000146 | 0,003491 |
| 10 | -14 | 0,0795 | 0,0383 | 1,3256 | 0,001229 | 855,87 | 855,87 | 873,06 | 856,12 | 864,47 | 1,349 | 6,72 | 0,002458 | 2,953123 | 1,000274 | 1,000227 | 0,005316 |
| 11 | -13 | 0,0768 | 0,03306 | 1,281 | 0,001609 | 873,06 | 873,06 | 891,85 | 873,38 | 882,45 | 1,348 | 6,75 | 0,003218 | 3,117718 | 1,000401 | 1,000338 | 0,007774 |
| 12 | -12 | 0,0744 | 0,0282 | 1,2397 | 0,002058 | 891,85 | 891,85 | 912,48 | 892,26 | 902,16 | 1,346 | 6,78 | 0,004116 | 3,291778 | 1,000567 | 1,000484 | 0,010992 |
| 13 | -11 | 0,0721 | 0,02372 | 1,2016 | 0,00258 | 912,48 | 912,48 | 935,15 | 912,99 | 923,81 | 1,344 | 6,82 | 0,00516 | 3,475711 | 1,000779 | 1,000673 | 0,015108 |
| 14 | -10 | 0,07 | 0,01962 | 1,1668 | 0,003178 | 935,15 | 935,15 | 960,10 | 935,80 | 947,63 | 1,342 | 6,85 | 0,006355 | 3,66981 | 1,001046 | 1,000912 | 0,020268 |
| 15 | -9 | 0,0681 | 0,0159 | 1,1352 | 0,003853 | 960,10 | 960,10 | 987,50 | 960,90 | 973,80 | 1,340 | 6,89 | 0,007706 | 3,874207 | 1,001373 | 1,001209 | 0,026624 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|--------|---------|--------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 16 | -8 | 0,0664 | 0,01257 | 1,1069 | 0,004607 | 987,50 | 987,50 | 1017,55 | 988,49 | 1002,53 | 1,338 | 6,92 | 0,009213 | 4,08881 | 1,001771 | 1,001572 | 0,034329 |
| 17 | -7 | 0,0649 | 0,00963 | 1,0819 | 0,005438 | 1017,55 | 1017,55 | 1050,39 | 1018,75 | 1033,97 | 1,335 | 6,97 | 0,010876 | 4,313251 | 1,002246 | 1,002008 | 0,043542 |
| 18 | -6 | 0,0636 | 0,00708 | 1,0602 | 0,006344 | 1050,39 | 1050,39 | 1086,13 | 1051,84 | 1068,26 | 1,333 | 7,01 | 0,012688 | 4,546828 | 1,002807 | 1,002527 | 0,054418 |
| 19 | -5 | 0,0625 | 0,00492 | 1,0418 | 0,007321 | 1086,13 | 1086,13 | 1124,86 | 1087,89 | 1105,50 | 1,330 | 7,05 | 0,014642 | 4,788457 | 1,003462 | 1,003134 | 0,067107 |
| 20 | -4 | 0,0616 | 0,00315 | 1,0268 | 0,008361 | 1124,86 | 1124,86 | 1166,61 | 1126,95 | 1145,73 | 1,328 | 7,10 | 0,016723 | 5,036634 | 1,004217 | 1,003839 | 0,081748 |
| 21 | -3 | 0,0609 | 0,00177 | 1,0151 | 0,009456 | 1166,61 | 1166,61 | 1211,33 | 1169,08 | 1188,97 | 1,326 | 7,14 | 0,018912 | 5,289419 | 1,005079 | 1,004648 | 0,098471 |
| 22 | -2 | 0,0604 | 0,00079 | 1,0067 | 0,010594 | 1211,33 | 1211,33 | 1258,96 | 1214,23 | 1235,15 | 1,323 | 7,19 | 0,021187 | 5,544441 | 1,006055 | 1,005567 | 0,117383 |
| 23 | -1 | 0,0601 | 0,0002 | 1,0017 | 0,01176 | 1258,96 | 1258,96 | 1309,35 | 1262,33 | 1284,16 | 1,321 | 7,24 | 0,02352 | 5,798922 | 1,007148 | 1,006601 | 0,138571 |
| 24 | 0 | 0,06 | 0 | 1 | 0,012938 | 1309,35 | 1309,35 | 1362,28 | 1313,22 | 1335,81 | 1,318 | 7,29 | 0,025876 | 6,049737 | 1,008361 | 1,007754 | 0,16209 |
| 25 | 1 | 0,0601 | 0,0002 | 1,0017 | 0,014109 | 1362,28 | 1362,28 | 1417,47 | 1366,69 | 1389,87 | 1,316 | 7,33 | 0,028217 | 6,293494 | 1,009696 | 1,009028 | 0,187966 |
| 26 | 2 | 0,0604 | 0,00079 | 1,0067 | 0,015251 | 1417,47 | 1417,47 | 1474,58 | 1422,46 | 1446,03 | 1,314 | 7,38 | 0,030502 | 6,526631 | 1,011151 | 1,010424 | 0,216183 |
| 27 | 3 | 0,0609 | 0,00177 | 1,0151 | 0,016342 | 1474,58 | 1474,58 | 1533,21 | 1480,17 | 1503,90 | 1,311 | 7,42 | 0,032684 | 6,745536 | 1,012725 | 1,011938 | 0,246685 |
| 28 | 4 | 0,0616 | 0,00315 | 1,0268 | 0,017357 | 1533,21 | 1533,21 | 1592,88 | 1539,41 | 1563,04 | 1,309 | 7,47 | 0,034715 | 6,946666 | 1,014411 | 1,013568 | 0,279368 |
| 29 | 5 | 0,0625 | 0,00492 | 1,0418 | 0,018273 | 1592,88 | 1592,88 | 1653,07 | 1599,69 | 1622,97 | 1,307 | 7,51 | 0,036546 | 7,126674 | 1,016201 | 1,015306 | 0,314083 |
| 30 | 6 | 0,0636 | 0,00708 | 1,0602 | 0,019064 | 1653,07 | 1653,07 | 1713,21 | 1660,50 | 1683,14 | 1,305 | 7,55 | 0,038128 | 7,282522 | 1,018086 | 1,017144 | 0,350628 |
| 31 | 7 | 0,0649 | 0,00963 | 1,0819 | 0,019708 | 1713,21 | 1713,21 | 1772,70 | 1721,24 | 1742,95 | 1,304 | 7,58 | 0,039416 | 7,411586 | 1,020053 | 1,01907 | 0,388756 |
| 32 | 8 | 0,0664 | 0,01257 | 1,1069 | 0,020183 | 1772,70 | 1772,70 | 1830,92 | 1781,32 | 1801,81 | 1,302 | 7,62 | 0,040367 | 7,511739 | 1,022086 | 1,02107 | 0,428172 |
| 33 | 9 | 0,0681 | 0,0159 | 1,1352 | 0,020473 | 1830,92 | 1830,92 | 1887,25 | 1840,09 | 1859,08 | 1,301 | 7,65 | 0,040946 | 7,581413 | 1,024169 | 1,023127 | 0,468539 |
| 34 | 10 | 0,07 | 0,01962 | 1,1668 | 0,020564 | 1887,25 | 1887,25 | 1941,05 | 1896,93 | 1914,15 | 1,299 | 7,68 | 0,041127 | 7,619641 | 1,026281 | 1,025225 | 0,509485 |
| 35 | 11 | 0,0721 | 0,02372 | 1,2016 | 0,020446 | 1941,05 | 1941,05 | 1991,74 | 1951,20 | 1966,39 | 1,298 | 7,71 | 0,040893 | 7,626072 | 1,028402 | 1,027341 | 0,550613 |
| 36 | 12 | 0,0744 | 0,0282 | 1,2397 | 0,020119 | 1991,74 | 1991,74 | 2038,77 | 2002,31 | 2015,25 | 1,297 | 7,73 | 0,040237 | 7,600967 | 1,030511 | 1,029457 | 0,591505 |
| 37 | 13 | 0,0768 | 0,03306 | 1,281 | 0,019584 | 2038,77 | 2038,77 | 2081,65 | 2049,70 | 2060,21 | 1,296 | 7,75 | 0,039169 | 7,545177 | 1,032587 | 1,031549 | 0,631743 |
| 38 | 14 | 0,0795 | 0,0383 | 1,3256 | 0,018853 | 2081,65 | 2081,65 | 2119,96 | 2092,89 | 2100,81 | 1,295 | 7,77 | 0,037707 | 7,460096 | 1,034607 | 1,033597 | 0,670912 |
| 39 | 15 | 0,0824 | 0,04392 | 1,3733 | 0,017942 | 2119,96 | 2119,96 | 2153,40 | 2131,45 | 2136,68 | 1,295 | 7,79 | 0,035884 | 7,34761 | 1,036552 | 1,03558 | 0,708618 |
| 40 | 16 | 0,0854 | 0,0499 | 1,4242 | 0,016873 | 2153,40 | 2153,40 | 2181,72 | 2165,08 | 2167,56 | 1,294 | 7,80 | 0,033746 | 7,210021 | 1,038403 | 1,037478 | 0,744503 |
| 41 | 17 | 0,0887 | 0,05626 | 1,4782 | 0,015674 | 2181,72 | 2181,72 | 2204,81 | 2193,53 | 2193,26 | 1,294 | 7,81 | 0,031348 | 7,049976 | 1,040144 | 1,039274 | 0,778249 |
| 42 | 18 | 0,0921 | 0,06298 | 1,5353 | 0,014375 | 2204,81 | 2204,81 | 2222,66 | 2216,70 | 2213,73 | 1,293 | 7,82 | 0,028751 | 6,870372 | 1,041761 | 1,040953 | 0,809597 |
| 43 | 19 | 0,0957 | 0,07007 | 1,5956 | 0,013012 | 2222,66 | 2222,66 | 2235,35 | 2234,57 | 2229,00 | 1,293 | 7,82 | 0,026023 | 6,674275 | 1,043244 | 1,042503 | 0,838347 |
| 44 | 20 | 0,0995 | 0,07751 | 1,6588 | 0,011617 | 2235,35 | 2235,35 | 2243,09 | 2247,25 | 2239,22 | 1,293 | 7,83 | 0,023234 | 6,464826 | 1,044587 | 1,043915 | 0,86437 |
| 45 | 21 | 0,1035 | 0,08531 | 1,7251 | 0,010226 | 2243,09 | 2243,09 | 2246,14 | 2254,92 | 2244,62 | 1,293 | 7,83 | 0,020453 | 6,245158 | 1,045785 | 1,045186 | 0,887605 |
| 46 | 22 | 0,1076 | 0,09346 | 1,7944 | 0,008871 | 2246,14 | 2246,14 | 2244,87 | 2257,87 | 2245,50 | 1,293 | 7,83 | 0,017742 | 6,018313 | 1,04684 | 1,046313 | 0,908058 |
| 47 | 23 | 0,112 | 0,10197 | 1,8667 | 0,007579 | 2244,87 | 2244,87 | 2239,67 | 2256,45 | 2242,27 | 1,293 | 7,83 | 0,015159 | 5,787171 | 1,047755 | 1,047298 | 0,9258 |
| 48 | 24 | 0,1165 | 0,11081 | 1,9419 | 0,006375 | 2239,67 | 2239,67 | 2231,00 | 2251,09 | 2235,34 | 1,293 | 7,83 | 0,012749 | 5,554389 | 1,048537 | 1,048146 | 0,940959 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|--------|---------|--------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 49 | 25 | 0,1212 | 0,11999 | 2,02 | 0,005275 | 2231,00 | 2231,00 | 2219,34 | 2242,23 | 2225,17 | 1,293 | 7,82 | 0,010549 | 5,32236 | 1,049195 | 1,048866 | 0,953708 |
| 50 | 26 | 0,126 | 0,12951 | 2,1009 | 0,004292 | 2219,34 | 2219,34 | 2205,15 | 2230,35 | 2212,24 | 1,293 | 7,82 | 0,008583 | 5,093171 | 1,049739 | 1,049467 | 0,964257 |
| 51 | 27 | 0,131 | 0,13936 | 2,1846 | 0,003431 | 2205,15 | 2205,15 | 2188,90 | 2215,93 | 2197,02 | 1,294 | 7,81 | 0,006863 | 4,868592 | 1,050182 | 1,04996 | 0,97284 |
| 52 | 28 | 0,1362 | 0,14954 | 2,2711 | 0,002694 | 2188,90 | 2188,90 | 2171,01 | 2199,43 | 2179,95 | 1,294 | 7,81 | 0,005389 | 4,650069 | 1,050536 | 1,050359 | 0,979703 |
| 53 | 29 | 0,1416 | 0,16004 | 2,3603 | 0,002077 | 2171,01 | 2171,01 | 2151,89 | 2181,29 | 2161,45 | 1,294 | 7,80 | 0,004153 | 4,438732 | 1,050814 | 1,050675 | 0,985091 |
| 54 | 30 | 0,1471 | 0,17085 | 2,4522 | 0,00157 | 2151,89 | 2151,89 | 2131,90 | 2161,91 | 2141,90 | 1,294 | 7,79 | 0,00314 | 4,235418 | 1,051028 | 1,050921 | 0,989245 |
| 55 | 31 | 0,1528 | 0,18197 | 2,5467 | 0,001163 | 2131,90 | 2131,90 | 2111,33 | 2141,65 | 2121,61 | 1,295 | 7,79 | 0,002326 | 4,040691 | 1,05119 | 1,051109 | 0,992384 |
| 56 | 32 | 0,1586 | 0,1934 | 2,6439 | 0,000844 | 2111,33 | 2111,33 | 2090,43 | 2120,81 | 2100,88 | 1,295 | 7,78 | 0,001689 | 3,854882 | 1,05131 | 1,05125 | 0,99471 |
| 57 | 33 | 0,1646 | 0,20512 | 2,7436 | 0,0006 | 2090,43 | 2090,43 | 2069,43 | 2099,65 | 2079,93 | 1,295 | 7,77 | 0,0012 | 3,678123 | 1,051397 | 1,051353 | 0,996399 |
| 58 | 34 | 0,1707 | 0,21715 | 2,8457 | 0,000417 | 2069,43 | 2069,43 | 2048,47 | 2078,38 | 2058,95 | 1,296 | 7,76 | 0,000834 | 3,510379 | 1,051459 | 1,051428 | 0,997599 |
| 59 | 35 | 0,177 | 0,22946 | 2,9504 | 0,000283 | 2048,47 | 2048,47 | 2027,69 | 2057,16 | 2038,08 | 1,296 | 7,75 | 0,000567 | 3,351491 | 1,051502 | 1,05148 | 0,998433 |
| 60 | 36 | 0,1834 | 0,24205 | 3,0574 | 0,000188 | 2027,69 | 2027,69 | 2007,25 | 2036,12 | 2017,47 | 1,297 | 7,74 | 0,000376 | 3,201201 | 1,051531 | 1,051517 | 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 ² | W_{x2} , м/с ² | W_x , м/с ² |
|-----------------------|----------------------|------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 14014,84 | 4111,7914 | 18126,6 |
| 10 | 0,1745 | 0,6964 | 4,992 | 13801,92 | 3863,82 | 17665,7 |
| 20 | 0,3491 | 2,7501 | 9,732 | 13169,64 | 3149,8149 | 16319,5 |
| 30 | 0,5236 | 6,058 | 13,99 | 12137,21 | 2055,8957 | 14193,1 |
| 40 | 0,6981 | 10,457 | 17,56 | 10735,99 | 714,00508 | 11450 |
| 50 | 0,8727 | 15,737 | 20,31 | 9008,564 | -714,0051 | 8294,56 |
| 60 | 1,0472 | 21,656 | 22,15 | 7007,419 | -2055,896 | 4951,52 |
| 70 | 1,2217 | 27,957 | 23,06 | 4793,357 | -3149,815 | 1643,54 |
| 80 | 1,3963 | 34,386 | 23,09 | 2433,651 | -3863,82 | -1430,17 |
| 90 | 1,5708 | 40,708 | 22,31 | 8,59E-13 | -4111,791 | -4111,79 |
| 100 | 1,7453 | 46,715 | 20,85 | -2433,65 | -3863,82 | -6297,47 |
| 110 | 1,9199 | 52,24 | 18,86 | -4793,36 | -3149,815 | -7943,17 |
| 120 | 2,0944 | 57,156 | 16,48 | -7007,42 | -2055,896 | -9063,31 |
| 130 | 2,2689 | 61,375 | 13,86 | -9008,56 | -714,0051 | -9722,57 |
| 140 | 2,4435 | 64,846 | 11,12 | -10736 | 714,00508 | -10022 |
| 150 | 2,618 | 67,546 | 8,319 | -12137,2 | 2055,8957 | -10081,3 |
| 160 | 2,7925 | 69,468 | 5,526 | -13169,6 | 3149,8149 | -10019,8 |
| 170 | 2,9671 | 70,618 | 2,754 | -13801,9 | 3863,82 | -9938,1 |
| 180 | 3,1416 | 71 | 2E-15 | -14014,8 | 4111,7914 | -9903,05 |
| 190 | 3,3161 | 70,618 | -2,754 | -13801,9 | 3863,82 | -9938,1 |
| 200 | 3,4907 | 69,468 | -5,526 | -13169,6 | 3149,8149 | -10019,8 |
| 210 | 3,6652 | 67,546 | -8,319 | -12137,2 | 2055,8957 | -10081,3 |
| 220 | 3,8397 | 64,846 | -11,12 | -10736 | 714,00508 | -10022 |
| 230 | 4,0143 | 61,375 | -13,86 | -9008,56 | -714,0051 | -9722,57 |
| 240 | 4,1888 | 57,156 | -16,48 | -7007,42 | -2055,896 | -9063,31 |
| 250 | 4,3633 | 52,24 | -18,86 | -4793,36 | -3149,815 | -7943,17 |
| 260 | 4,5379 | 46,715 | -20,85 | -2433,65 | -3863,82 | -6297,47 |
| 270 | 4,7124 | 40,708 | -22,31 | -2,6E-12 | -4111,791 | -4111,79 |
| 280 | 4,8869 | 34,386 | -23,09 | 2433,651 | -3863,82 | -1430,17 |
| 290 | 5,0615 | 27,957 | -23,06 | 4793,357 | -3149,815 | 1643,54 |
| 300 | 5,236 | 21,656 | -22,15 | 7007,419 | -2055,896 | 4951,52 |
| 310 | 5,4105 | 15,737 | -20,31 | 9008,564 | -714,0051 | 8294,56 |
| 320 | 5,5851 | 10,457 | -17,56 | 10735,99 | 714,00508 | 11450 |
| 330 | 5,7596 | 6,058 | -13,99 | 12137,21 | 2055,8957 | 14193,1 |
| 340 | 5,9341 | 2,7501 | -9,732 | 13169,64 | 3149,8149 | 16319,5 |
| 350 | 6,1087 | 0,6964 | -4,992 | 13801,92 | 3863,82 | 17665,7 |
| 360 | 6,2832 | 3E-31 | -7E-15 | 14014,84 | 4111,7914 | 18126,6 |
| 370 | 6,4577 | 0,6964 | 4,992 | 13801,92 | 3863,82 | 17665,7 |
| 380 | 6,6323 | 2,7501 | 9,732 | 13169,64 | 3149,8149 | 16319,5 |
| 390 | 6,8068 | 6,058 | 13,99 | 12137,21 | 2055,8957 | 14193,1 |
| 400 | 6,9813 | 10,457 | 17,56 | 10735,99 | 714,00508 | 11450 |
| 410 | 7,1558 | 15,737 | 20,31 | 9008,564 | -714,0051 | 8294,56 |
| 420 | 7,3304 | 21,656 | 22,15 | 7007,419 | -2055,896 | 4951,52 |
| 430 | 7,5049 | 27,957 | 23,06 | 4793,357 | -3149,815 | 1643,54 |
| 440 | 7,6794 | 34,386 | 23,09 | 2433,651 | -3863,82 | -1430,17 |
| 450 | 7,854 | 40,708 | 22,31 | 4,29E-12 | -4111,791 | -4111,79 |
| 460 | 8,0285 | 46,715 | 20,85 | -2433,65 | -3863,82 | -6297,47 |
| 470 | 8,203 | 52,24 | 18,86 | -4793,36 | -3149,815 | -7943,17 |

| | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|----------|-----------|----------|
| 480 | 8,3776 | 57,156 | 16,48 | -7007,42 | -2055,896 | -9063,31 |
| 490 | 8,5521 | 61,375 | 13,86 | -9008,56 | -714,0051 | -9722,57 |
| 500 | 8,7266 | 64,846 | 11,12 | -10736 | 714,00508 | -10022 |
| 510 | 8,9012 | 67,546 | 8,319 | -12137,2 | 2055,8957 | -10081,3 |
| 520 | 9,0757 | 69,468 | 5,526 | -13169,6 | 3149,8149 | -10019,8 |
| 530 | 9,2502 | 70,618 | 2,754 | -13801,9 | 3863,82 | -9938,1 |
| 540 | 9,4248 | 71 | 6E-15 | -14014,8 | 4111,7914 | -9903,05 |
| 550 | 9,5993 | 70,618 | -2,754 | -13801,9 | 3863,82 | -9938,1 |
| 560 | 9,7738 | 69,468 | -5,526 | -13169,6 | 3149,8149 | -10019,8 |
| 570 | 9,9484 | 67,546 | -8,319 | -12137,2 | 2055,8957 | -10081,3 |
| 580 | 10,123 | 64,846 | -11,12 | -10736 | 714,00508 | -10022 |
| 590 | 10,297 | 61,375 | -13,86 | -9008,56 | -714,0051 | -9722,57 |
| 600 | 10,472 | 57,156 | -16,48 | -7007,42 | -2055,896 | -9063,31 |
| 610 | 10,647 | 52,24 | -18,86 | -4793,36 | -3149,815 | -7943,17 |
| 620 | 10,821 | 46,715 | -20,85 | -2433,65 | -3863,82 | -6297,47 |
| 630 | 10,996 | 40,708 | -22,31 | -6E-12 | -4111,791 | -4111,79 |
| 640 | 11,17 | 34,386 | -23,09 | 2433,651 | -3863,82 | -1430,17 |
| 650 | 11,345 | 27,957 | -23,06 | 4793,357 | -3149,815 | 1643,54 |
| 660 | 11,519 | 21,656 | -22,15 | 7007,419 | -2055,896 | 4951,52 |
| 670 | 11,694 | 15,737 | -20,31 | 9008,564 | -714,0051 | 8294,56 |
| 680 | 11,868 | 10,457 | -17,56 | 10735,99 | 714,00508 | 11450 |
| 690 | 12,043 | 6,058 | -13,99 | 12137,21 | 2055,8957 | 14193,1 |
| 700 | 12,217 | 2,7501 | -9,732 | 13169,64 | 3149,8149 | 16319,5 |
| 710 | 12,392 | 0,6964 | -4,992 | 13801,92 | 3863,82 | 17665,7 |
| 720 | 12,566 | 1E-30 | -1E-14 | 14014,84 | 4111,7914 | 18126,6 |

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)

Таблица В1 - Сводная таблица динамического расчета двигателя.

| φ° | Δp_{Γ} , Мпа | W , м/с ² | P_j , МПа | p , Мпа | $\text{tg}\beta$ | P_N , МПа | $1/\cos\beta$ | p_s , Мпа | $\cos(\beta+\varphi)/\cos\beta$ | P_K , Мпа | $\sin(\beta+\varphi)/\cos\beta$ | p_{Γ} , Мпа | T , кН | $M_{\text{кр.ц}}$, Нм |
|-----------------|---------------------------|------------------------|-------------|-----------|------------------|-------------|---------------|-------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|--------------------|----------|------------------------|
| 0 | 0,0282 | 21539 | -2,542 | -2,5133 | 0 | 0 | 1 | -2,513 | 1 | -2,513 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0,0272 | 20988 | -2,477 | -2,4494 | 0,0521 | -0,128 | 1,0014 | -2,453 | 0,975767 | -2,39 | 0,224914 | -0,55089 | -3,42719 | -165,191 |
| 20 | 0,0252 | 19379 | -2,287 | -2,2615 | 0,1029 | -0,233 | 1,0053 | -2,273 | 0,904474 | -2,045 | 0,438741 | -0,99221 | -6,1727 | -297,524 |
| 30 | 0,0232 | 16838 | -1,987 | -1,9637 | 0,1514 | -0,297 | 1,0113 | -1,986 | 0,790277 | -1,552 | 0,631072 | -1,23923 | -7,70944 | -371,595 |
| 40 | 0,0202 | 13562 | -1,6 | -1,5801 | 0,1961 | -0,31 | 1,0189 | -1,61 | 0,639878 | -1,011 | 0,79287 | -1,25282 | -7,79396 | -375,669 |
| 50 | 0,0172 | 9796 | -1,156 | -1,1387 | 0,2355 | -0,268 | 1,027 | -1,169 | 0,462126 | -0,526 | 0,917162 | -1,0444 | -6,49733 | -313,171 |
| 60 | 0,0142 | 5811 | -0,686 | -0,6714 | 0,2683 | -0,18 | 1,0348 | -0,695 | 0,267354 | -0,18 | 0,999645 | -0,67117 | -4,17544 | -201,256 |
| 70 | 0,0112 | 1872 | -0,221 | -0,2097 | 0,2929 | -0,061 | 1,0412 | -0,218 | 0,066479 | -0,014 | 1,039078 | -0,21788 | -1,35548 | -65,3339 |
| 80 | 0,0092 | -1780 | 0,21 | 0,2193 | 0,3082 | 0,0676 | 1,0454 | 0,2292 | -0,13008 | -0,029 | 1,037314 | 0,227434 | 1,414898 | 68,19811 |
| 90 | 0,0092 | -4957 | 0,5849 | 0,5941 | 0,3134 | 0,1862 | 1,0469 | 0,622 | -0,31342 | -0,186 | 0,998899 | 0,59349 | 3,692184 | 177,9633 |
| 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 | -0,0028 | -11502 | 1,3573 | 1,3545 | -0,236 | -0,319 | 1,027 | 1,391 | -0,82298 | -1,115 | -0,61437 | -0,83214 | -5,17683 | -249,523 |
| 240 | 0,0064 | -10754 | 1,269 | 1,2754 | -0,268 | -0,342 | 1,0348 | 1,3198 | -0,73204 | -0,934 | -0,73136 | -0,93281 | -5,80312 | -279,711 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|-------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|
| 250 | 0,0193 | -9455 | 1,1157 | 1,135 | -0,293 | -0,332 | 1,0412 | 1,1818 | -0,61698 | -0,7 | -0,83871 | -0,95196 | -5,92228 | -285,454 |
| 260 | 0,0374 | -7525 | 0,888 | 0,9254 | -0,308 | -0,285 | 1,0454 | 0,9674 | -0,47701 | -0,441 | -0,93027 | -0,86084 | -5,35544 | -258,132 |
| 270 | 0,0632 | -4946 | 0,5836 | 0,6468 | -0,313 | -0,203 | 1,0469 | 0,6771 | -0,31342 | -0,203 | -0,9989 | -0,64606 | -4,01922 | -193,726 |
| 280 | 0,1010 | -1767 | 0,2085 | 0,3096 | -0,308 | -0,095 | 1,0454 | 0,3236 | -0,13008 | -0,04 | -1,03731 | -0,3211 | -1,99762 | -96,2851 |
| 290 | 0,1583 | 1886 | -0,223 | -0,0642 | -0,293 | 0,0188 | 1,0412 | -0,067 | 0,066479 | -0,004 | -1,03908 | 0,066728 | 0,415126 | 20,00905 |
| 300 | 0,2489 | 5826 | -0,687 | -0,4385 | -0,268 | 0,1176 | 1,0348 | -0,454 | 0,267354 | -0,117 | -0,99964 | 0,438341 | 2,72698 | 131,4404 |
| 310 | 0,3994 | 9813 | -1,158 | -0,7585 | -0,236 | 0,1786 | 1,027 | -0,779 | 0,462126 | -0,351 | -0,91716 | 0,695627 | 4,32759 | 208,5899 |
| 320 | 0,6636 | 13580 | -1,602 | -0,9388 | -0,196 | 0,1841 | 1,0189 | -0,957 | 0,639878 | -0,601 | -0,79287 | 0,744343 | 4,630665 | 223,198 |
| 330 | 1,1497 | 16857 | -1,989 | -0,8394 | -0,151 | 0,1271 | 1,0113 | -0,849 | 0,790277 | -0,663 | -0,63107 | 0,52973 | 3,295526 | 158,8444 |
| 331 | 1,2171 | 17148 | -2,023 | -0,8063 | -0,147 | 0,1183 | 1,0106 | -0,815 | 0,803455 | -0,648 | -0,61308 | 0,494351 | 3,075427 | 148,2356 |
| 332 | 1,2888 | 17432 | -2,057 | -0,7681 | -0,142 | 0,109 | 1,01 | -0,776 | 0,816261 | -0,627 | -0,59478 | 0,456853 | 2,842146 | 136,9914 |
| 333 | 1,3650 | 17707 | -2,089 | -0,7244 | -0,137 | 0,0994 | 1,0093 | -0,731 | 0,828688 | -0,6 | -0,5762 | 0,417418 | 2,596817 | 125,1666 |
| 334 | 1,4459 | 17975 | -2,121 | -0,6751 | -0,132 | 0,0894 | 1,0087 | -0,681 | 0,840729 | -0,568 | -0,55734 | 0,37626 | 2,340765 | 112,8249 |
| 335 | 1,5317 | 18234 | -2,152 | -0,6199 | -0,128 | 0,0791 | 1,0081 | -0,625 | 0,852376 | -0,528 | -0,5382 | 0,333625 | 2,075525 | 100,0403 |
| 336 | 1,6226 | 18485 | -2,181 | -0,5586 | -0,123 | 0,0685 | 1,0075 | -0,563 | 0,863622 | -0,482 | -0,5188 | 0,289795 | 1,802858 | 86,89776 |
| 337 | 1,7179 | 18727 | -2,21 | -0,4919 | -0,118 | 0,0579 | 1,0069 | -0,495 | 0,874462 | -0,43 | -0,49914 | 0,245504 | 1,527317 | 73,61668 |
| 338 | 1,8185 | 18960 | -2,237 | -0,4188 | -0,113 | 0,0473 | 1,0063 | -0,421 | 0,884888 | -0,371 | -0,47924 | 0,200693 | 1,248542 | 60,17973 |
| 339 | 1,9246 | 19184 | -2,264 | -0,3391 | -0,108 | 0,0366 | 1,0058 | -0,341 | 0,894894 | -0,303 | -0,4591 | 0,155675 | 0,968477 | 46,68057 |
| 340 | 2,0366 | 19399 | -2,289 | -0,2525 | -0,103 | 0,026 | 1,0053 | -0,254 | 0,904474 | -0,228 | -0,43874 | 0,11077 | 0,689117 | 33,21543 |
| 341 | 2,1548 | 19605 | -2,313 | -0,1586 | -0,098 | 0,0155 | 1,0048 | -0,159 | 0,913624 | -0,145 | -0,41816 | 0,066312 | 0,412536 | 19,88425 |
| 342 | 2,2795 | 19801 | -2,337 | -0,057 | -0,093 | 0,0053 | 1,0043 | -0,057 | 0,922337 | -0,053 | -0,39738 | 0,022651 | 0,140913 | 6,792026 |
| 343 | 2,4112 | 19987 | -2,359 | 0,0527 | -0,088 | -0,005 | 1,0038 | 0,0529 | 0,930608 | 0,049 | -0,3764 | -0,01984 | -0,12343 | -5,94947 |
| 344 | 2,5504 | 20164 | -2,379 | 0,171 | -0,083 | -0,014 | 1,0034 | 0,1716 | 0,938433 | 0,161 | -0,35523 | -0,06076 | -0,378 | -18,2198 |
| 345 | 2,6975 | 20330 | -2,399 | 0,2985 | -0,078 | -0,023 | 1,003 | 0,2994 | 0,945806 | 0,282 | -0,33389 | -0,09967 | -0,62008 | -29,8877 |
| 346 | 2,8531 | 20487 | -2,417 | 0,4357 | -0,073 | -0,032 | 1,0026 | 0,4368 | 0,952725 | 0,415 | -0,31238 | -0,13609 | -0,84665 | -40,8087 |
| 347 | 3,0177 | 20633 | -2,435 | 0,583 | -0,067 | -0,039 | 1,0023 | 0,5843 | 0,959184 | 0,559 | -0,29072 | -0,16949 | -1,05442 | -50,8231 |
| 348 | 3,1918 | 20769 | -2,451 | 0,741 | -0,062 | -0,046 | 1,0019 | 0,7425 | 0,965179 | 0,715 | -0,26891 | -0,19927 | -1,2397 | -59,7537 |
| 349 | 3,3757 | 20894 | -2,466 | 0,9102 | -0,057 | -0,052 | 1,0016 | 0,9116 | 0,970708 | 0,884 | -0,24698 | -0,22479 | -1,39843 | -67,4045 |
| 350 | 3,5698 | 21009 | -2,479 | 1,0907 | -0,052 | -0,057 | 1,0014 | 1,0922 | 0,975767 | 1,064 | -0,22491 | -0,24532 | -1,52614 | -73,5601 |
| 351 | 3,7742 | 21114 | -2,491 | 1,2828 | -0,047 | -0,06 | 1,0011 | 1,2842 | 0,980353 | 1,258 | -0,20274 | -0,26008 | -1,61799 | -77,987 |
| 352 | 3,9888 | 21207 | -2,502 | 1,4864 | -0,042 | -0,062 | 1,0009 | 1,4877 | 0,984464 | 1,463 | -0,18047 | -0,26825 | -1,66879 | -80,4359 |
| 353 | 4,2133 | 21290 | -2,512 | 1,7011 | -0,037 | -0,062 | 1,0007 | 1,7022 | 0,988097 | 1,681 | -0,15811 | -0,26895 | -1,67318 | -80,6472 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|-------|----------|----------|----------|----------|
| 354 | 4,4468 | 21361 | -2,521 | 1,9262 | -0,031 | -0,06 | 1,0005 | 1,9271 | 0,991249 | 1,909 | -0,13567 | -0,26132 | -1,62569 | -78,3581 |
| 355 | 4,6885 | 21422 | -2,528 | 2,1606 | -0,026 | -0,056 | 1,0003 | 2,1614 | 0,99392 | 2,147 | -0,11316 | -0,24449 | -1,52102 | -73,3131 |
| 356 | 4,9366 | 21472 | -2,534 | 2,4029 | -0,021 | -0,05 | 1,0002 | 2,4034 | 0,996107 | 2,394 | -0,09059 | -0,21769 | -1,35428 | -65,2762 |
| 357 | 5,1894 | 21511 | -2,538 | 2,6511 | -0,016 | -0,042 | 1,0001 | 2,6514 | 0,997809 | 2,645 | -0,06798 | -0,18024 | -1,12127 | -54,0453 |
| 358 | 5,4444 | 21539 | -2,542 | 2,9029 | -0,01 | -0,03 | 1,0001 | 2,903 | 0,999026 | 2,9 | -0,04534 | -0,13162 | -0,81884 | -39,4679 |
| 359 | 5,6989 | 21555 | -2,544 | 3,1554 | -0,005 | -0,016 | 1 | 3,1554 | 0,999757 | 3,155 | -0,02268 | -0,07155 | -0,44514 | -21,4558 |
| 360 | 5,9497 | 21561 | -2,544 | 3,4055 | -7E-17 | -2E-16 | 1 | 3,4055 | 1 | 3,406 | -2,5E-16 | -8,3E-16 | -5,2E-15 | -2,5E-13 |
| 361 | 6,1935 | 21556 | -2,544 | 3,6499 | 0,0052 | 0,0191 | 1 | 3,65 | 0,999757 | 3,649 | 0,022677 | 0,082768 | 0,514911 | 24,81872 |
| 362 | 6,4266 | 21539 | -2,542 | 3,885 | 0,0104 | 0,0406 | 1,0001 | 3,8852 | 0,999026 | 3,881 | 0,045342 | 0,176154 | 1,095882 | 52,8215 |
| 363 | 6,6455 | 21511 | -2,538 | 4,1072 | 0,0157 | 0,0644 | 1,0001 | 4,1077 | 0,997809 | 4,098 | 0,067985 | 0,279226 | 1,737107 | 83,72855 |
| 364 | 6,8467 | 21473 | -2,534 | 4,3129 | 0,0209 | 0,0901 | 1,0002 | 4,3138 | 0,996107 | 4,296 | 0,090594 | 0,390721 | 2,430732 | 117,1613 |
| 365 | 7,0267 | 21423 | -2,528 | 4,4988 | 0,0261 | 0,1174 | 1,0003 | 4,5003 | 0,99392 | 4,471 | 0,113158 | 0,509071 | 3,167004 | 152,6496 |
| 366 | 7,1825 | 21362 | -2,521 | 4,6618 | 0,0313 | 0,146 | 1,0005 | 4,6641 | 0,991249 | 4,621 | 0,135666 | 0,632445 | 3,934528 | 189,6443 |
| 367 | 7,3116 | 21291 | -2,512 | 4,7993 | 0,0365 | 0,1752 | 1,0007 | 4,8025 | 0,988097 | 4,742 | 0,158107 | 0,758801 | 4,720609 | 227,5334 |
| 368 | 7,4117 | 21208 | -2,503 | 4,9092 | 0,0417 | 0,2047 | 1,0009 | 4,9135 | 0,984464 | 4,833 | 0,180469 | 0,885957 | 5,511661 | 265,6621 |
| 369 | 7,4814 | 21115 | -2,492 | 4,9899 | 0,0469 | 0,2339 | 1,0011 | 4,9954 | 0,980353 | 4,892 | 0,202742 | 1,011657 | 6,293663 | 303,3545 |
| 370 | 7,5196 | 21011 | -2,479 | 5,0404 | 0,0521 | 0,2624 | 1,0014 | 5,0472 | 0,975767 | 4,918 | 0,224914 | 1,133655 | 7,052628 | 339,9366 |
| 371 | 7,5261 | 20896 | -2,466 | 5,0604 | 0,0572 | 0,2895 | 1,0016 | 5,0686 | 0,970708 | 4,912 | 0,246975 | 1,249783 | 7,775074 | 374,7586 |
| 372 | 7,5010 | 20771 | -2,451 | 5,05 | 0,0624 | 0,3149 | 1,0019 | 5,0598 | 0,965179 | 4,874 | 0,268914 | 1,358025 | 8,448464 | 407,216 |
| 373 | 7,4452 | 20635 | -2,435 | 5,0103 | 0,0675 | 0,3382 | 1,0023 | 5,0217 | 0,959184 | 4,806 | 0,290719 | 1,456581 | 9,061597 | 436,769 |
| 374 | 7,3601 | 20489 | -2,418 | 4,9424 | 0,0726 | 0,3589 | 1,0026 | 4,9554 | 0,952725 | 4,709 | 0,312381 | 1,54392 | 9,604945 | 462,9584 |
| 375 | 7,2476 | 20332 | -2,399 | 4,8484 | 0,0777 | 0,3768 | 1,003 | 4,863 | 0,945806 | 4,586 | 0,333888 | 1,61882 | 10,07091 | 485,4177 |
| 376 | 7,1100 | 20166 | -2,38 | 4,7304 | 0,0828 | 0,3917 | 1,0034 | 4,7466 | 0,938433 | 4,439 | 0,35523 | 1,680397 | 10,45399 | 503,8822 |
| 377 | 6,9500 | 19989 | -2,359 | 4,5912 | 0,0879 | 0,4034 | 1,0038 | 4,6089 | 0,930608 | 4,273 | 0,376397 | 1,728121 | 10,75088 | 518,1926 |
| 378 | 6,7704 | 19803 | -2,337 | 4,4336 | 0,0929 | 0,4119 | 1,0043 | 4,4527 | 0,922337 | 4,089 | 0,397378 | 1,761813 | 10,96049 | 528,2954 |
| 379 | 6,5743 | 19607 | -2,314 | 4,2606 | 0,0979 | 0,4173 | 1,0048 | 4,281 | 0,913624 | 3,893 | 0,418162 | 1,781634 | 11,0838 | 534,239 |
| 380 | 6,3648 | 19402 | -2,289 | 4,0754 | 0,1029 | 0,4195 | 1,0053 | 4,0969 | 0,904474 | 3,686 | 0,438741 | 1,788059 | 11,12376 | 536,1654 |
| 381 | 6,1452 | 19187 | -2,264 | 3,8811 | 0,1079 | 0,4188 | 1,0058 | 3,9036 | 0,894894 | 3,473 | 0,459104 | 1,781836 | 11,08505 | 534,2996 |
| 382 | 5,9183 | 18963 | -2,238 | 3,6807 | 0,1129 | 0,4154 | 1,0063 | 3,704 | 0,884888 | 3,257 | 0,47924 | 1,763949 | 10,97377 | 528,9358 |
| 383 | 5,6872 | 18730 | -2,21 | 3,4771 | 0,1178 | 0,4095 | 1,0069 | 3,501 | 0,874462 | 3,041 | 0,499141 | 1,735557 | 10,79714 | 520,4223 |
| 384 | 5,4544 | 18488 | -2,182 | 3,2729 | 0,1227 | 0,4015 | 1,0075 | 3,2973 | 0,863622 | 2,827 | 0,518797 | 1,69795 | 10,56318 | 509,1454 |
| 385 | 5,2224 | 18237 | -2,152 | 3,0704 | 0,1275 | 0,3916 | 1,0081 | 3,0952 | 0,852376 | 2,617 | 0,538198 | 1,652487 | 10,28035 | 495,513 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|
| 386 | 4,9932 | 17978 | -2,121 | 2,8718 | 0,1324 | 0,3802 | 1,0087 | 2,8967 | 0,840729 | 2,414 | 0,557336 | 1,600552 | 9,957257 | 479,9398 |
| 387 | 4,7686 | 17710 | -2,09 | 2,6788 | 0,1372 | 0,3675 | 1,0093 | 2,7037 | 0,828688 | 2,22 | 0,576201 | 1,543503 | 9,60235 | 462,8333 |
| 388 | 4,5501 | 17435 | -2,057 | 2,4927 | 0,142 | 0,3538 | 1,01 | 2,5176 | 0,816261 | 2,035 | 0,594784 | 1,482639 | 9,223705 | 444,5826 |
| 389 | 4,3387 | 17152 | -2,024 | 2,3148 | 0,1467 | 0,3396 | 1,0106 | 2,3395 | 0,803455 | 1,86 | 0,613077 | 1,419164 | 8,828821 | 425,5492 |
| 390 | 4,1354 | 16861 | -1,99 | 2,1458 | 0,1514 | 0,3248 | 1,0113 | 2,1701 | 0,790277 | 1,696 | 0,631072 | 1,354172 | 8,424493 | 406,0606 |
| 391 | 3,9407 | 16563 | -1,954 | 1,9863 | 0,156 | 0,31 | 1,012 | 2,0102 | 0,776735 | 1,543 | 0,648759 | 1,288628 | 8,016738 | 386,4068 |
| 392 | 3,7549 | 16257 | -1,918 | 1,8365 | 0,1607 | 0,2951 | 1,0127 | 1,8599 | 0,762838 | 1,401 | 0,666131 | 1,22337 | 7,610756 | 366,8384 |
| 393 | 3,5781 | 15945 | -1,881 | 1,6966 | 0,1653 | 0,2804 | 1,0135 | 1,7195 | 0,748593 | 1,27 | 0,68318 | 1,159104 | 7,210949 | 347,5677 |
| 394 | 3,4104 | 15626 | -1,844 | 1,5665 | 0,1698 | 0,266 | 1,0142 | 1,5888 | 0,734009 | 1,15 | 0,699899 | 1,096416 | 6,820959 | 328,7702 |
| 395 | 3,2515 | 15300 | -1,805 | 1,4461 | 0,1743 | 0,252 | 1,015 | 1,4677 | 0,719094 | 1,04 | 0,716279 | 1,035781 | 6,44374 | 310,5882 |
| 396 | 3,1012 | 14969 | -1,766 | 1,3349 | 0,1787 | 0,2386 | 1,0157 | 1,3559 | 0,703857 | 0,94 | 0,732315 | 0,977574 | 6,081625 | 293,1343 |
| 397 | 2,9699 | 14631 | -1,726 | 1,2434 | 0,1831 | 0,2277 | 1,0165 | 1,2639 | 0,688308 | 0,856 | 0,747998 | 0,930066 | 5,786074 | 278,8888 |
| 398 | 2,8456 | 14288 | -1,686 | 1,1597 | 0,1875 | 0,2174 | 1,0173 | 1,1797 | 0,672456 | 0,78 | 0,763322 | 0,885223 | 5,507098 | 265,4421 |
| 399 | 2,7281 | 13939 | -1,645 | 1,0833 | 0,1918 | 0,2078 | 1,0181 | 1,1029 | 0,656309 | 0,711 | 0,778282 | 0,843144 | 5,245315 | 252,8242 |
| 400 | 2,6169 | 13585 | -1,603 | 1,0139 | 0,1961 | 0,1988 | 1,0189 | 1,033 | 0,639878 | 0,649 | 0,79287 | 0,803902 | 5,001184 | 241,0571 |
| 410 | 1,7804 | 9819 | -1,159 | 0,6218 | 0,2355 | 0,1465 | 1,027 | 0,6386 | 0,462126 | 0,287 | 0,917162 | 0,570309 | 3,547974 | 171,0124 |
| 420 | 1,2781 | 5833 | -0,688 | 0,5898 | 0,2683 | 0,1582 | 1,0348 | 0,6103 | 0,267354 | 0,158 | 0,999645 | 0,589582 | 3,667873 | 176,7915 |
| 430 | 0,9620 | 1895 | -0,224 | 0,7384 | 0,2929 | 0,2163 | 1,0412 | 0,7689 | 0,066479 | 0,049 | 1,039078 | 0,767299 | 4,773475 | 230,0815 |
| 440 | 0,7545 | -1757 | 0,2074 | 0,9618 | 0,3082 | 0,2965 | 1,0454 | 1,0056 | -0,13008 | -0,125 | 1,037314 | 0,997738 | 6,20707 | 299,1808 |
| 450 | 0,6133 | -4934 | 0,5823 | 1,1955 | 0,3134 | 0,3747 | 1,0469 | 1,2516 | -0,31342 | -0,375 | 0,998899 | 1,194202 | 7,429299 | 358,0922 |
| 460 | 0,5144 | -7513 | 0,8865 | 1,4009 | 0,3082 | 0,4318 | 1,0454 | 1,4646 | -0,47701 | -0,668 | 0,930268 | 1,303237 | 8,107618 | 390,7872 |
| 470 | 0,4437 | -9441 | 1,1141 | 1,5578 | 0,2929 | 0,4563 | 1,0412 | 1,622 | -0,61698 | -0,961 | 0,838712 | 1,30657 | 8,128355 | 391,7867 |
| 480 | 0,3925 | -10739 | 1,2672 | 1,6598 | 0,2683 | 0,4453 | 1,0348 | 1,7175 | -0,73204 | -1,215 | 0,731358 | 1,213877 | 7,5517 | 363,992 |
| 490 | 0,3552 | -11486 | 1,3553 | 1,7106 | 0,2355 | 0,4029 | 1,027 | 1,7568 | -0,82298 | -1,408 | 0,614368 | 1,05092 | 6,537918 | 315,1276 |
| 500 | 0,3282 | -11805 | 1,393 | 1,7212 | 0,1961 | 0,3375 | 1,0189 | 1,7537 | -0,89194 | -1,535 | 0,492477 | 0,847663 | 5,273429 | 254,1793 |
| 510 | 0,2282 | -11842 | 1,3974 | 1,6256 | 0,1514 | 0,2461 | 1,0113 | 1,644 | -0,94166 | -1,531 | 0,368864 | 0,599628 | 3,73037 | 179,8038 |
| 520 | 0,1282 | -11742 | 1,3856 | 1,5138 | 0,1029 | 0,1558 | 1,0053 | 1,5218 | -0,97488 | -1,476 | 0,24529 | 0,371328 | 2,310085 | 111,3461 |
| 530 | 0,0282 | -11628 | 1,3721 | 1,4003 | 0,0521 | 0,0729 | 1,0014 | 1,4022 | -0,99385 | -1,392 | 0,122382 | 0,171374 | 1,066142 | 51,38804 |
| 540 | 0,0282 | -11580 | 1,3664 | 1,3946 | 1E-16 | 2E-16 | 1 | 1,3946 | -1 | -1,395 | 3,68E-16 | 5,13E-16 | 3,19E-15 | 1,54E-13 |
| 550 | 0,0282 | -11627 | 1,3719 | 1,4002 | -0,052 | -0,073 | 1,0014 | 1,4021 | -0,99385 | -1,392 | -0,12238 | -0,17136 | -1,06603 | -51,3827 |
| 560 | 0,0282 | -11740 | 1,3853 | 1,4135 | -0,103 | -0,146 | 1,0053 | 1,421 | -0,97488 | -1,378 | -0,24529 | -0,34673 | -2,15704 | -103,969 |
| 570 | 0,0282 | -11838 | 1,3969 | 1,4252 | -0,151 | -0,216 | 1,0113 | 1,4413 | -0,94166 | -1,342 | -0,36886 | -0,52569 | -3,27041 | -157,634 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|
| 580 | 0,0282 | -11800 | 1,3924 | 1,4206 | -0,196 | -0,279 | 1,0189 | 1,4474 | -0,89194 | -1,267 | -0,49248 | -0,69963 | -4,35251 | -209,791 |
| 590 | 0,0282 | -11480 | 1,3546 | 1,3828 | -0,236 | -0,326 | 1,027 | 1,4202 | -0,82298 | -1,138 | -0,61437 | -0,84958 | -5,28534 | -254,754 |
| 600 | 0,0282 | -10732 | 1,2664 | 1,2946 | -0,268 | -0,347 | 1,0348 | 1,3396 | -0,73204 | -0,948 | -0,73136 | -0,94681 | -5,89024 | -283,909 |
| 610 | 0,0282 | -9433 | 1,1131 | 1,1413 | -0,293 | -0,334 | 1,0412 | 1,1883 | -0,61698 | -0,704 | -0,83871 | -0,95722 | -5,95503 | -287,032 |
| 620 | 0,0282 | -7503 | 0,8854 | 0,9136 | -0,308 | -0,282 | 1,0454 | 0,9551 | -0,47701 | -0,436 | -0,93027 | -0,84988 | -5,28721 | -254,844 |
| 630 | 0,0282 | -4923 | 0,5809 | 0,6092 | -0,313 | -0,191 | 1,0469 | 0,6378 | -0,31342 | -0,191 | -0,9989 | -0,60851 | -3,78559 | -182,466 |
| 640 | 0,0282 | -1745 | 0,2059 | 0,2341 | -0,308 | -0,072 | 1,0454 | 0,2448 | -0,13008 | -0,03 | -1,03731 | -0,24287 | -1,51096 | -72,8281 |
| 650 | 0,0282 | 1908 | -0,225 | -0,1969 | -0,293 | 0,0577 | 1,0412 | -0,205 | 0,066479 | -0,013 | -1,03908 | 0,204646 | 1,273131 | 61,36491 |
| 660 | 0,0282 | 5848 | -0,69 | -0,6618 | -0,268 | 0,1776 | 1,0348 | -0,685 | 0,267354 | -0,177 | -0,99964 | 0,66158 | 4,115785 | 198,3808 |
| 670 | 0,0282 | 9835 | -1,161 | -1,1323 | -0,236 | 0,2667 | 1,027 | -1,163 | 0,462126 | -0,523 | -0,91716 | 1,038484 | 6,460555 | 311,3987 |
| 680 | 0,0282 | 13602 | -1,605 | -1,5768 | -0,196 | 0,3092 | 1,0189 | -1,607 | 0,639878 | -1,009 | -0,79287 | 1,250203 | 7,777688 | 374,8846 |
| 690 | 0,0282 | 16879 | -1,992 | -1,9635 | -0,151 | 0,2973 | 1,0113 | -1,986 | 0,790277 | -1,552 | -0,63107 | 1,239137 | 7,708844 | 371,5663 |
| 700 | 0,0282 | 19421 | -2,292 | -2,2635 | -0,103 | 0,233 | 1,0053 | -2,275 | 0,904474 | -2,047 | -0,43874 | 0,993089 | 6,178144 | 297,7865 |
| 710 | 0,0282 | 21032 | -2,482 | -2,4535 | -0,052 | 0,1277 | 1,0014 | -2,457 | 0,975767 | -2,394 | -0,22491 | 0,551826 | 3,432987 | 165,47 |
| 720 | 0,0282 | 21583 | -2,547 | -2,5186 | -1E-16 | 4E-16 | 1 | -2,519 | 1 | -2,519 | -4,9E-16 | 1,23E-15 | 7,68E-15 | 3,7E-13 |

Таблица В2 – Суммирование значений крутящих моментов всех четырех цилиндров.

| φ° | Цилиндры | | | | | | | | $M_{кр.},$ Нм |
|-----------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|------------------|
| | 1-й | | 2-й | | 3-й | | 4-й | | |
| | φ° кливошипа | $M_{кр.ц},$ Нм | φ° кливошипа | $M_{кр.ц},$ Нм | φ° кливошипа | $M_{кр.ц},$ Нм | φ° кливошипа | $M_{кр.ц},$ Нм | |
| 0 | 0 | 0 | 180 | 4,98E-14 | 360 | 125,1666 | 540 | -80,4359 | 44,73069 |
| 10 | 10 | -165,19077 | 190 | -50,0611 | 370 | 112,8249 | 550 | -80,6472 | -183,074 |
| 20 | 20 | -297,52423 | 200 | -101,468 | 380 | 86,89776 | 560 | -78,3581 | -390,452 |
| 30 | 30 | -371,59513 | 210 | -154,093 | 390 | 73,61668 | 570 | -73,3131 | -525,384 |
| 40 | 40 | -375,66889 | 220 | -205,358 | 400 | 60,17973 | 580 | -65,2762 | -586,124 |
| 50 | 50 | -313,17135 | 230 | -249,523 | 410 | 46,68057 | 590 | -54,0453 | -570,059 |
| 60 | 60 | -201,25602 | 240 | -279,711 | 420 | 33,21543 | 600 | -39,4679 | -487,219 |
| 70 | 70 | -65,333916 | 250 | -285,454 | 430 | 19,88425 | 610 | -21,4558 | -352,359 |
| 80 | 80 | 68,1981076 | 260 | -258,132 | 440 | 6,792026 | 620 | -2,5E-13 | -183,142 |
| 90 | 90 | 177,963254 | 270 | -193,726 | 450 | -5,94947 | 630 | 24,81872 | 3,106249 |
| 100 | 100 | 242,615121 | 280 | -96,2851 | 460 | -18,2198 | 640 | 52,8215 | 180,9317 |
| 110 | 110 | 275,970597 | 290 | 20,00905 | 470 | -29,8877 | 650 | 83,72855 | 349,8205 |
| 120 | 120 | 274,231205 | 300 | 131,4404 | 480 | -40,8087 | 660 | 117,1613 | 482,0242 |
| 130 | 130 | 246,596599 | 310 | 208,5899 | 490 | -50,8231 | 670 | 152,6496 | 557,0129 |
| 140 | 140 | 203,378273 | 320 | 223,198 | 500 | -59,7537 | 680 | 189,6443 | 556,4669 |
| 150 | 150 | 152,925227 | 330 | 158,8444 | 510 | -67,4045 | 690 | 227,5334 | 471,8985 |
| 160 | 160 | 100,900916 | 340 | 148,2356 | 520 | -73,5601 | 700 | 265,6621 | 441,2385 |
| 170 | 170 | 49,9197397 | 350 | 136,9914 | 530 | -77,987 | 710 | 303,3545 | 412,2788 |
| 180 | 180 | 4,9839E-14 | 360 | 125,1666 | 540 | -80,4359 | 720 | 339,9366 | 384,6673 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

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

| φ, град | К, Н | Т, Н | Рк, Н | Рш.ш., Н | Крк, Н | Рк, Н |
|------------|-----------|------------|----------|-------------|----------|----------|
| 0 | 0 | -15,635672 | -23,081 | 23,0810 | -35,0619 | 35,06193 |
| 10 | -3,427194 | -14,868539 | -22,3138 | 22,5755 | -34,2948 | 34,46562 |
| 20 | -6,172702 | -12,725163 | -20,1705 | 21,0938 | -32,1514 | 32,7386 |
| 30 | -7,709443 | -9,6543656 | -17,0997 | 18,7572 | -29,0806 | 30,08518 |
| 40 | -7,79396 | -6,290047 | -13,7354 | 15,7926 | -25,7163 | 26,87144 |
| 50 | -6,497331 | -3,2737765 | -10,7191 | 12,5345 | -22,7 | 23,61158 |
| 60 | -4,175436 | -1,1167168 | -8,56202 | 9,5259 | -20,543 | 20,96302 |
| 70 | -1,355475 | -0,0867223 | -7,53203 | 7,6530 | -19,513 | 19,56 |
| 80 | 1,414898 | -0,1774233 | -7,62273 | 7,7529 | -19,6037 | 19,65467 |
| 90 | 3,692184 | -1,1584971 | -8,6038 | 9,3626 | -20,5848 | 20,91326 |
| 100 | 5,033509 | -2,5810314 | -10,0263 | 11,2189 | -22,0073 | 22,57558 |
| 110 | 5,725531 | -4,2118622 | -11,6572 | 12,9873 | -23,6381 | 24,32164 |
| 120 | 5,689444 | -5,6947559 | -13,1401 | 14,3189 | -25,121 | 25,75723 |
| 130 | 5,116112 | -6,8533188 | -14,2986 | 15,1864 | -26,2796 | 26,77295 |
| 140 | 4,219466 | -7,6419866 | -15,0873 | 15,6662 | -27,0682 | 27,39514 |
| 150 | 3,172723 | -8,0995493 | -15,5449 | 15,8653 | -27,5258 | 27,70805 |
| 160 | 2,09338 | -8,3199717 | -15,7653 | 15,9037 | -27,7462 | 27,82509 |
| 170 | 1,035679 | -8,4106049 | -15,8559 | 15,8897 | -27,8369 | 27,85612 |
| 180 | 1,03E-15 | -8,4398309 | -15,8851 | 15,8851 | -27,8661 | 27,86609 |
| 190 | -1,038612 | -8,4344225 | -15,8797 | 15,9137 | -27,8607 | 27,88003 |
| 200 | -2,105137 | -8,366698 | -15,812 | 15,9515 | -27,793 | 27,87257 |
| 210 | -3,196947 | -8,161392 | -15,6067 | 15,9308 | -27,5876 | 27,77227 |
| 220 | -4,260548 | -7,7163902 | -15,1617 | 15,7489 | -27,1426 | 27,475 |
| 230 | -5,176832 | -6,9346569 | -14,38 | 15,2834 | -26,3609 | 26,86443 |
| 240 | -5,803123 | -5,8085413 | -13,2538 | 14,4686 | -25,2348 | 25,89346 |
| 250 | -5,92228 | -4,3565964 | -11,8019 | 13,2045 | -23,7829 | 24,50913 |
| 260 | -5,355435 | -2,7461055 | -10,1914 | 11,5128 | -22,1724 | 22,80996 |
| 270 | -4,019217 | -1,2611104 | -8,70642 | 9,5894 | -20,6874 | 21,07418 |
| 280 | -1,997617 | -0,2504942 | -7,6958 | 7,9508 | -19,6768 | 19,77789 |
| 290 | 0,415126 | -0,0265594 | -7,47186 | 7,4834 | -19,4528 | 19,45724 |
| 300 | 2,72698 | -0,7293284 | -8,17463 | 8,6175 | -20,1556 | 20,33922 |
| 310 | 4,32759 | -2,1805205 | -9,62583 | 10,5539 | -21,6068 | 22,0359 |
| 320 | 4,630665 | -3,7371372 | -11,1824 | 12,1033 | -23,1634 | 23,62172 |
| 330 | 3,295526 | -4,1269152 | -11,5722 | 12,0323 | -23,5532 | 23,78261 |
| 340 | 3,075427 | -4,0304325 | -11,4757 | 11,8807 | -23,4567 | 23,65744 |
| 350 | 2,842146 | -3,9004621 | -11,3458 | 11,6963 | -23,3267 | 23,49923 |
| 360 | 2,596817 | -3,7347243 | -11,18 | 11,4777 | -23,161 | 23,3061 |
| 363 | 2,340765 | -3,5309911 | -10,9763 | 11,2231 | -22,9572 | 23,07627 |
| 370 | 2,075525 | -3,2871288 | -10,7324 | 10,9313 | -22,7134 | 22,80802 |
| 380 | 1,802858 | -3,0011513 | -10,4465 | 10,6009 | -22,4274 | 22,49975 |
| 390 | 1,527317 | -2,6757565 | -10,1211 | 10,2357 | -22,102 | 22,15472 |
| 400 | 1,248542 | -2,3053565 | -9,75066 | 9,8303 | -21,7316 | 21,76745 |
| 410 | 0,968477 | -1,8877739 | -9,33308 | 9,3832 | -21,314 | 21,33602 |
| 420 | 0,689117 | -1,4206299 | -8,86594 | 8,8927 | -20,8469 | 20,85827 |
| 430 | 0,412536 | -0,9013317 | -8,34664 | 8,3568 | -20,3276 | 20,33177 |
| 440 | 0,140913 | -0,3270683 | -7,77237 | 7,7737 | -19,7533 | 19,75383 |
| 450 | -0,123433 | 0,30517719 | -7,14013 | 7,1412 | -19,1211 | 19,12148 |
| 460 | -0,378004 | 0,99859621 | -6,44671 | 6,4578 | -18,4277 | 18,43154 |

| | | | | | | |
|-----|-----------|------------|----------|---------|----------|----------|
| 470 | -0,620076 | 1,7564942 | -5,68881 | 5,7225 | -17,6698 | 17,68064 |
| 480 | -0,846654 | 2,58219537 | -4,86311 | 4,9363 | -16,8441 | 16,86533 |
| 490 | -1,054422 | 3,47890421 | -3,9664 | 4,1042 | -15,9474 | 15,98217 |
| 500 | -1,239703 | 4,44951795 | -2,99579 | 3,2422 | -14,9767 | 15,02796 |
| 510 | -1,398433 | 5,49638608 | -1,94892 | 2,3987 | -13,9299 | 13,99989 |
| 520 | -1,526143 | 6,62101731 | -0,82429 | 1,7345 | -12,8052 | 12,89586 |
| 530 | -1,617987 | 7,82374016 | 0,378435 | 1,6617 | -11,6025 | 11,71479 |
| 540 | -1,668794 | 9,10333028 | 1,658025 | 2,3524 | -10,3229 | 10,45694 |
| 550 | -1,673178 | 10,4566254 | 3,01132 | 3,4449 | -8,96963 | 9,124352 |
| 560 | -1,625687 | 11,878157 | 4,432852 | 4,7215 | -7,5481 | 7,721183 |
| 570 | -1,521019 | 13,3598326 | 5,914527 | 6,1070 | -6,06642 | 6,254198 |
| 580 | -1,354277 | 14,8907074 | 7,445402 | 7,5676 | -4,53555 | 4,733421 |
| 590 | -1,121272 | 16,456882 | 9,011577 | 9,0811 | -2,96937 | 3,174025 |
| 600 | -0,818835 | 18,0415569 | 10,59625 | 10,6278 | -1,3847 | 1,60869 |
| 610 | -0,445142 | 19,6252647 | 12,17996 | 12,1881 | 0,199008 | 0,487602 |
| 620 | -5,19E-15 | 21,1862845 | 13,74098 | 13,7410 | 1,760028 | 1,760028 |
| 630 | 0,514911 | 22,7012284 | 15,25592 | 15,2646 | 3,274972 | 3,315204 |
| 640 | 1,095882 | 24,1457696 | 16,70046 | 16,7364 | 4,719513 | 4,845076 |
| 650 | 1,737107 | 25,4954714 | 18,05017 | 18,1336 | 6,069215 | 6,312916 |
| 660 | 2,430732 | 26,7266631 | 19,28136 | 19,4340 | 7,300407 | 7,694439 |
| 670 | 3,167004 | 27,8173089 | 20,372 | 20,6167 | 8,391053 | 8,968817 |
| 680 | 3,934528 | 28,7478146 | 21,30251 | 21,6628 | 9,321558 | 10,1179 |
| 690 | 4,720609 | 29,5017279 | 22,05642 | 22,5559 | 10,07547 | 11,12651 |
| 700 | 5,511661 | 30,0662982 | 22,62099 | 23,2828 | 10,64004 | 11,98286 |
| 710 | 6,293663 | 30,4328721 | 22,98757 | 23,8336 | 11,00662 | 12,67895 |
| 720 | 7,052628 | 30,5971172 | 23,15181 | 24,2022 | 11,17086 | 13,21089 |

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

| R _{ш.ш i} | Значения R _{ш.ш i} , кН, для лучей | | | | | | | | | | | |
|----------------------|---|---------|---------|---|---|---|---|---|---|----|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| R _{ш.ш 0} | 11564 | 11564 | 11564 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11564 | 11564 |
| R _{ш.ш 10} | 11450,7 | 11450,7 | 11450,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11450,7 | 11450,7 |
| R _{ш.ш 20} | 10774 | 10774 | 10774 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10774 | 10774 |
| R _{ш.ш 30} | 9720,03 | 9720,03 | 9720,03 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9720,03 |
| R _{ш.ш 40} | 8404,18 | 8404,18 | 8404,18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8404,18 |
| R _{ш.ш 50} | 7001,6 | 7001,6 | 7001,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7001,6 |
| R _{ш.ш 60} | 5767,26 | 5767,26 | 5767,26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5767,26 |
| R _{ш.ш 70} | 5027,83 | 5027,83 | 5027,83 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5027,83 | 5027,83 |
| R _{ш.ш 80} | 5005,1 | 5005,1 | 5005,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5005,1 | 5005,1 |
| R _{ш.ш 90} | 5557,7 | 5557,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5557,7 | 5557,7 |
| R _{ш.ш 100} | 6338,07 | 6338,07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6338,07 | 6338,07 |
| R _{ш.ш 110} | 7087,17 | 7087,17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7087,17 | 7087,17 |
| R _{ш.ш 120} | 7683,03 | 7683,03 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7683,03 | 7683,03 |
| R _{ш.ш 130} | 8093,69 | 8093,69 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8093,69 | 8093,69 |
| R _{ш.ш 140} | 8337 | 8337 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8337 | 8337 |
| R _{ш.ш 150} | 8454,66 | 8454,66 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8454,66 | 8454,66 |
| R _{ш.ш 160} | 8494,73 | 8494,73 | 8494,73 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8494,73 | 8494,73 |
| R _{ш.ш 170} | 8499,6 | 8499,6 | 8499,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8499,6 | 8499,6 |
| R _{ш.ш 180} | 8497,87 | 8497,87 | 8497,87 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8497,87 | 8497,87 |
| R _{ш.ш 190} | 8499,6 | 8499,6 | 8499,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8499,6 | 8499,6 |
| R _{ш.ш 200} | 8494,73 | 8494,73 | 8494,73 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8494,73 | 8494,73 |
| R _{ш.ш 210} | 8454,66 | 8454,66 | 8454,66 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8454,66 |
| R _{ш.ш 220} | 8337 | 8337 | 8337 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8337 |
| R _{ш.ш 230} | 8093,69 | 8093,69 | 8093,69 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8093,69 |
| R _{ш.ш 240} | 7683,03 | 7683,03 | 7683,03 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7683,03 |
| R _{ш.ш 250} | 7226,14 | 7226,14 | 7226,14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7226,14 |
| R _{ш.ш 260} | 6497,1 | 6497,1 | 6497,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6497,1 |
| R _{ш.ш 270} | 5782,65 | 5782,65 | 5782,65 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5782,65 |
| R _{ш.ш 280} | 5159,27 | 5159,27 | 5159,27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5159,27 | 5159,27 |
| R _{ш.ш 290} | 4919,35 | 4919,35 | 4919,35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4919,35 | 4919,35 |
| R _{ш.ш 300} | 5103,74 | 5103,74 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5103,74 | 5103,74 |
| R _{ш.ш 310} | 5647,52 | 5647,52 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5647,52 | 5647,52 |
| R _{ш.ш 320} | 5865,03 | 5865,03 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5865,03 | 5865,03 |

| | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---------|---------|---------|---|---|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| R _{III.III} 330 | 5682,13 | 5682,13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5682,13 | 5682,13 |
| R _{III.III} 340 | 4927,65 | 4927,65 | 4927,65 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4927,65 | 4927,65 |
| R _{III.III} 350 | 2779,35 | 2779,35 | 2779,35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2779,35 | 2779,35 |
| R _{III.III} 360 | 1130,61 | 1130,61 | 1130,61 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1130,61 | 1130,61 |
| R _{III.III} 370 | 23435,4 | 23435,4 | 23435,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 23435,4 | 23435,4 |
| R _{III.III} 380 | 15951,6 | 15951,6 | 15951,6 | 0 | 0 | 15951,57 | 15951,6 | 15951,6 | 0 | 0 | 15951,6 | 15951,6 |
| R _{III.III} 390 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10064,6 | 10064,6 | 10064,6 | 10064,6 |
| R _{III.III} 400 | 6039,71 | 6039,71 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6039,71 | 6039,71 |
| R _{III.III} 410 | 5545,5 | 5545,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5545,5 | 5545,5 |
| R _{III.III} 420 | 6082,76 | 6082,76 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6082,76 | 6082,76 |
| R _{III.III} 430 | 6713,13 | 6713,13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6713,13 | 6713,13 |
| R _{III.III} 440 | 7344,92 | 7344,92 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7344,92 | 7344,92 |
| R _{III.III} 450 | 8072,82 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8072,82 | 8072,82 | 8072,82 |
| R _{III.III} 460 | 8819,88 | 8819,88 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8819,88 | 8819,88 |
| R _{III.III} 470 | 9428,14 | 9428,14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9428,14 | 9428,14 |
| R _{III.III} 480 | 9818,91 | 9818,91 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9818,91 | 9818,91 |
| R _{III.III} 490 | 10004,3 | 10004,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10004,3 | 10004,3 |
| R _{III.III} 500 | 10037,8 | 10037,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10037,8 | 10037,8 |
| R _{III.III} 510 | 9942,21 | 9942,21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9942,21 | 9942,21 |
| R _{III.III} 520 | 9754,18 | 9754,18 | 9754,18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9754,18 | 9754,18 |
| R _{III.III} 530 | 9537,74 | 9537,74 | 9537,74 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9537,74 | 9537,74 |
| R _{III.III} 540 | 9335,72 | 9335,72 | 9335,72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9335,72 | 9335,72 |
| R _{III.III} 550 | 9168,06 | 9168,06 | 9168,06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9168,06 | 9168,06 |
| R _{III.III} 560 | 9019,91 | 9019,91 | 9019,91 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9019,91 | 9019,91 |
| R _{III.III} 570 | 8852,65 | 8852,65 | 8852,65 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8852,65 |
| R _{III.III} 580 | 8622,94 | 8622,94 | 8622,94 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8622,94 |
| R _{III.III} 590 | 8287,57 | 8287,57 | 8287,57 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8287,57 |
| R _{III.III} 600 | 7811,04 | 7811,04 | 7811,04 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7811,04 |
| R _{III.III} 610 | 7175,97 | 7175,97 | 7175,97 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7175,97 |
| R _{III.III} 620 | 6425,72 | 6425,72 | 6425,72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6425,72 |
| R _{III.III} 630 | 5624,75 | 5624,75 | 5624,75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5624,75 |
| R _{III.III} 640 | 5032,69 | 5032,69 | 5032,69 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5032,69 | 5032,69 |
| R _{III.III} 650 | 5003,32 | 5003,32 | 5003,32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5003,32 | 5003,32 |
| R _{III.III} 660 | 5698,48 | 5698,48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5698,48 | 5698,48 |
| R _{III.III} 670 | 6906,87 | 6906,87 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6906,87 | 6906,87 |
| R _{III.III} 680 | 8296,41 | 8296,41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8296,41 | 8296,41 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|---------|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---------|---------|
| R _{ш.ш 690} | 9605,9 | 9605,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9605,9 | 9605,9 |
| R _{ш.ш 700} | 10656,8 | 10656,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10656,8 | 10656,8 |
| R _{ш.ш 710} | 11332 | 11332 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11332 | 11332 |
| ΣR _{ш.ш i} | 11564,5 | 11564,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11564,5 | 11564,5 |

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 | j _{кв} , град | T1, Н | Rк1, Н | T1, Н | Kрк1, Н | Tк2, Н | Kк2, Н | Rк.ш2, Н | j _{кв} , град | T2, Н | Kрк2, Н | Tк3, Н | Kк3, Н | Rк.ш3, Н | j _{кв} , град | T3, Н |
| 9807,76 | 0 | 19615,53 | 0 | -19615,53 | 2,2E-13 | 1533,1 | 1533,07 | 180 | 4,4E-13 | -16549,39 | 1E-12 | -16968,32 | 16968,32 | 540 | 1,62E-12 | -17387,25 | |
| 9731,39 | 10 | 19462,78 | -1474,46 | -19406,85 | 516,149 | 1433,6 | 1523,7 | 190 | -442,16 | -16539,61 | -483,449 | -16872,08 | 16879,01 | 550 | -524,741 | -17204,55 | |
| 9341,16 | 20 | 18682,31 | -2659,98 | -18491,98 | 883,345 | 996,41 | 1331,59 | 200 | -893,29 | -16499,15 | -958,516 | -16756,15 | 16783,55 | 560 | -1023,74 | -17013,15 | |
| 8751,11 | 30 | 17502,23 | -3334,78 | -17181,6 | 991,954 | 392,02 | 1066,61 | 210 | -1350,9 | -16397,56 | -1425,67 | -16586,83 | 16647,98 | 570 | -1500,47 | -16776,09 | |
| 8050,89 | 40 | 16101,79 | -3393,4 | -15740,15 | 801,071 | -226,83 | 832,568 | 220 | -1791,3 | -16193,82 | -1863,82 | -16324,03 | 16430,08 | 580 | -1936,37 | -16454,23 | |
| 7360,79 | 50 | 14721,57 | -2865,1 | -14440,08 | 350,367 | -705,19 | 787,431 | 230 | -2164,4 | -15850,46 | -2226,97 | -15933,5 | 16088,38 | 590 | -2289,58 | -16016,55 | |
| 6815,24 | 60 | 13630,49 | -1897,16 | -13497,81 | -249,147 | -926,88 | 959,784 | 240 | -2395,5 | -15351,58 | -2446,44 | -15402,07 | 15595,15 | 600 | -2497,43 | -15452,56 | |
| 6524,18 | 70 | 13048,35 | -709,402 | -13029,06 | -911,396 | -895,21 | 1277,51 | 250 | -2532,2 | -14819,47 | -2507,83 | -14801,76 | 15012,71 | 610 | -2483,46 | -14784,06 | |
| 6521,62 | 80 | 13043,24 | 465,4052 | -13034,94 | -1375,27 | -549,28 | 1480,91 | 260 | -2285,1 | -14133,5 | -2241,65 | -14111,53 | 14288,47 | 620 | -2198,15 | -14089,57 | |
| 6748,51 | 90 | 13497,03 | 1436,549 | -13420,36 | -1630,04 | -59,381 | 1631,12 | 270 | -1823,5 | -13539,12 | -1689,56 | -13498,01 | 13603,34 | 630 | -1555,59 | -13456,89 | |
| 7094,91 | 100 | 14189,82 | 2090,161 | -14035,03 | -1567,38 | 465,55 | 1635,06 | 280 | -1044,6 | -13103,94 | -816,736 | -13076,79 | 13102,28 | 640 | -588,872 | -13049,65 | |
| 7457,47 | 110 | 14914,94 | 2396,815 | -14721,1 | -1278,94 | 876,43 | 1550,42 | 290 | -161,06 | -12968,24 | 212,403 | -12994,33 | 12996,07 | 650 | 585,8678 | -13020,42 | |
| 7768,67 | 120 | 15537,35 | 2395,453 | -15351,58 | -928,258 | 1112,4 | 1448,84 | 300 | 538,937 | -13126,73 | 1158,69 | -13296,06 | 13346,45 | 660 | 1778,436 | -13465,38 | |
| 7998,77 | 130 | 15997,55 | 2164,363 | -15850,46 | -496,784 | 1137,1 | 1240,84 | 310 | 1170,8 | -13576,35 | 1963,53 | -13980,47 | 14117,69 | 670 | 2756,261 | -14384,6 | |
| 8146,29 | 140 | 16292,59 | 1791,256 | -16193,82 | -376,614 | 1184,9 | 1243,34 | 320 | 1038,03 | -13823,97 | 2168,7 | -14743,81 | 14902,46 | 680 | 3299,372 | -15663,66 | |
| 8226,56 | 150 | 16453,11 | 1350,868 | -16397,56 | -387,771 | 1346,6 | 1401,28 | 330 | 575,326 | -13704,45 | 1917,65 | -15395,89 | 15514,86 | 690 | 3259,969 | -17087,33 | |
| 8261,66 | 160 | 16523,32 | 893,2896 | -16499,15 | -446,721 | 1760 | 1815,8 | 340 | -0,1522 | -12979,18 | 1303,92 | -15681,7 | 15735,82 | 700 | 2607,985 | -18384,23 | |
| 8272,76 | 170 | 16545,52 | 442,1573 | -16539,61 | -472,803 | 2877,4 | 2915,95 | 350 | -503,45 | -10784,89 | 472,179 | -15037,78 | 15045,2 | 710 | 1447,805 | -19290,68 | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----|----------|----------|-----------|----------|---------|---------|-----|---------|-----------|----------|-----------|----------|-----|----------|-----------|
| 8274,7 | 180 | 16549,39 | 4,37E-13 | -16549,39 | -9,6E-13 | 4814,2 | 4814,24 | 360 | -1E-12 | -6920,914 | 8,8E-13 | -13268,45 | 13268,45 | 720 | 3,25E-12 | -19615,98 |
| 8272,76 | 190 | 16545,52 | -442,157 | -16539,61 | 3375,19 | 15529 | 15891,8 | 370 | 6308,23 | 14518,96 | 3154,11 | -2548,285 | 4054,897 | 0 | 0 | -19615,53 |
| 8261,66 | 200 | 16523,32 | -893,29 | -16499,15 | 4845,84 | 10877 | 11907,3 | 380 | 8798,4 | 5254,138 | 3661,97 | -7076,356 | 7967,738 | 10 | -1474,46 | -19406,85 |
| 8226,56 | 210 | 16453,11 | -1350,87 | -16397,56 | 4855,05 | 6975,7 | 8498,95 | 390 | 8359,23 | -2446,139 | 2849,63 | -10469,06 | 10849,96 | 20 | -2659,98 | -18491,98 |
| 8146,29 | 220 | 16292,59 | -1791,26 | -16193,82 | 3915,48 | 4063,9 | 5643,27 | 400 | 6039,7 | -8065,964 | 1352,46 | -12623,78 | 12696,02 | 30 | -3334,78 | -17181,6 |
| 7998,77 | 230 | 15997,55 | -2164,36 | -15850,46 | 3588,3 | 2713,1 | 4498,51 | 410 | 5012,23 | -10424,32 | 809,415 | -13082,24 | 13107,25 | 40 | -3393,4 | -15740,15 |
| 7768,67 | 240 | 15537,35 | -2395,45 | -15351,58 | 3654,56 | 1857,3 | 4099,42 | 420 | 4913,66 | -11637,03 | 1024,28 | -13038,56 | 13078,73 | 50 | -2865,1 | -14440,08 |
| 7517,13 | 250 | 15034,25 | -2532,19 | -14819,47 | 3717,63 | 1091,3 | 3874,49 | 430 | 4903,07 | -12636,93 | 1502,96 | -13067,37 | 13153,52 | 60 | -1897,16 | -13497,81 |
| 7158,52 | 260 | 14317,04 | -2285,14 | -14133,5 | 3572,64 | 287,49 | 3584,19 | 440 | 4860,14 | -13558,51 | 2075,37 | -13293,78 | 13454,81 | 70 | -709,402 | -13029,06 |
| 6830,69 | 270 | 13661,37 | -1823,53 | -13539,12 | 3354,23 | -469,76 | 3386,97 | 450 | 4884,93 | -14478,65 | 2675,17 | -13756,79 | 14014,49 | 80 | 465,4052 | -13034,94 |
| 6572,76 | 280 | 13145,51 | -1044,6 | -13103,94 | 2942,75 | -1160,1 | 3163,17 | 460 | 4840,9 | -15424,17 | 3138,73 | -14422,26 | 14759,85 | 90 | 1436,549 | -13420,36 |
| 6484,62 | 290 | 12969,24 | -161,063 | -12968,24 | 2364,68 | -1665,4 | 2892,26 | 470 | 4568,3 | -16298,97 | 3329,23 | -15167 | 15528,1 | 100 | 2090,161 | -14035,03 |
| 6568,9 | 300 | 13137,79 | 538,9373 | -13126,73 | 1757,71 | -1933,8 | 2613,25 | 480 | 4054,36 | -16994,3 | 3225,59 | -15857,7 | 16182,43 | 110 | 2396,815 | -14721,1 |
| 6813,37 | 310 | 13626,74 | 1170,795 | -13576,35 | 1105,97 | -1945,1 | 2237,55 | 490 | 3382,73 | -17466,58 | 2889,09 | -16409,08 | 16661,47 | 120 | 2395,453 | -15351,58 |
| 6931,44 | 320 | 13862,89 | 1038,029 | -13823,97 | 805,59 | -1954,7 | 2114,2 | 500 | 2649,21 | -17733,38 | 2406,79 | -16791,92 | 16963,53 | 130 | 2164,363 | -15850,46 |
| 6858,26 | 330 | 13716,52 | 575,3263 | -13704,45 | 666,644 | -2052,2 | 2157,75 | 510 | 1908,61 | -17808,82 | 1849,93 | -17001,32 | 17101,67 | 140 | 1791,256 | -16193,82 |
| 6489,59 | 340 | 12979,18 | -0,15216 | -12979,18 | 603,026 | -2375,8 | 2451,18 | 520 | 1205,9 | -17730,87 | 1278,38 | -17064,22 | 17112,04 | 150 | 1350,868 | -16397,56 |
| 5398,32 | 350 | 10796,64 | -503,448 | -10784,89 | 536,924 | -3393,6 | 3435,86 | 530 | 570,4 | -17572,19 | 731,845 | -17035,67 | 17051,38 | 160 | 893,2896 | -16499,15 |
| 3460,46 | 360 | 6920,914 | -1,5E-12 | -6920,914 | 1,6E-12 | -5233,2 | 5233,17 | 540 | 1,6E-12 | -17387,25 | 221,079 | -16963,43 | 16964,87 | 170 | 442,1573 | -16539,61 |
| 7915,08 | 370 | 15830,15 | 6308,228 | 14518,96 | -3416,48 | -15862 | 16225,5 | 550 | -524,74 | -17204,55 | -262,37 | -16876,97 | 16879,01 | 180 | 4,37E-13 | -16549,39 |
| 5123,91 | 380 | 10247,82 | 8798,399 | 5254,138 | -4911,07 | -11134 | 12168,7 | 560 | -1023,7 | -17013,15 | -732,95 | -16776,38 | 16792,39 | 190 | -442,157 | -16539,61 |
| 4354,89 | 390 | 8709,787 | 8359,235 | -2446,139 | -4929,85 | -7165 | 8697,14 | 570 | -1500,5 | -16776,09 | -1196,88 | -16637,62 | 16680,61 | 200 | -893,29 | -16499,15 |
| 5038,3 | 400 | 10076,59 | 6039,696 | -8065,964 | -3988,04 | -4194,1 | 5787,5 | 580 | -1936,4 | -16454,23 | -1643,62 | -16425,9 | 16507,92 | 210 | -1350,87 | -16397,56 |
| 5783,36 | 410 | 11566,72 | 5012,228 | -10424,32 | -3650,9 | -2796,1 | 4598,63 | 590 | -2289,6 | -16016,55 | -2040,42 | -16105,19 | 16233,93 | 220 | -1791,26 | -16193,82 |
| 6315,95 | 420 | 12631,89 | 4913,665 | -11637,03 | -3705,54 | -1907,8 | 4167,81 | 600 | -2497,4 | -15452,56 | -2330,89 | -15651,51 | 15824,12 | 230 | -2164,36 | -15850,46 |
| 6777,39 | 430 | 13554,78 | 4903,07 | -12636,93 | -3693,26 | -1073,6 | 3846,13 | 610 | -2483,5 | -14784,06 | -2439,46 | -15067,82 | 15264,01 | 240 | -2395,45 | -15351,58 |
| 7201,63 | 440 | 14403,27 | 4860,141 | -13558,51 | -3529,15 | -265,53 | 3539,12 | 620 | -2198,2 | -14089,57 | -2365,17 | -14454,52 | 14646,75 | 250 | -2532,19 | -14819,47 |
| 7640,25 | 450 | 15280,5 | 4884,928 | -14478,65 | -3220,26 | 510,88 | 3260,53 | 630 | -1555,6 | -13456,89 | -1920,36 | -13795,2 | 13928,22 | 260 | -2285,14 | -14133,5 |
| 8083 | 460 | 16165,99 | 4840,902 | -15424,17 | -2714,89 | 1187,3 | 2963,14 | 640 | -588,87 | -13049,65 | -1206,2 | -13294,39 | 13348,99 | 270 | -1823,53 | -13539,12 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----|----------|----------|-----------|----------|---------|---------|-----|---------|-----------|----------|-----------|----------|-----|----------|-----------|
| 8463,54 | 470 | 16927,08 | 4568,301 | -16298,97 | -1991,22 | 1639,3 | 2579,18 | 650 | 585,868 | -13020,42 | -229,367 | -13062,18 | 13064,2 | 280 | -1044,6 | -13103,94 |
| 8735,62 | 480 | 17471,24 | 4054,358 | -16994,3 | -1137,96 | 1764,5 | 2099,59 | 660 | 1778,44 | -13465,38 | 808,687 | -13216,81 | 13241,53 | 290 | -161,063 | -12968,24 |
| 8895,56 | 490 | 17791,13 | 3382,726 | -17466,58 | -313,232 | 1541 | 1572,5 | 670 | 2756,26 | -14384,6 | 1647,6 | -13755,67 | 13853,99 | 300 | 538,9373 | -13126,73 |
| 8965,09 | 500 | 17930,17 | 2649,209 | -17733,38 | 325,081 | 1034,9 | 1084,72 | 680 | 3299,37 | -15663,66 | 2235,08 | -14620 | 14789,87 | 310 | 1170,795 | -13576,35 |
| 8955,4 | 510 | 17910,8 | 1908,614 | -17808,82 | 675,678 | 360,74 | 765,947 | 690 | 3259,97 | -17087,33 | 2149 | -15455,65 | 15604,34 | 320 | 1038,029 | -13823,97 |
| 8885,92 | 520 | 17771,83 | 1205,901 | -17730,87 | 701,042 | -326,68 | 773,42 | 700 | 2607,98 | -18384,23 | 1591,66 | -16044,34 | 16123,1 | 330 | 575,3263 | -13704,45 |
| 8790,72 | 530 | 17581,44 | 570,4001 | -17572,19 | 438,703 | -859,24 | 964,76 | 710 | 1447,81 | -19290,68 | 723,827 | -16134,93 | 16151,15 | 340 | -0,15216 | -12979,18 |
| 8693,62 | 540 | 17387,25 | 1,62E-12 | -17387,25 | 8,2E-13 | -1114,4 | 1114,37 | 720 | 3,3E-12 | -19615,98 | -251,724 | -15200,44 | 15202,52 | 350 | -503,448 | -10784,89 |
| 8606,28 | 550 | 17212,55 | -524,741 | -17204,55 | 262,37 | -1205,5 | 1233,71 | 0 | 0 | -19615,53 | -7,4E-13 | -13268,22 | 13268,22 | 360 | -1,5E-12 | -6920,914 |
| 8521,96 | 560 | 17043,93 | -1023,74 | -17013,15 | -225,356 | -1196,8 | 1217,88 | 10 | -1474,5 | -19406,85 | 2416,89 | -2443,948 | 3437,182 | 370 | 6308,228 | 14518,955 |
| 8421,53 | 570 | 16843,05 | -1500,47 | -16776,09 | -579,757 | -857,95 | 1035,47 | 20 | -2660 | -18491,98 | 3069,21 | -6618,921 | 7295,901 | 380 | 8798,399 | 5254,1382 |
| 8283,89 | 580 | 16567,78 | -1936,37 | -16454,23 | -699,2 | -363,68 | 788,128 | 30 | -3334,8 | -17181,6 | 2512,23 | -9813,867 | 10130,32 | 390 | 8359,235 | -2446,139 |
| 8089,69 | 590 | 16179,37 | -2289,58 | -16016,55 | -551,91 | 138,2 | 568,949 | 40 | -3393,4 | -15740,15 | 1323,15 | -11903,06 | 11976,37 | 400 | 6039,696 | -8065,964 |
| 7826,54 | 600 | 15653,07 | -2497,43 | -15452,56 | -183,836 | 506,24 | 538,583 | 50 | -2865,1 | -14440,08 | 1073,57 | -12432,2 | 12478,47 | 410 | 5012,228 | -10424,32 |
| 7495,6 | 610 | 14991,19 | -2483,46 | -14784,06 | 293,149 | 643,12 | 706,783 | 60 | -1897,2 | -13497,81 | 1508,25 | -12567,42 | 12657,61 | 420 | 4913,665 | -11637,03 |
| 7130 | 620 | 14260,01 | -2198,15 | -14089,57 | 744,374 | 530,26 | 913,928 | 70 | -709,4 | -13029,06 | 2096,83 | -12832,99 | 13003,17 | 430 | 4903,07 | -12636,93 |
| 6773,25 | 630 | 13546,5 | -1555,59 | -13456,89 | 1010,5 | 210,98 | 1032,28 | 80 | 465,405 | -13034,94 | 2662,77 | -13296,72 | 13560,72 | 440 | 4860,141 | -13558,51 |
| 6531,46 | 640 | 13062,93 | -588,872 | -13049,65 | 1012,71 | -185,36 | 1029,53 | 90 | 1436,55 | -13420,36 | 3160,74 | -13949,5 | 14303,11 | 450 | 4884,928 | -14478,65 |
| 6516,8 | 650 | 13033,6 | 585,8678 | -13020,42 | 752,146 | -507,3 | 907,238 | 100 | 2090,16 | -14035,03 | 3465,53 | -14729,6 | 15131,79 | 460 | 4840,902 | -15424,17 |
| 6791,16 | 660 | 13582,31 | 1778,436 | -13465,38 | 309,19 | -627,86 | 699,863 | 110 | 2396,81 | -14721,1 | 3482,56 | -15510,04 | 15896,21 | 470 | 4568,301 | -16298,97 |
| 7323,14 | 670 | 14646,28 | 2756,261 | -14384,6 | -180,404 | -483,49 | 516,051 | 120 | 2395,45 | -15351,58 | 3224,91 | -16172,94 | 16491,33 | 480 | 4054,358 | -16994,3 |
| 8003,69 | 680 | 16007,38 | 3299,372 | -15663,66 | -567,504 | -93,399 | 575,139 | 130 | 2164,36 | -15850,46 | 2773,54 | -16658,52 | 16887,83 | 490 | 3382,726 | -17466,58 |
| 8697,76 | 690 | 17395,53 | 3259,969 | -17087,33 | -734,357 | 446,76 | 859,576 | 140 | 1791,26 | -16193,82 | 2220,23 | -16963,6 | 17108,28 | 500 | 2649,209 | -17733,38 |
| 9284,15 | 700 | 18568,29 | 2607,985 | -18384,23 | -628,558 | 993,33 | 1175,5 | 150 | 1350,87 | -16397,56 | 1629,74 | -17103,19 | 17180,66 | 510 | 1908,614 | -17808,82 |
| 9672,47 | 710 | 19344,93 | 1447,805 | -19290,68 | -277,258 | 1395,8 | 1423,03 | 160 | 893,29 | -16499,15 | 1049,6 | -17115,01 | 17147,17 | 520 | 1205,901 | -17730,87 |
| 9807,99 | 720 | 19615,98 | 3,25E-12 | -19615,98 | 221,079 | 1538,2 | 1553,99 | 170 | 442,157 | -16539,61 | 506,279 | -17055,9 | 17063,41 | 530 | 570,4001 | -17572,19 |

Таблица Г4 – Силы действующие на колено вала.

| Крк, Н | Рк, Н | Тк1, Н | Тк3, Н | Тк4, Н | Тк2, Н | Крк1, Н | Крк3, Н | Крк4, Н | Крк2, Н | Тк2=Тк4, Н | Тк3, Н | Кк2,4, Н | Кк3, Н | Фкв, град |
|----------|---------|------------|-----------|------------|-------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| -19527,1 | 19527,1 | 0 | 1,389E-12 | -5,064E-12 | 4,39942E-13 | -19527,126 | -16757,2899 | 7688,1023 | -16570,42 | 4,399E-13 | 9,1423E-13 | -2956,7064 | -16663,855 | 0 |
| -19248,8 | 19302,5 | -1438,2008 | -467,8138 | 6280,5907 | -445,886436 | -19248,811 | -16746,1928 | 14398,482 | -16569,64 | 992,31437 | -456,85011 | -2679,1705 | -16657,916 | 10 |
| -18387 | 18571,2 | -2609,3221 | -944,6914 | 10151,503 | -903,033417 | -18387 | -16701,6801 | 8058,2848 | -16537,543 | 1706,2887 | -923,86239 | -1849,457 | -16619,612 | 20 |
| -17097 | 17406,5 | -3267,6696 | -1428,115 | 8658,51 | -1368,92657 | -17097,036 | -16593,0211 | -2069,0259 | -16443,257 | 1898,743 | -1398,521 | -653,77957 | -16518,139 | 30 |
| -15680,4 | 16028 | -3319,9419 | -1894,306 | 6168,6173 | -1819,90267 | -15680,394 | -16378,7402 | -7961,0816 | -16245,227 | 1500,0392 | -1857,1041 | 564,83317 | -16311,984 | 40 |
| -14403,2 | 14671,4 | -2792,6774 | -2292,798 | 4687,9749 | -2204,68291 | -14403,163 | -16020,8224 | -10589,622 | -15903,941 | 587,99453 | -2248,7404 | 1500,7772 | -15962,381 | 50 |
| -13480 | 13603,9 | -1831,9126 | -2548,188 | 4039,4555 | -2474,62172 | -13479,987 | -15502,8239 | -11875,876 | -15429,975 | -642,70915 | -2511,4049 | 1949,9877 | -15466,399 | 60 |
| -13025,3 | 13041,8 | -655,82028 | -2571,779 | 3960,2013 | -2537,28803 | -13025,312 | -14848,2341 | -12702,806 | -14823,172 | -1881,4677 | -2554,5334 | 1797,86 | -14835,703 | 70 |
| -13040,2 | 13050,1 | 509,42359 | -2284,002 | 4143,1024 | -2323,20882 | -13040,183 | -14132,9232 | -13473,086 | -14152,723 | -2832,6324 | -2303,6053 | 1112,54 | -14142,823 | 80 |
| -13433,4 | 13514,6 | 1478,9881 | -1644,444 | 4333,2363 | -1805,10246 | -13433,384 | -13484,1618 | -14309,335 | -13533,467 | -3284,0906 | -1724,7733 | 100,08247 | -13508,814 | 90 |
| -14029,8 | 14183,1 | 2079,767 | -681,0371 | 4367,4082 | -1027,96334 | -14029,784 | -13060,6282 | -15185,053 | -13101,96 | -3107,7303 | -854,50021 | -927,82395 | -13081,294 | 100 |
| -14714,3 | 14906,7 | 2387,4335 | 493,65145 | 4178,94 | -126,858654 | -14714,283 | -13013,9818 | -16016,052 | -12970,629 | -2514,2921 | 183,396399 | -1743,6537 | -12992,305 | 110 |
| -15343,5 | 15528,1 | 2387,2637 | 1689,8103 | 3778,2379 | 678,2064753 | -15343,469 | -13441,1637 | -16720,875 | -13164,784 | -1709,0572 | 1184,00839 | -2178,6849 | -13302,974 | 120 |
| -15841,3 | 15987,6 | 2157,4767 | 2675,0176 | 3221,2374 | 1115,222922 | -15841,323 | -14343,1819 | -17252,371 | -13548,018 | -1042,2538 | 1895,12027 | -2293,3044 | -13945,6 | 130 |
| -16188 | 16286,4 | 1788,0085 | 3229,1832 | 2577,7526 | 922,5378277 | -16187,995 | -15606,5585 | -17605,156 | -13730,013 | -865,47065 | 2075,86053 | -2457,9821 | -14668,285 | 140 |
| -16395,7 | 16451,2 | 1350,1415 | 3204,1278 | 1769,6623 | -35,0591241 | -16395,725 | -17016,9683 | -17457,23 | -12935,315 | -1385,2006 | 1584,53432 | -3460,4108 | -14976,141 | 150 |
| -16501,7 | 16525,9 | 893,94258 | 2569,1722 | 1058,3268 | -1462,66786 | -16501,724 | -18303,7944 | -17149,416 | -9948,2878 | -2356,6104 | 553,252187 | -6553,4365 | -14126,041 | 160 |
| -16551,4 | 16557,3 | 443,61766 | 1427,911 | 467,81378 | -2216,29727 | -16551,373 | -19203,956 | -16746,193 | -3318,3421 | -2659,9149 | -394,19313 | -13233,03 | -11261,149 | 170 |
| -16570,4 | 16570,4 | 4,399E-13 | 3,209E-12 | 1,389E-12 | -5,0642E-12 | -16570,42 | -19527,1263 | -16757,29 | 7688,1023 | -5,504E-12 | -9,277E-13 | -24258,522 | -5919,512 | 180 |
| -16569,6 | 16575,6 | -445,88644 | 0 | -467,81378 | 6280,590721 | -16569,64 | -19527,1263 | -16746,193 | 14398,482 | 6726,4772 | 3140,29536 | -30968,122 | -2564,3222 | 190 |
| -16537,5 | 16562,2 | -903,03342 | -1438,201 | -944,69135 | 10151,50321 | -16537,543 | -19248,8107 | -16701,68 | 8058,2848 | 11054,537 | 4356,6512 | -24595,828 | -5595,2629 | 200 |
| -16443,3 | 16500,1 | -1368,9266 | -2609,322 | -1428,1154 | 8658,50995 | -16443,257 | -18387,0003 | -16593,021 | -2069,0259 | 10027,437 | 3024,59391 | -14374,231 | -10228,013 | 210 |
| -16245,2 | 16346,8 | -1819,9027 | -3267,67 | -1894,3056 | 6168,617285 | -16245,227 | -17097,0364 | -16378,74 | -7961,0816 | 7988,52 | 1450,47384 | -8284,1458 | -12529,059 | 220 |
| -15903,9 | 16056 | -2204,6829 | -3319,942 | -2292,7978 | 4687,974906 | -15903,941 | -15680,3942 | -16020,822 | -10589,622 | 6892,6578 | 684,016495 | -5314,3182 | -13135,008 | 230 |
| -15430 | 15627,2 | -2474,6217 | -2792,677 | -2548,1882 | 4039,455497 | -15429,975 | -14403,1634 | -15502,824 | -11875,876 | 6514,0772 | 623,389026 | -3554,0992 | -13139,52 | 240 |
| -14823,2 | 15038,8 | -2537,288 | -1831,913 | -2571,7788 | 3960,201303 | -14823,172 | -13479,9874 | -14848,234 | -12702,806 | 6497,4893 | 1064,14437 | -2120,3658 | -13091,397 | 250 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|---------|------------|-----------|------------|-------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----|
| -14152,7 | 14342,1 | -2323,2088 | -655,8203 | -2284,0018 | 4143,102389 | -14152,723 | -13025,312 | -14132,923 | -13473,086 | 6466,3112 | 1743,64106 | -679,63731 | -13249,199 | 260 |
| -13533,5 | 13653,3 | -1805,1025 | 509,42359 | -1644,4441 | 4333,236278 | -13533,467 | -13040,1829 | -13484,162 | -14309,335 | 6138,3387 | 2421,32993 | 775,86861 | -13674,759 | 270 |
| -13102 | 13142,2 | -1027,9633 | 1478,9881 | -681,03708 | 4367,408171 | -13101,96 | -13433,3844 | -13060,628 | -15185,053 | 5395,3715 | 2923,19815 | 2083,093 | -14309,219 | 280 |
| -12970,6 | 12971,2 | -126,85865 | 2079,767 | 493,65145 | 4178,940018 | -12970,629 | -14029,7837 | -13013,982 | -16016,052 | 4305,7987 | 3129,3535 | 3045,4233 | -15022,918 | 290 |
| -13164,8 | 13182,2 | 678,20648 | 2387,4335 | 1689,8103 | 3778,237867 | -13164,784 | -14714,2825 | -13441,164 | -16720,875 | 3100,0314 | 3082,83566 | 3556,0908 | -15717,579 | 300 |
| -13548 | 13593,8 | 1115,2229 | 2387,2637 | 2675,0176 | 3221,237381 | -13548,018 | -15343,4691 | -14343,182 | -17252,371 | 2106,0145 | 2804,25053 | 3704,3523 | -16297,92 | 310 |
| -13730 | 13761 | 922,53783 | 2157,4767 | 3229,1832 | 2577,752568 | -13730,013 | -15841,3229 | -15606,558 | -17605,156 | 1655,2147 | 2367,61465 | 3875,1431 | -16723,239 | 320 |
| -12935,3 | 12935,4 | -35,059124 | 1788,0085 | 3204,1278 | 1769,662294 | -12935,315 | -16187,9946 | -17016,968 | -17457,23 | 1804,7214 | 1778,83539 | 4521,9151 | -16822,612 | 330 |
| -9948,29 | 10055,2 | -1462,6679 | 1350,1415 | 2569,1722 | 1058,326802 | -9948,2878 | -16395,7254 | -18303,794 | -17149,416 | 2520,9947 | 1204,23415 | 7201,1285 | -16772,571 | 340 |
| -3318,34 | 3990,41 | -2216,2973 | 893,94258 | 1427,911 | 467,8137836 | -3318,3421 | -16501,7243 | -19203,956 | -16746,193 | 2684,111 | 680,878183 | 13427,851 | -16623,959 | 350 |
| 7688,1 | 7688,1 | -5,064E-12 | 443,61766 | 3,209E-12 | 1,38851E-12 | 7688,1023 | -16551,3726 | -19527,126 | -16757,29 | 6,453E-12 | 221,808828 | 24445,392 | -16654,331 | 360 |
| 14398,5 | 15708,7 | 6280,5907 | 4,399E-13 | -1438,2008 | -467,813784 | 14398,482 | -16570,4199 | -19248,811 | -16746,193 | -6748,4045 | -233,90689 | 31144,675 | -16658,306 | 370 |
| 8058,28 | 12961,1 | 10151,503 | -445,8864 | -2609,3221 | -944,691354 | 8058,2848 | -16569,6401 | -18387 | -16701,68 | -11096,195 | -695,28889 | 24759,965 | -16635,66 | 380 |
| -2069,03 | 8902,28 | 8658,51 | -903,0334 | -3267,6696 | -1428,11542 | -2069,0259 | -16537,5432 | -17097,036 | -16593,021 | -10086,625 | -1165,5744 | 14523,995 | -16565,282 | 390 |
| -7961,08 | 10071,3 | 6168,6173 | -1368,927 | -3319,9419 | -1894,30562 | -7961,0816 | -16443,2569 | -15680,394 | -16378,74 | -8062,9229 | -1631,6161 | 8417,6586 | -16410,999 | 400 |
| -10589,6 | 11580,9 | 4687,9749 | -1819,903 | -2792,6774 | -2292,79782 | -10589,622 | -16245,2273 | -14403,163 | -16020,822 | -6980,7727 | -2056,3502 | 5431,2001 | -16133,025 | 410 |
| -11875,9 | 12544,1 | 4039,4555 | -2204,683 | -1831,9126 | -2548,18815 | -11875,876 | -15903,9405 | -13479,987 | -15502,824 | -6587,6437 | -2376,4355 | 3626,948 | -15703,382 | 420 |
| -12702,8 | 13305,8 | 3960,2013 | -2474,622 | -655,82028 | -2571,77876 | -12702,806 | -15429,9751 | -13025,312 | -14848,234 | -6531,9801 | -2523,2002 | 2145,4279 | -15139,105 | 430 |
| -13473,1 | 14095,7 | 4143,1024 | -2537,288 | 509,42359 | -2284,00182 | -13473,086 | -14823,172 | -13040,183 | -14132,923 | -6427,1042 | -2410,6449 | 659,83761 | -14478,048 | 440 |
| -14309,3 | 14951,1 | 4333,2363 | -2323,209 | 1478,9881 | -1644,44413 | -14309,335 | -14152,7229 | -13433,384 | -13484,162 | -5977,6804 | -1983,8265 | -825,17366 | -13818,442 | 450 |
| -15185,1 | 15800,6 | 4367,4082 | -1805,102 | 2079,767 | -681,037084 | -15185,053 | -13533,4668 | -14029,784 | -13060,628 | -5048,4453 | -1243,0698 | -2124,4244 | -13297,048 | 460 |
| -16016,1 | 16552,3 | 4178,94 | -1027,963 | 2387,4335 | 493,6514529 | -16016,052 | -13101,9597 | -14714,283 | -13013,982 | -3685,2886 | -267,15594 | -3002,0704 | -13057,971 | 470 |
| -16720,9 | 17142,4 | 3778,2379 | -126,8587 | 2387,2637 | 1689,810296 | -16720,875 | -12970,6289 | -15343,469 | -13441,164 | -2088,4276 | 781,475821 | -3279,7113 | -13205,896 | 480 |
| -17252,4 | 17550,5 | 3221,2374 | 678,20648 | 2157,4767 | 2675,017624 | -17252,371 | -13164,7843 | -15841,323 | -14343,182 | -546,21976 | 1676,61205 | -2909,1889 | -13753,983 | 490 |
| -17605,2 | 17792,9 | 2577,7526 | 1115,2229 | 1788,0085 | 3229,183235 | -17605,156 | -13548,0185 | -16187,995 | -15606,558 | 651,43067 | 2172,20308 | -1998,5972 | -14577,288 | 500 |
| -17457,2 | 17546,7 | 1769,6623 | 922,53783 | 1350,1415 | 3204,127771 | -17457,23 | -13730,0125 | -16395,725 | -17016,968 | 1434,4655 | 2063,3328 | -440,26139 | -15373,49 | 510 |
| -17149,4 | 17182 | 1058,3268 | -35,05912 | 893,94258 | 2569,172233 | -17149,416 | -12935,3146 | -16501,724 | -18303,794 | 1510,8454 | 1267,05655 | 1154,3781 | -15619,554 | 520 |
| -16746,2 | 16752,7 | 467,81378 | -1462,668 | 443,61766 | 1427,911014 | -16746,193 | -9948,28779 | -16551,373 | -19203,956 | 960,09723 | -17,378423 | 2457,7633 | -14576,122 | 530 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|---------|------------|-----------|------------|-------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----|
| -16757,3 | 16757,3 | 1,389E-12 | -2216,297 | 4,399E-13 | 3,20873E-12 | -16757,29 | -3318,34211 | -16570,42 | -19527,126 | 1,82E-12 | -1108,1486 | 2769,8363 | -11422,734 | 540 |
| -16746,2 | 16752,7 | -467,81378 | -5,06E-12 | -445,88644 | 0 | -16746,193 | 7688,10233 | -16569,64 | -19527,126 | 467,81378 | -2,532E-12 | 2780,9335 | -5919,512 | 550 |
| -16701,7 | 16728,4 | -944,69135 | 6280,5907 | -903,03342 | -1438,2008 | -16701,68 | 14398,4819 | -16537,543 | -19248,811 | -493,50945 | 2421,19496 | 2547,1306 | -2425,1644 | 560 |
| -16593 | 16654,4 | -1428,1154 | 10151,503 | -1368,9266 | -2609,32213 | -16593,021 | 8058,28479 | -16443,257 | -18387 | -1181,2067 | 3771,09054 | 1793,9791 | -5164,3577 | 570 |
| -16378,7 | 16487,9 | -1894,3056 | 8658,51 | -1819,9027 | -3267,66961 | -16378,74 | -2069,02586 | -16245,227 | -17097,036 | -1373,364 | 2695,42017 | 718,29628 | -9583,0312 | 580 |
| -16020,8 | 16184,1 | -2292,7978 | 6168,6173 | -2204,6829 | -3319,94191 | -16020,822 | -7961,08157 | -15903,941 | -15680,394 | -1027,1441 | 1424,33768 | -340,42826 | -11820,738 | 590 |
| -15502,8 | 15710,9 | -2548,1882 | 4687,9749 | -2474,6217 | -2792,67744 | -15502,824 | -10589,6224 | -15429,975 | -14403,163 | -244,48929 | 947,64873 | -1099,6605 | -12496,393 | 600 |
| -14848,2 | 15069,3 | -2571,7788 | 4039,4555 | -2537,288 | -1831,91257 | -14848,234 | -11875,8759 | -14823,172 | -13479,987 | 739,86619 | 1103,77146 | -1368,2468 | -12677,932 | 610 |
| -14132,9 | 14316,3 | -2284,0018 | 3960,2013 | -2323,2088 | -655,820278 | -14132,923 | -12702,8062 | -14152,723 | -13025,312 | 1628,1815 | 1652,19051 | -1107,6112 | -12864,059 | 620 |
| -13484,2 | 13584,1 | -1644,4441 | 4143,1024 | -1805,1025 | 509,4235863 | -13484,162 | -13473,0856 | -13533,467 | -13040,183 | 2153,8677 | 2326,26299 | -443,97893 | -13256,634 | 630 |
| -13060,6 | 13078,4 | -681,03708 | 4333,2363 | -1027,9633 | 1478,988134 | -13060,628 | -14309,3355 | -13101,96 | -13433,384 | 2160,0252 | 2906,11221 | 372,75612 | -13871,36 | 640 |
| -13014 | 13023,3 | 493,65145 | 4367,4082 | -126,85865 | 2079,766977 | -13013,982 | -15185,0527 | -12970,629 | -14029,784 | 1586,1155 | 3223,58757 | 1015,8019 | -14607,418 | 650 |
| -13441,2 | 13547 | 1689,8103 | 4178,94 | 678,20648 | 2387,433461 | -13441,164 | -16016,0522 | -13164,784 | -14714,283 | 697,62317 | 3283,18674 | 1273,1188 | -15365,167 | 660 |
| -14343,2 | 14590,5 | 2675,0176 | 3778,2379 | 1115,2229 | 2387,26368 | -14343,182 | -16720,8751 | -13548,018 | -15343,469 | -287,75394 | 3082,75077 | 1000,2873 | -16032,172 | 670 |
| -15606,6 | 15937,1 | 3229,1832 | 3221,2374 | 922,53783 | 2157,476731 | -15606,558 | -17252,3708 | -13730,013 | -15841,323 | -1071,7065 | 2689,35706 | 234,76445 | -16546,847 | 680 |
| -17017 | 17316 | 3204,1278 | 2577,7526 | -35,059124 | 1788,008476 | -17016,968 | -17605,1557 | -12935,315 | -16187,995 | -1416,1193 | 2182,88052 | -828,97364 | -16896,575 | 690 |
| -18303,8 | 18483,2 | 2569,1722 | 1769,6623 | -1462,6679 | 1350,141495 | -18303,794 | -17457,2297 | -9948,2878 | -16395,725 | -1219,0307 | 1559,90189 | -1908,069 | -16926,478 | 700 |
| -19204 | 19257 | 1427,911 | 1058,3268 | -2216,2973 | 893,9425815 | -19203,956 | -17149,4163 | -3318,3421 | -16501,724 | -533,96843 | 976,134692 | -2702,2317 | -16825,57 | 710 |
| -19527,1 | 19527,1 | 3,209E-12 | 467,81378 | -5,064E-12 | 443,6176559 | -19527,126 | -16746,1928 | 7688,1023 | -16551,373 | 443,61766 | 455,71572 | -2975,7537 | -16648,783 | 720 |

Таблица Г5 – Силы действующие на шатунную шейку

| $K_{Rш}, Н$ | $R_k, Н$ | $R_k, Н$ | $\psi, рад$ | $\psi, град$ | $Rш.ш., Н$ | $\varphi_{кв}, град$ |
|-------------|----------|-------------|-------------|--------------|------------|----------------------|
| -4927,9675 | -11475,6 | 11475,60171 | 0 | 0 | 11476 | 0 |
| -4927,9675 | -11197,3 | 11197,28609 | 0,1277425 | 7,3191063 | 11289 | 10 |
| -4927,9675 | -10335,5 | 10335,47568 | 0,2472952 | 14,168969 | 10660 | 20 |
| -4927,9675 | -9045,51 | 9045,511875 | 0,3466596 | 19,862133 | 9617,6 | 30 |
| -4927,9675 | -7628,87 | 7628,869601 | 0,4104627 | 23,517778 | 8320 | 40 |
| -4927,9675 | -6351,64 | 6351,638782 | 0,4142373 | 23,734048 | 6938,5 | 50 |
| -4927,9675 | -5428,46 | 5428,462777 | 0,3254638 | 18,647704 | 5729,2 | 60 |
| -4927,9675 | -4973,79 | 4973,78744 | 0,131099 | 7,5114219 | 5016,8 | 70 |
| -4927,9675 | -4988,66 | 4988,658294 | -0,1017636 | -5,8306253 | 5014,6 | 80 |
| -4927,9675 | -5381,86 | 5381,859799 | -0,2681894 | -15,366122 | 5581,4 | 90 |
| -4927,9675 | -5978,26 | 5978,259104 | -0,3347924 | -19,182193 | 6329,7 | 100 |
| -4927,9675 | -6662,76 | 6662,757976 | -0,3440721 | -19,713877 | 7077,6 | 110 |
| -4927,9675 | -7291,94 | 7291,944573 | -0,3163863 | -18,127602 | 7672,8 | 120 |
| -4927,9675 | -7789,8 | 7789,798327 | -0,2701892 | -15,4807 | 8083 | 130 |
| -4927,9675 | -8136,47 | 8136,470052 | -0,2163141 | -12,393884 | 8330,6 | 140 |
| -4927,9675 | -8344,2 | 8344,200834 | -0,1604157 | -9,1911399 | 8452,7 | 150 |
| -4927,9675 | -8450,2 | 8450,199745 | -0,1053975 | -6,0388322 | 8497,4 | 160 |
| -4927,9675 | -8499,85 | 8499,848007 | -0,0521439 | -2,9876274 | 8511,4 | 170 |
| -4927,9675 | -8518,9 | 8518,895321 | -5,164E-17 | -2,959E-15 | 8518,9 | 180 |
| -4927,9675 | -8518,12 | 8518,115563 | 0,0522979 | 2,9964509 | 8529,8 | 190 |
| -4927,9675 | -8486,02 | 8486,01864 | 0,1060153 | 6,0742288 | 8533,9 | 200 |
| -4927,9675 | -8391,73 | 8391,732304 | 0,1617037 | 9,2649392 | 8502,7 | 210 |
| -4927,9675 | -8193,7 | 8193,702774 | 0,2185619 | 12,522676 | 8393,4 | 220 |
| -4927,9675 | -7852,42 | 7852,415968 | 0,2737179 | 15,682879 | 8156 | 230 |
| -4927,9675 | -7378,45 | 7378,45048 | 0,3235959 | 18,540681 | 7782,4 | 240 |
| -4927,9675 | -6771,65 | 6771,647407 | 0,3585014 | 20,540616 | 7231,4 | 250 |
| -4927,9675 | -6101,2 | 6101,198321 | 0,3638276 | 20,845788 | 6528,5 | 260 |
| -4927,9675 | -5481,94 | 5481,942265 | 0,3180995 | 18,225761 | 5771,5 | 270 |
| -4927,9675 | -5050,44 | 5050,435154 | 0,2007967 | 11,504801 | 5154 | 280 |
| -4927,9675 | -4919,1 | 4919,104315 | 0,0257833 | 1,4772719 | 4920,7 | 290 |
| -4927,9675 | -5113,26 | 5113,259715 | -0,1318671 | -7,5554292 | 5158 | 300 |
| -4927,9675 | -5496,49 | 5496,493898 | -0,2001797 | -11,469453 | 5608,5 | 310 |
| -4927,9675 | -5678,49 | 5678,487967 | -0,1610548 | -9,2277583 | 5752,9 | 320 |
| -4927,9675 | -4883,79 | 4883,789992 | 0,0071785 | 0,4113005 | 4883,9 | 330 |
| -4927,9675 | -1896,76 | 1896,763213 | 0,6568933 | 37,637214 | 2395,2 | 340 |
| -4927,9675 | 4733,182 | -4733,18246 | -0,4379239 | -25,09119 | 5226,4 | 350 |
| -4927,9675 | 15739,63 | -15739,6269 | -3,217E-16 | -1,843E-14 | 15740 | 360 |
| -4927,9675 | 22450,01 | -22450,0065 | 0,2727852 | 15,62944 | 23312 | 370 |
| -4927,9675 | 16109,81 | -16109,8094 | 0,56229 | 32,216843 | 19042 | 380 |
| -4927,9675 | 5982,499 | -5982,49872 | 0,9661778 | 55,357908 | 10524 | 390 |
| -4927,9675 | 90,44301 | -90,4430064 | 1,5561356 | 89,160001 | 6169,3 | 400 |
| -4927,9675 | -2538,1 | 2538,097785 | -1,0745751 | -61,568619 | 5331 | 410 |

| | | | | | | |
|------------|----------|-------------|------------|------------|--------|-----|
| -4927,9675 | -3824,35 | 3824,351293 | -0,812745 | -46,566861 | 5562,6 | 420 |
| -4927,9675 | -4651,28 | 4651,281654 | -0,7053188 | -40,411788 | 6108,8 | 430 |
| -4927,9675 | -5421,56 | 5421,561007 | -0,652521 | -37,386699 | 6823,4 | 440 |
| -4927,9675 | -6257,81 | 6257,810878 | -0,6056425 | -34,700759 | 7611,6 | 450 |
| -4927,9675 | -7133,53 | 7133,528116 | -0,5493686 | -31,4765 | 8364,3 | 460 |
| -4927,9675 | -7964,53 | 7964,527664 | -0,4832071 | -27,685728 | 8994,3 | 470 |
| -4927,9675 | -8669,35 | 8669,350478 | -0,4109957 | -23,548322 | 9456,9 | 480 |
| -4927,9675 | -9200,85 | 9200,846231 | -0,3367659 | -19,295267 | 9748,4 | 490 |
| -4927,9675 | -9553,63 | 9553,631081 | -0,2635433 | -15,099917 | 9895,3 | 500 |
| -4927,9675 | -9405,71 | 9405,705087 | -0,1859736 | -10,655504 | 9570,7 | 510 |
| -4927,9675 | -9097,89 | 9097,891682 | -0,1158061 | -6,6352015 | 9159,2 | 520 |
| -4927,9675 | -8694,67 | 8694,668199 | -0,0537528 | -3,079811 | 8707,2 | 530 |
| -4927,9675 | -8705,77 | 8705,765369 | -1,595E-16 | -9,138E-15 | 8705,8 | 540 |
| -4927,9675 | -8694,67 | 8694,668199 | 0,0537528 | 3,079811 | 8707,2 | 550 |
| -4927,9675 | -8650,16 | 8650,155499 | 0,1087798 | 6,2326237 | 8701,6 | 560 |
| -4927,9675 | -8541,5 | 8541,496534 | 0,165665 | 9,4919027 | 8660,1 | 570 |
| -4927,9675 | -8327,22 | 8327,215595 | 0,2236772 | 12,815758 | 8540 | 580 |
| -4927,9675 | -7969,3 | 7969,297864 | 0,2801381 | 16,050732 | 8292,6 | 590 |
| -4927,9675 | -7451,3 | 7451,299306 | 0,3295114 | 18,879613 | 7875 | 600 |
| -4927,9675 | -6796,71 | 6796,709546 | 0,3617358 | 20,725934 | 7267 | 610 |
| -4927,9675 | -6081,4 | 6081,398614 | 0,3592719 | 20,584762 | 6496,2 | 620 |
| -4927,9675 | -5432,64 | 5432,63722 | 0,2939295 | 16,840917 | 5676,1 | 630 |
| -4927,9675 | -5009,1 | 5009,103675 | 0,1351313 | 7,742453 | 5055,2 | 640 |
| -4927,9675 | -4962,46 | 4962,457254 | -0,099151 | -5,6809351 | 4987 | 650 |
| -4927,9675 | -5389,64 | 5389,639136 | -0,3038224 | -17,407742 | 5648,3 | 660 |
| -4927,9675 | -6291,66 | 6291,657309 | -0,4020138 | -23,033693 | 6836,7 | 670 |
| -4927,9675 | -7555,03 | 7555,033878 | -0,4039198 | -23,142901 | 8216,2 | 680 |
| -4927,9675 | -8965,44 | 8965,443694 | -0,3432399 | -19,666199 | 9520,8 | 690 |
| -4927,9675 | -10252,3 | 10252,26983 | -0,245539 | -14,068349 | 10569 | 700 |
| -4927,9675 | -11152,4 | 11152,43145 | -0,127343 | -7,2962171 | 11243 | 710 |
| -4927,9675 | -11475,6 | 11475,60171 | -2,796E-16 | -1,602E-14 | 11476 | 720 |

Таблица Г6 – силы, действующие на 3-ю коренную шейку.

| R _{к.ш i} | Значения R _{к.ш i} , Н, для лучей | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--|----------|---------|---|---|---|---|---|---|----|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| R _{к.ш 0} | 16968,32 | 16968,32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16968,3 |
| R _{к.ш 10} | 16879,01 | 16879,01 | 16879 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16879 |
| R _{к.ш 20} | 16783,55 | 16783,55 | 16783,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16783,5 |
| R _{к.ш 30} | 16647,98 | 16647,98 | 16648 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16648 |
| R _{к.ш 40} | 16430,08 | 16430,08 | 16430,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16430,1 |
| R _{к.ш 50} | 16088,38 | 16088,38 | 16088,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16088,4 |
| R _{к.ш 60} | 15595,15 | 15595,15 | 15595,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15595,2 |
| R _{к.ш 70} | 15012,71 | 15012,71 | 15012,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15012,7 |
| R _{к.ш 80} | 14288,47 | 14288,47 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14288,5 | 14288,5 |
| R _{к.ш 90} | 13603,34 | 13603,34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13603,3 | 13603,3 |
| R _{к.ш 100} | 13102,28 | 13102,28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13102,3 | 13102,3 |
| R _{к.ш 110} | 12996,07 | 12996,07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12996,1 | 12996,1 |
| R _{к.ш 120} | 13346,45 | 13346,45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13346,4 | 13346,4 |
| R _{к.ш 130} | 14117,69 | 14117,69 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14117,7 | 14117,7 |
| R _{к.ш 140} | 14902,46 | 14902,46 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14902,5 | 14902,5 |
| R _{к.ш 150} | 15514,86 | 15514,86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15514,9 | 15514,9 |
| R _{к.ш 160} | 15735,82 | 15735,82 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15735,8 | 15735,8 |
| R _{к.ш 170} | 15045,2 | 15045,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15045,2 | 15045,2 |
| R _{к.ш 180} | 13268,45 | 13268,45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13268,4 |
| R _{к.ш 190} | 4054,897 | 4054,897 | 4054,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4054,9 |
| R _{к.ш 200} | 7967,738 | 7967,738 | 7967,74 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7967,74 |
| R _{к.ш 210} | 10849,96 | 10849,96 | 10850 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10850 |
| R _{к.ш 220} | 12696,02 | 12696,02 | 12696 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12696 |
| R _{к.ш 230} | 13107,25 | 13107,25 | 13107,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13107,3 |
| R _{к.ш 240} | 13078,73 | 13078,73 | 13078,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13078,7 |
| R _{к.ш 250} | 13153,52 | 13153,52 | 13153,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13153,5 |
| R _{к.ш 260} | 13454,81 | 13454,81 | 13454,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13454,8 |
| R _{к.ш 270} | 14014,49 | 14014,49 | 14014,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14014,5 |
| R _{к.ш 280} | 14759,85 | 14759,85 | 14759,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14759,9 |
| R _{к.ш 290} | 15528,1 | 15528,1 | 15528,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15528,1 |
| R _{к.ш 300} | 16182,43 | 16182,43 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16182,4 | 16182,4 |
| R _{к.ш 310} | 16661,47 | 16661,47 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16661,5 | 16661,5 |
| R _{к.ш 320} | 16963,53 | 16963,53 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16963,5 | 16963,5 |
| R _{к.ш 330} | 17101,67 | 17101,67 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17101,7 | 17101,7 |
| R _{к.ш 340} | 17112,04 | 17112,04 | 17112 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17112 |
| R _{к.ш 350} | 17051,38 | 17051,38 | 17051,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17051,4 |
| R _{к.ш 360} | 16964,87 | 16964,87 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16964,9 |
| R _{к.ш 370} | 16879,01 | 16879,01 | 16879 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16879 |
| R _{к.ш 380} | 16792,39 | 16792,39 | 16792,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| R _{к.ш 390} | 16680,61 | 16680,61 | 16680,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| R _{к.ш 400} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16507,9 | 16507,9 |
| R _{к.ш 410} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16233,9 | 16233,9 |
| R _{к.ш 420} | 15824,12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15824,1 | 15824,1 |
| R _{к.ш 430} | 15264,01 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15264 | 15264 |
| R _{к.ш 440} | 14646,75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14646,7 | 14646,7 |
| R _{к.ш 450} | 13928,22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13928,2 | 13928,2 |
| R _{к.ш 460} | 13348,99 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13349 | 13349 |
| R _{к.ш 470} | 13064,2 | 13064,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13064,2 | 13064,2 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----------|----------|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|---------|---------|
| R _{к.ш} 480 | 13241,53 | 13241,53 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13241,5 | 13241,5 |
| R _{к.ш} 490 | 13853,99 | 13853,99 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13854 | 13854 |
| R _{к.ш} 500 | 14789,87 | 14789,87 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14789,9 | 14789,9 |
| R _{к.ш} 510 | 15604,34 | 15604,34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15604,3 | 15604,3 |
| R _{к.ш} 520 | 16123,1 | 16123,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16123,1 | 16123,1 |
| R _{к.ш} 530 | 16151,15 | 16151,15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16151,2 | 16151,2 |
| R _{к.ш} 540 | 15202,52 | 15202,52 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15202,5 |
| R _{к.ш} 550 | 13268,22 | 13268,22 | 13268,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13268,2 |
| R _{к.ш} 560 | 3437,182 | 3437,182 | 3437,18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3437,18 |
| R _{к.ш} 570 | 7295,901 | 7295,901 | 7295,9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7295,9 |
| R _{к.ш} 580 | 10130,32 | 10130,32 | 10130,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10130,3 |
| R _{к.ш} 590 | 11976,37 | 11976,37 | 11976,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11976,4 |
| R _{к.ш} 600 | 12478,47 | 12478,47 | 12478,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12478,5 |
| R _{к.ш} 610 | 12657,61 | 12657,61 | 12657,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12657,6 |
| R _{к.ш} 620 | 13003,17 | 13003,17 | 13003,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13003,2 |
| R _{к.ш} 630 | 13560,72 | 13560,72 | 13560,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13560,7 |
| R _{к.ш} 640 | 14303,11 | 14303,11 | 14303,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14303,1 |
| R _{к.ш} 650 | 15131,79 | 15131,79 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15131,8 | 15131,8 |
| R _{к.ш} 660 | 15896,21 | 15896,21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15896,2 | 15896,2 |
| R _{к.ш} 670 | 16491,33 | 16491,33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16491,3 | 16491,3 |
| R _{к.ш} 680 | 16887,83 | 16887,83 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16887,8 | 16887,8 |
| R _{к.ш} 690 | 17108,28 | 17108,28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17108,3 | 17108,3 |
| R _{к.ш} 700 | 17180,66 | 17180,66 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17180,7 | 17180,7 |
| R _{к.ш} 710 | 17147,17 | 17147,17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17147,2 | 17147,2 |
| ΣR _{к.ш i} | 17063,41 | 17063,41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17063,4 |

Таблица Г7 - Суммарные силы действующие на 1-ю коренную шейку

| Rк.ш i | Значения Rк.ш i, Н, для лучей | | | | | | | | | | | |
|----------|-------------------------------|-----------|-----------|---|---|---|---|---|---|----|-----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Rк.ш 0 | 9763,5631 | 9763,5631 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9763,563 |
| Rк.ш 10 | 9651,2322 | 9651,2322 | 9651,2322 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9651,232 |
| Rк.ш 20 | 9285,6117 | 9285,6117 | 9285,6117 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9285,611 |
| Rк.ш 30 | 8703,2511 | 8703,2511 | 8703,2511 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8703,251 |
| Rк.ш 40 | 8013,9999 | 8013,9999 | 8013,9999 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8013,999 |
| Rк.ш 50 | 7335,7031 | 7335,7031 | 7335,7031 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7335,703 |
| Rк.ш 60 | 6801,9476 | 6801,9476 | 6801,9476 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6801,947 |
| Rк.ш 70 | 6520,9059 | 6520,9059 | 6520,9059 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6520,905 |
| Rк.ш 80 | 6525,0648 | 6525,0648 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6525,0648 | 6525,064 |
| Rк.ш 90 | 6757,278 | 6757,278 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6757,278 | 6757,278 |
| Rк.ш 100 | 7091,5489 | 7091,5489 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7091,5489 | 7091,548 |
| Rк.ш 110 | 7453,3541 | 7453,3541 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7453,3541 | 7453,354 |
| Rк.ш 120 | 7764,0369 | 7764,0369 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7764,0369 | 7764,036 |
| Rк.ш 130 | 7993,7822 | 7993,7822 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7993,7822 | 7993,782 |
| Rк.ш 140 | 8143,2203 | 8143,2203 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8143,2203 | 8143,220 |
| Rк.ш 150 | 8225,6108 | 8225,6108 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8225,6108 | 8225,610 |
| Rк.ш 160 | 8262,9601 | 8262,9601 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8262,9601 | 8262,960 |
| Rк.ш 170 | 8278,6583 | 8278,6583 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8278,6583 | 8278,658 |
| Rк.ш 180 | 8285,2099 | 8285,2099 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8285,209 |
| Rк.ш 190 | 8287,8192 | 8287,8192 | 8287,8192 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8287,819 |
| Rк.ш 200 | 8281,09 | 8281,09 | 8281,09 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8281,09 |
| Rк.ш 210 | 8250,0706 | 8250,0706 | 8250,0706 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8250,070 |
| Rк.ш 220 | 8173,4243 | 8173,4243 | 8173,4243 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8173,424 |
| Rк.ш 230 | 8028,0127 | 8028,0127 | 8028,0127 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8028,012 |
| Rк.ш 240 | 7813,5761 | 7813,5761 | 7813,5761 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7813,576 |
| Rк.ш 250 | 7519,3793 | 7519,3793 | 7519,3793 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7519,379 |
| Rк.ш 260 | 7171,068 | 7171,068 | 7171,068 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7171,068 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----------|-----------|-----------|-----------|---|---|---|---|---|---|---|-----------|-----------|
| Rк.ш 270 | 6826,6595 | 6826,6595 | 6826,6595 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6826,659 |
| Rк.ш 280 | 6571,1121 | 6571,1121 | 6571,1121 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6571,112 |
| Rк.ш 290 | 6485,6246 | 6485,6246 | 6485,6246 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6485,624 |
| Rк.ш 300 | 6591,1211 | 6591,1211 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6591,1211 | 6591,121 |
| Rк.ш 310 | 6796,9207 | 6796,9207 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6796,9207 | 6796,920 |
| Rк.ш 320 | 6880,4855 | 6880,4855 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6880,4855 | 6880,485 |
| Rк.ш 330 | 6467,681 | 6467,681 | 6467,681 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6467,681 |
| Rк.ш 340 | 5027,6194 | 5027,6194 | 5027,6194 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rк.ш 350 | 1995,2047 | 1995,2047 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1995,2047 | 1995,204 |
| Rк.ш 360 | 3844,0512 | 3844,0512 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3844,051 |
| Rк.ш 370 | 7854,3316 | 7854,3316 | 7854,3316 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7854,331 |
| Rк.ш 380 | 6480,528 | 6480,528 | 6480,528 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rк.ш 390 | 4451,1421 | 4451,1421 | 4451,1421 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rк.ш 400 | 0 | 5035,6395 | 5035,6395 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rк.ш 410 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5790,4493 | 5790,4493 |
| Rк.ш 420 | 6272,0337 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6272,0337 | 6272,0337 |
| Rк.ш 430 | 6652,9031 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6652,9031 | 6652,9031 |
| Rк.ш 440 | 7047,8602 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7047,8602 | 7047,8602 |
| Rк.ш 450 | 7475,527 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7475,527 | 7475,527 |
| Rк.ш 460 | 7900,3177 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7900,3177 | 7900,3177 |
| Rк.ш 470 | 8276,1324 | 8276,1324 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8276,1324 | 8276,1324 |
| Rк.ш 480 | 8571,2126 | 8571,2126 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8571,2126 | 8571,2126 |
| Rк.ш 490 | 8775,2588 | 8775,2588 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8775,2588 | 8775,2588 |
| Rк.ш 500 | 8896,4363 | 8896,4363 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8896,4363 | 8896,4363 |
| Rк.ш 510 | 8773,3484 | 8773,3484 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8773,3484 | 8773,3484 |
| Rк.ш 520 | 8591,0205 | 8591,0205 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8591,0205 | 8591,0205 |
| Rк.ш 530 | 8376,3629 | 8376,3629 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8376,3629 | 8376,3629 |
| Rк.ш 540 | 8378,645 | 8378,645 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8378,645 |
| Rк.ш 550 | 8376,3629 | 8376,3629 | 8376,3629 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8376,3629 |
| Rк.ш 560 | 8364,1879 | 8364,1879 | 8364,1879 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8364,1879 |
| Rк.ш 570 | 8327,1823 | 8327,1823 | 8327,1823 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8327,1823 |
| Rк.ш 580 | 8243,9603 | 8243,9603 | 8243,9603 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8243,9603 |
| Rк.ш 590 | 8092,0281 | 8092,0281 | 8092,0281 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8092,0281 |
| Rк.ш 600 | 7855,4251 | 7855,4251 | 7855,4251 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7855,4251 |
| Rк.ш 610 | 7534,655 | 7534,655 | 7534,655 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7534,655 |
| Rк.ш 620 | 7158,1454 | 7158,1454 | 7158,1454 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7158,1454 |
| Rк.ш 630 | 6792,0324 | 6792,0324 | 6792,0324 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6792,0324 |
| Rк.ш 640 | 6539,1861 | 6539,1861 | 6539,1861 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6539,1861 |
| Rк.ш 650 | 6511,6706 | 6511,6706 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6511,6706 | 6511,6706 |
| Rк.ш 660 | 6773,484 | 6773,484 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6773,484 | 6773,484 |
| Rк.ш 670 | 7295,2482 | 7295,2482 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7295,2482 | 7295,2482 |
| Rк.ш 680 | 7968,5678 | 7968,5678 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7968,5678 | 7968,5678 |
| Rк.ш 690 | 8657,9969 | 8657,9969 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8657,9969 | 8657,9969 |
| Rк.ш 700 | 9241,6115 | 9241,6115 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9241,6115 | 9241,6115 |
| Rк.ш 710 | 9628,4845 | 9628,4845 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9628,4845 | 9628,4845 |
| ΣRк.ш i | 9763,5631 | 9763,5631 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9763,5631 |

Таблица Г8 - Суммарные силы действующие на 1-ю коренную шейку

| R _{к.ш i} | Значения R _{к.ш i} , Н, для лучей | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--|-------------|-------------|---|---|---|---|---|---|----|-------------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| R _{к.ш 0} | 9763,563142 | 9763,563142 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9763,563142 |
| R _{к.ш 10} | 9651,232221 | 9651,232221 | 9651,232221 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9651,232221 |
| R _{к.ш 20} | 9285,611725 | 9285,611725 | 9285,611725 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9285,611725 |
| R _{к.ш 30} | 8703,251117 | 8703,251117 | 8703,251117 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8703,251117 |
| R _{к.ш 40} | 8013,999872 | 8013,999872 | 8013,999872 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8013,999872 |
| R _{к.ш 50} | 7335,703136 | 7335,703136 | 7335,703136 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7335,703136 |
| R _{к.ш 60} | 6801,947564 | 6801,947564 | 6801,947564 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6801,947564 |
| R _{к.ш 70} | 6520,905867 | 6520,905867 | 6520,905867 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6520,905867 |
| R _{к.ш 80} | 6525,064782 | 6525,064782 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6525,064782 | 6525,064782 |
| R _{к.ш 90} | 6757,277958 | 6757,277958 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6757,277958 | 6757,277958 |
| R _{к.ш 100} | 7091,548857 | 7091,548857 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7091,548857 | 7091,548857 |
| R _{к.ш 110} | 7453,354102 | 7453,354102 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7453,354102 | 7453,354102 |
| R _{к.ш 120} | 7764,036859 | 7764,036859 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7764,036859 | 7764,036859 |
| R _{к.ш 130} | 7993,782226 | 7993,782226 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7993,782226 | 7993,782226 |
| R _{к.ш 140} | 8143,220253 | 8143,220253 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8143,220253 | 8143,220253 |
| R _{к.ш 150} | 8225,610824 | 8225,610824 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8225,610824 | 8225,610824 |
| R _{к.ш 160} | 8262,960106 | 8262,960106 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8262,960106 | 8262,960106 |
| R _{к.ш 170} | 8278,658269 | 8278,658269 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8278,658269 | 8278,658269 |
| R _{к.ш 180} | 8285,209948 | 8285,209948 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8285,209948 |
| R _{к.ш 190} | 8287,81921 | 8287,81921 | 8287,81921 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8287,81921 |
| R _{к.ш 200} | 8281,089978 | 8281,089978 | 8281,089978 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8281,089978 |
| R _{к.ш 210} | 8250,070556 | 8250,070556 | 8250,070556 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8250,070556 |
| R _{к.ш 220} | 8173,424272 | 8173,424272 | 8173,424272 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8173,424272 |
| R _{к.ш 230} | 8028,012698 | 8028,012698 | 8028,012698 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8028,012698 |
| R _{к.ш 240} | 7813,576051 | 7813,576051 | 7813,576051 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7813,576051 |
| R _{к.ш 250} | 7519,379265 | 7519,379265 | 7519,379265 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7519,379265 |
| R _{к.ш 260} | 7171,067992 | 7171,067992 | 7171,067992 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7171,067992 |
| R _{к.ш 270} | 6826,659498 | 6826,659498 | 6826,659498 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6826,659498 |
| R _{к.ш 280} | 6571,112108 | 6571,112108 | 6571,112108 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6571,112108 |
| R _{к.ш 290} | 6485,624621 | 6485,624621 | 6485,624621 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6485,624621 |
| R _{к.ш 300} | 6591,1211 | 6591,1211 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6591,1211 | 6591,1211 |
| R _{к.ш 310} | 6796,920749 | 6796,920749 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6796,920749 | 6796,920749 |
| R _{к.ш 320} | 6880,485456 | 6880,485456 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6880,485456 | 6880,485456 |
| R _{к.ш 330} | 6467,681039 | 6467,681039 | 6467,681039 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6467,681039 |
| R _{к.ш 340} | 5027,619396 | 5027,619396 | 5027,619396 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| R _{к.ш 350} | 1995,204748 | 1995,204748 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1995,204748 | 1995,204748 |
| R _{к.ш 360} | 3844,051166 | 3844,051166 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3844,051166 |
| R _{к.ш 370} | 7854,33161 | 7854,33161 | 7854,33161 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7854,33161 |
| R _{к.ш 380} | 6480,527971 | 6480,527971 | 6480,527971 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| R _{к.ш 390} | 4451,14206 | 4451,14206 | 4451,14206 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| R _{к.ш 400} | 0 | 5035,639456 | 5035,639456 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| R _{к.ш 410} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5790,449258 | 5790,449258 |
| R _{к.ш 420} | 6272,033728 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6272,033728 | 6272,033728 |
| R _{к.ш 430} | 6652,903134 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6652,903134 | 6652,903134 |
| R _{к.ш 440} | 7047,86018 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7047,86018 | 7047,86018 |
| R _{к.ш 450} | 7475,527034 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7475,527034 | 7475,527034 |
| R _{к.ш 460} | 7900,317705 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7900,317705 | 7900,317705 |
| R _{к.ш 470} | 8276,132384 | 8276,132384 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8276,132384 | 8276,132384 |
| R _{к.ш 480} | 8571,212632 | 8571,212632 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8571,212632 | 8571,212632 |
| R _{к.ш 490} | 8775,258809 | 8775,258809 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8775,258809 | 8775,258809 |
| R _{к.ш 500} | 8896,43628 | 8896,43628 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8896,43628 | 8896,43628 |
| R _{к.ш 510} | 8773,34845 | 8773,34845 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8773,34845 | 8773,34845 |
| R _{к.ш 520} | 8591,020509 | 8591,020509 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8591,020509 | 8591,020509 |
| R _{к.ш 530} | 8376,362906 | 8376,362906 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8376,362906 | 8376,362906 |
| R _{к.ш 540} | 8378,644972 | 8378,644972 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8378,644972 |
| R _{к.ш 550} | 8364,187932 | 8364,187932 | 8364,187932 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8364,187932 |
| R _{к.ш 560} | 8327,182344 | 8327,182344 | 8327,182344 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8327,182344 |
| R _{к.ш 570} | 8243,960264 | 8243,960264 | 8243,960264 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8243,960264 |
| R _{к.ш 580} | 8092,028075 | 8092,028075 | 8092,028075 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8092,028075 |
| R _{к.ш 590} | 7855,425054 | 7855,425054 | 7855,425054 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7855,425054 |
| R _{к.ш 600} | 7534,654977 | 7534,654977 | 7534,654977 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7534,654977 |
| R _{к.ш 610} | 7158,145398 | 7158,145398 | 7158,145398 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7158,145398 |
| R _{к.ш 620} | 6792,032388 | 6792,032388 | 6792,032388 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6792,032388 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|-------------|
| R _{к.ш 630} | 6539,186146 | 6539,186146 | 6539,186146 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6539,186146 |
| R _{к.ш 640} | 6511,670576 | 6511,670576 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6511,670576 |
| R _{к.ш 650} | 6773,483976 | 6773,483976 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6773,483976 |
| R _{к.ш 660} | 7295,248211 | 7295,248211 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7295,248211 |
| R _{к.ш 670} | 7968,567799 | 7968,567799 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7968,567799 |
| R _{к.ш 680} | 8657,996937 | 8657,996937 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8657,996937 |
| R _{к.ш 690} | 9241,611541 | 9241,611541 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9241,611541 |
| R _{к.ш 700} | 9628,484523 | 9628,484523 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9628,484523 |
| R _{к.ш 710} | 9763,563142 | 9763,563142 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9763,563142 |
| ΣR _{к.ш i} | 528,0011481 | 497,6881458 | 252,3205948 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 517,832308 |

Приложение Д - Расчет шатунной группы

Д.1.1 Расчет поршневой головки шатуна

Материал шатуна — углеродистая сталь 45Г2; $E_{ш}=2,2 \cdot 10^5$ МПа, $\alpha_{\Gamma} = 1 \cdot 10^{-5}$ 1/К.

Материал втулки — бронза; $E_{в} = 1,15 \cdot 10^5$ МПа, $\alpha_{в} = 1,8 \cdot 10^{-5}$ 1/К.

Для углеродистой стали 45Г2: предел прочности $\sigma_{в} = 800$ МПа; пределы усталости при изгибе $\sigma_{-1} = 350$ МПа и растяжении-сжатии $\sigma_{-1p} = 210$ МПа; предел текучести $\sigma_{T} = 420$ МПа; коэффициенты приведения цикла при изгибе $\alpha_{\sigma} = 0,17$ и растяжении-сжатии $\alpha_{\sigma} = 0,12$.

По формулам определяем:

- при изгибе:

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

$$\frac{(\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma})}{(1 - \beta_{\sigma})} = 3,97; \quad (Д.2)$$

- при растяжении-сжатии:

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

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

Расчет сечения I-I:

- максимальное напряжение пульсирующего цикла

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \frac{(m_n + m_{e.z.}) * \omega_{x.x.\max}^2 * R * (1 + \lambda) * 10^{-6}}{2 * h_z * l_u} = \\ &= \frac{(0,422 + 0,032) * 628 * 0,0375 * (1 + 0,3125) * 10^{-6}}{2 * 0,004 * 0,027} = 40,8 \text{ МПа}\end{aligned}\quad , \quad (\text{Д.3})$$

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

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

- среднее напряжение и амплитуда напряжений:

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

$$\sigma_{ak0} = \frac{\sigma_{a0} * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{20,4 * 1,272}{0,85 * 1} = 30,53 \text{ МПа} \quad , \quad (\text{Д.5})$$

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

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

Напряжения от запрессованной втулки (суммарный натяг)

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

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

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

натяг;

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

Удельное давление на поверхности соприкосновения втулки с головкой

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

$$= \frac{0,0611}{24 * \left[\frac{\left(\frac{32^2 + 24^2}{(32^2 - 24^2)^{+0,3}} \right)}{2,2 * 10^5} + \frac{\left(\frac{24^2 + 22^2}{(24^2 - 22^2)^{-0,3}} \right)}{1,15 * 10^5} \right]} = 22,1 \text{ МПа} \quad (\text{Д.7})$$

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

Напряжение от суммарного натяга на внутренней поверхности головки

$$\sigma_i = \frac{P * (d_2^2 + d^2)}{d_2^2 - d^2} = \frac{22,1 * (32^2 + 24^2)}{32^2 - 24^2} = 78,93 \text{ МПа} \quad (\text{Д.8})$$

Напряжение от суммарного натяга на внешней поверхности головки

$$\sigma_a = \frac{P * 2 * d^2}{d_2^2 - d^2} = \frac{22,1 * 2 * 24^2}{32^2 - 24^2} = 56,83 \text{ МПа} \quad (\text{Д.9})$$

Расчет сечения А-А на изгиб:

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

$$P_{jn} = -m_n * R * \omega^2 * (1 + \lambda) = -0,422 * 0,0375 * 586^2 * (1 + 0,3125) = 7132 \text{ Н} \quad (\text{Д.10})$$

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

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

$$N_{j0} = -P_{jn} * (0,572 - 0,0008 * \varphi_{ш.з}) = -(-7132) * (0,572 - 0,0008 * 105) = 3480 \text{ Н}; \quad (\text{Д.11})$$

$$M_{j0} = -P_{jn} * r_{cp} * (0,00033 * \varphi_{ш.з} - 0,0297) = 7139 * 0,014 * (0,00033 * 105 - 0,0297) = 0,494 \text{ Н*м}, \quad (\text{Д.12})$$

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

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

$$N_{j\varphi_{ш.з}} = N_{j0} * \cos \varphi_{ш.з} - 0,5 * P_{jn} * (\sin \varphi_{ш.з} - \cos \varphi_{ш.з}) = 3480 * \cos 105^\circ - 0,5 * (-7132) * (\sin 105^\circ - \cos 105^\circ) = 3467 \text{ Н}; \quad (\text{Д.13})$$

$$M_{j\varphi_{ш.з}} = M_{j0} + N_{jn} * r_{cp} * (1 - \cos \varphi_{ш.з}) + 0,5 * P_{jn} * r_{cp} * (\sin \varphi_{ш.з} - \cos \varphi_{ш.з}) = 0,494 + 3480 * 0,014 * (1 - \cos 105^\circ) + 0,5 * (-7132) * 0,014 * (\sin 105^\circ - \cos 105^\circ) = 0,68 \text{ Н*м}. \quad (\text{Д.14})$$

Напряжение на внешнем волокне от растягивающей силы

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

$$\left[2 * 0,68 * \frac{6 * 0,014 + 0,004}{0,004 * (2 * 0,014 + 0,004)} + 0,884 * 3467 \right] * \frac{10^{-6}}{0,027 * 0,004} = 37,1 \text{ МПа} \quad , \quad (\text{Д.15})$$

где:

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

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

$$F_B = (d - d_n) / l_{uu} = (24 - 22) / 27 = 54 \text{ мм}^2. \quad (\text{Д.16})$$

Суммарная сила, сжимающая головку

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

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

$$= 28222 \text{ Н.} \quad (\text{Д.17})$$

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

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

$$= 28222 * [0,0005 + 0,002] = 70,56 \text{ Н;} \quad (\text{Д.18})$$

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

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

$$= 28222 * 0,014 * [0,0001 + 0,0005 - 1,2588 - 0,002] = -0,5 \text{ Н} * \text{м,} \quad (\text{Д.19})$$

где :

$$\frac{N_{сж0}}{P_{сж}} = 0,0005$$

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

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

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

Напряжение на внешнем волокне от сжимающей силы

$$\sigma_{acc} = \left[2 * M_{сж.фи.з.} * \frac{6 * r_{cp} + h_2}{h_2 * (2 * r_{cp} + h_2)} + K * N_{сж.фи.з.} \right] * \frac{10^{-6}}{l_{ш} * h_2} =$$

$$\left[2 * (-0,5) * \frac{6 * 0,014 + 0,004}{0,004 * (2 * 0,014 + 0,004)} + 0,884 * 70,56 \right] * \frac{10^{-6}}{0,027 * 0,004} = -5,79 \text{ МПа.} \quad (\text{Д.20})$$

Максимальное и минимальное напряжения асимметричного цикла:

$$\sigma_{\max} = \sigma'_a + \sigma_{aj} = 56,83 + 37,1 = 93,9 \text{ МПа} ; \quad (\text{Д.21})$$

$$\sigma_{\min} = \sigma'_a + \sigma_{acc} = 56,83 - 5,79 = 51,04 \text{ МПа} . \quad (\text{Д.22})$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжения:

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

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

$$\sigma_{ak} = \frac{\sigma_a * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{21,43 * 1,272}{0,85 * 0,9} = 35,63 \text{ МПа.} \quad (\text{Д.23})$$

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

$$n_{\tau\sigma} = \frac{\sigma_T}{(\sigma_{ak} + \sigma_m)} = \frac{420}{(35,63 + 72,47)} = 3,88 \quad (\text{Д.24})$$

Д.1.2 Расчет кривошипной головки шатуна

Максимальная сила инерции

$$P_{jp} = -R * \omega_{x.x.\max}^2 * [(m_n + m_{ш.н.}) * (1 + \lambda) + (m_{ш.к.} - m_{кр})] * 10^{-6} = -628^2 * 0,0375 *$$

$$* [(0,422 + 0,132) * (1 + 0,3125) + (0,396 - 0,132)] * 10^{-6} = -0,0147 \text{ МН,} \quad (\text{Д.25})$$

где $m_{кр} = 0,25 * m_{ш} = 0,25 * 0,528 = 0,132$ кг.

Момент сопротивления расчетного сечения

$$W_{ИЗ} = \frac{l_k * (0,5 * c_{\delta} - r_1)^2}{6} = \frac{0,022 * (0,5 * 0,06 - 0,026)^2}{6} = 0,587 * 10^{-7} \text{ м}^3, \quad (\text{Д.26})$$

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

Моменты инерции вкладыша и крышки:

$$\begin{aligned} J_B &= l_k * t_B^3 = 22 * 2^3 * 10^{-12} = 176 * 10^{-12} \text{ м}^4; \\ J &= l_k * (0,5 * c_{\delta} - r_1)^3 * 10^{-12} = 22 * (0,5 * 60 - 26)^3 * 10^{-12} = 1408 * 10^{-12} \text{ м}^4; \end{aligned} \quad (\text{Д.27})$$

Напряжение изгиба крышки и вкладыша:

$$\begin{aligned} \sigma_{из} &= P_{jp} * \left[\frac{0,023 * c_{\delta}}{(1 + J_B / J) * W_{ИЗ}} + \frac{0,4}{F_z} \right] = 0,0147 * \left[\frac{0,023 * 0,06}{\left(1 + \frac{176 * 10^{-12}}{1408 * 10^{-12}} \right) * 0,587 * 10^{-7}} + \frac{0,4}{0,000132} \right] = \\ &= 352 \text{ МПа}, \end{aligned} \quad (\text{Д.28})$$

$$\text{где } F_z = l_k * 0,5 * (c_{\delta} - d_{uu}) = 22 * 0,5 * (60 - 48) * 10^{-6} = 0,000132 \text{ м}^2. \quad (\text{Д.29})$$

Д.1.3 Расчет стержня шатуна

Площадь и моменты инерции расчетного сечения В - В:

$$\begin{aligned} F_{cp} &= h_{uu} * b_{uu} - (b_{uu} - a_{uu}) * (h_{uu} - 2 * t_{uu}) = 24 * 15 - (15 - 5) * \\ &* (24 - 2 * 4,5) = 210 \text{ мм}^2 = 210 * 10^{-6} \text{ м}^2; \\ J_x &= \frac{h_{uu}^3 * b_{uu} - (b_{uu} - a_{uu}) * (h_{uu} - 2 * t_{uu})^3}{12} = \frac{24^3 * 15 - (15 - 5) * (24 - 2 * 4,5)^3}{12} = \\ &= 14468 \text{ мм}^2 = 144,7 * 10^{-10} \text{ м}^4; \\ J_y &= \frac{h_{uu} * b_{uu}^3 - (b_{uu} - a_{uu}) * (h_{uu} - 2 * t_{uu})^3}{12} = \frac{24 * 15^3 - (15 - 5) * (24 - 2 * 4,5)^3}{12} = \\ &= 6408 \text{ мм}^2 = 641 * 10^{-11} \text{ м}^4. \end{aligned} \quad (\text{Д.30})$$

Максимальное напряжение от сжимающей силы: в плоскости шатуна

$$\sigma_{\max .x} = K_x * P_{сж} / F_{cp} = 1,077 * 0,02626 / (210 * 10^{-6}) = 135 \text{ МПа}, \quad (\text{Д.31})$$

где

$$K_x = 1 + \left(\sigma_e / \pi^2 E_{uu} \right) * \left(L_{uu}^2 F_{cp} / J_x \right) = 1 + \left(\frac{800 / 3,14^2 *}{2,2 * 10^5} \right) * \left(\frac{120^2 *}{210 / 14468} \right) = 1,077. \quad (Д.32)$$

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:

$$\begin{aligned} K_y &= 1 + \left(\sigma_e / \pi^2 E_{uu} \right) * \left(L_1^2 F_{cp} / 4 * J_y \right) = 1 + \left(800 / 3,14^2 * 2,2 * 10^5 \right) * \\ &* \left(82,5^2 * 210 / 4 * 6408 \right) = 1,0206; \\ L_1 &= L_{uu} - (d + d_1) / 2 = 120 - (24 + 51) / 2 = 82,5. \end{aligned} \quad (Д.33)$$

Минимальное напряжение от растягивающей силы

$$\sigma_{\min} = P_p / F_{cp} = -0,00939 / (210 * 10^{-6}) = -44,7 \text{ МПа}. \quad (Д.34)$$

Средние напряжения и амплитуды цикла:

$$\begin{aligned} \sigma_{mx} &= (\sigma_{\max.x} + \sigma_{\min}) / 2 = (135 - 44,7) / 2 = 45,2 \text{ МПа}; \\ \sigma_{my} &= (\sigma_{\max.y} + \sigma_{\min}) / 2 = (128 - 44,7) / 2 = 41,7 \text{ МПа}; \\ \sigma_{ax} &= (\sigma_{\max.x} - \sigma_{\min}) / 2 = (135 + 44,7) / 2 = 89,9 \text{ МПа}; \\ \sigma_{ay} &= (\sigma_{\max.y} - \sigma_{\min}) / 2 = (128 + 44,7) / 2 = 86,4 \text{ МПа}; \end{aligned} \quad (Д.35)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{akx} &= \frac{\sigma_{ax} * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{89,9 * 1,272}{0,86 * 1,9} = 102,3 \text{ МПа}; \\ \sigma_{aky} &= \frac{\sigma_{ay} * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{86,4 * 1,272}{0,86 * 1,9} = 98,3 \text{ МПа}, \end{aligned} \quad (Д.36)$$

где:

$$k_{\sigma} = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (\sigma_B - 400) = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (800 - 400) = 1,272; \quad (Д.37)$$

$$\varepsilon_M = 0,86;$$

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

Так как

$$\sigma_{akx} / \sigma_{mx} = 102,3 / 45,2 = 2,263 \geq (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = 0,76 \quad \text{и}$$

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

$$\begin{aligned} n_{\sigma x} &= \frac{\sigma_{-1}}{(\sigma_{akx} + \alpha_{\sigma} * \sigma_{mx})} = \frac{210}{(102,3 + 0,12 * 45,2)} = 1,95 \\ n_{\sigma y} &= \frac{\sigma_{-1}}{(\sigma_{aky} + \alpha_{\sigma} * \sigma_{my})} = \frac{210}{(198,3 + 0,12 * 41,7)} = 2,03 \end{aligned} \quad (Д.38)$$

Д.1.4 Расчет шатунных болтов

Принимаем: номинальный диаметр болта $d=10$ мм; шаг резьбы $t=1$ мм; количество болтов $i_{\sigma}=2$. Материал - сталь 40Х.

Для легированной стали 40Х: предел прочности $\sigma_B=980$ МПа; предел усталости при растяжении - сжатии $\sigma_{-1p}=300$ МПа; предел текучести $\sigma_T=800$ МПа; коэффициенты приведения цикла при изгибе $\alpha_{\sigma}=0,17$.

$$\beta_{\sigma} = \sigma_{-1p} / \sigma_T = 300 / 800 = 0,375, \quad (Д.39)$$

$$\frac{(\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma})}{(1 - \beta_{\sigma})} = \frac{(0,375 - 0,17)}{1 - 0,375} = 0,328 \quad (Д.40)$$

Сила предварительной затяжки

$$P_{\text{пр}} = 2 * P_{jp} / i_{\sigma} = 2 * 0,0147 / 2 = 0,0147 \text{ МН.} \quad (Д.41)$$

Суммарная сила, растягивающая болт

$$P_{\sigma} = P_{\text{пр}} + \chi * P_{jp} / i_{\sigma} = 0,0147 + 0,2 * 0,0147 / 2 = 0,0162 \text{ МН.} \quad (Д.42)$$

где $\chi = 0,2$.

Максимальные и минимальные напряжения, возникающие в болте:

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= 4 * P_{\sigma} / (\pi * d_B^2) = 4 * 0,0162 / (3,14 * 0,0086^2) = 279 \text{ МПа}; \\ \sigma_{\min} &= 4 * P_{\Pi\Pi} / (\pi * d_B^2) = 4 * 0,0147 / (3,14 * 0,0086^2) = 253 \text{ МПа};\end{aligned}\quad (\text{Д.43})$$

Среднее напряжение и амплитуды цикла:

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{279 + 253}{2} = 266 \text{ МПа} \\ \sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{279 - 253}{2} = 13 \text{ МПа} \\ \sigma_{ak} &= \frac{\sigma_a * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{13 * 3,43}{0,99 * 0,82} = 35,63 \text{ МПа}\end{aligned}\quad (\text{Д.44})$$

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 $\sigma_{ak} / \sigma_m = 35,63 / 266 = 0,134 \leq (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = 0,328$, то запас прочности в сечении А-А определяется по пределу текучести:

$$n_{\tau\sigma} = \frac{\sigma_T}{(\sigma_{ak} + \sigma_m)} = \frac{800}{(35,63 + 266)} = 2,49 \quad (\text{Д.45})$$

Д.2.1 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:

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

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

Д.2.2 Удельное давление на поверхности шеек

Шатунных шеек:

$$k_{ШШСР} = \frac{R_{ШШСР}}{d_{ШШ} * l'_{ШШ}} = \frac{9342 * 10^{-6}}{48 * 22 * 10^{-6}} = 8,8 \text{ МПа};$$

$$k_{ШШ \max} = \frac{R_{ШШ \max}}{d_{ШШ} * l'_{ШШ}} = \frac{21360 * 10^{-6}}{48 * 22 * 10^{-6}} = 20,2 \text{ МПа},$$
(Д.46)

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

$r_{гал}$ - радиус галтели принят равным 3 мм.

Коренных шеек:

$$k_{КШСР} = \frac{R_{КШСР}}{d_{КШ} * l'_{КШ}} = \frac{1947 * 10^{-6}}{50 * 22 * 10^{-6}} = 1,77 \text{ МПа};$$

$$k_{КШ \max} = \frac{R_{КШ \max}}{d_{КШ} * l'_{КШ}} = \frac{16459 * 10^{-6}}{50 * 22 * 10^{-6}} = 14,9 \text{ МПа},$$
(Д.47)

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

Д.2.3 Расчет коренной шейки

Момент сопротивления кручению коренной шейки

$$W_{\text{кш}} = \frac{\pi}{16} * d_{\text{кш}}^3 = \frac{3,14 * 50^3 * 10^{-9}}{16} = 24,5 * 10^{-6} \text{ м}^3$$
(Д.48)

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременно-

го цикла для наиболее нагруженной 4-й коренной шейки, на которую воздействует крутящий момент, имеющий наибольший размах:

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \frac{M_{KШ\max}}{W_{\kappa\mu}} = \frac{500 * 10^{-6}}{24,5 * 10^{-6}} = 20,4 \text{ МПа}; \\ \tau_{\min} &= \frac{M_{KШ\min}}{W_{\kappa\mu}} = \frac{-201,6 * 10^{-6}}{24,5 * 10^{-6}} = -8,2 \text{ МПа}.\end{aligned}\tag{Д.49}$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned}\tau_m &= \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = \frac{20,4 - 8,2}{2} = 6,1 \text{ МПа}; \\ \tau_a &= \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = \frac{20,4 + 8,2}{2} = 14,3 \text{ МПа}; \\ \tau_{ak} &= \frac{\tau_a * k_{\tau}}{\varepsilon_{M\tau} * \varepsilon_{n\tau}} = \frac{14,3 * 1,1}{0,72 * 1,2} = 18,2 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{Д.50}$$

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

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{ak} + \alpha_{\tau} * \tau_m} = \frac{115}{18,2 + 0,6 * 6,1} = 5,2\tag{Д.51}$$

Д.2.4 Расчёт шатунной шейки

Момент сопротивления кручению шатунной шейки

$$W_{\text{шшш}} = \frac{\pi}{16} * d_{\text{шшш}}^3 = \frac{3,14 * 48^3 * 10^{-9}}{16} = 21,7 * 10^{-6} \text{ м}^3 \quad (\text{Д.52})$$

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла :

$$\begin{aligned} \tau_{\text{max}} &= \frac{M_{\text{шшшmax}}}{W_{\text{шшш}}} = \frac{552 * 10^{-6}}{21,7 * 10^{-6}} = 25,4 \text{ МПа}; \\ \tau_{\text{min}} &= \frac{M_{\text{КШШmin}}}{W_{\text{кшш}}} = \frac{-148 * 10^{-6}}{21,7 * 10^{-6}} = -6,8 \text{ МПа}. \end{aligned} \quad (\text{Д.53})$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{m}} &= \frac{\tau_{\text{max}} + \tau_{\text{min}}}{2} = \frac{25,4 - 6,8}{2} = 9,3 \text{ МПа}; \\ \tau_{\text{a}} &= \frac{\tau_{\text{max}} - \tau_{\text{min}}}{2} = \frac{25,4 + 6,8}{2} = 16,1 \text{ МПа}; \\ \tau_{\text{ак}} &= \frac{\tau_{\text{a}} * k_{\tau}}{\varepsilon_{\text{M}\tau} * \varepsilon_{\text{н}\tau}} = \frac{16,1 * 1,1}{0,73 * 1,2} = 18,2 \text{ МПа}, \end{aligned} \quad (\text{Д.54})$$

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

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

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

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

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

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

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{\text{ак}} + \alpha_{\tau} * \tau_{\text{m}}} = \frac{115}{16,1 + 0,6 * 9,3} = 5,3 \quad (\text{Д.55})$$

Максимальное и минимальное нормальные напряжения асимметричного цикла шатунной шейки:

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \frac{M_{\varphi_M \max}}{W_{\text{шши}}} = \frac{6,76 * 10^{-6}}{10,85 * 10^{-6}} = 0,62 \text{ МПа}, \\ \sigma_{\min} &= \frac{M_{\varphi_M \min}}{W_{\text{шши}}} = \frac{-244 * 10^{-6}}{10,85 * 10^{-6}} = -22,5 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{Д.56}$$

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

Среднее напряжение и амплитуда цикла:

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{0,62 - 22,5}{2} = -10,9 \text{ МПа} \\ \sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{0,62 + 22,5}{2} = 11,6 \text{ МПа} \\ \sigma_{\text{ак}} &= \frac{\sigma_a * k_{\sigma}}{\varepsilon_{M\sigma} * \varepsilon_{n\sigma}} = \frac{11,6 * 1,8}{0,76 * 1,2} = 22,9 \text{ МПа}\end{aligned}\tag{Д.57}$$

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

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\text{ак}} + \alpha_{\tau} * \sigma_m} = \frac{150}{22,9 + 0,4 * (-10,9)} = 8,09\tag{Д.58}$$

Общий запас прочности шатунной шейки

$$n_{\text{шши}} = \frac{n_{\sigma} * n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} = \frac{8,09 * 5,3}{\sqrt{8,09^2 + 5,3^2}} = 4,43.\tag{Д.59}$$

Д.2.5 Расчёт щеки

Максимальный и минимальный моменты, скручивающие щёку:

$$\begin{aligned}
M_{к.щ. max} &= T_{max} * 0,5 * (l_{к.щ.} + h) = 2378 * 0,5 * (28 + 18) * 10^{-3} = 54,7 H * м; \\
M_{к.щ. min} &= T_{min} * 0,5 * (l_{к.щ.} + h) = -4081 * 0,5 * (28 + 18) * 10^{-3} = -93,9 H * м;
\end{aligned}
\tag{Д.60}$$

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла щеки:

$$\begin{aligned}
\tau_{max} &= \frac{M_{к.щ. max}}{W_{щ}} = \frac{54,7 * 10^{-6}}{6,99 * 10^{-6}} = 7,8 МПа; \\
\tau_{min} &= \frac{M_{к.щ. min}}{W_{щ}} = \frac{-93,9 * 10^{-6}}{6,99 * 10^{-6}} = -13,4 МПа;
\end{aligned}
\tag{Д.61}$$

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

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned}
\tau_m &= \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2} = \frac{7,8 - 13,4}{2} = -2,8 МПа \\
\tau_a &= \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2} = \frac{7,8 + 13,4}{2} = 10,6 МПа \\
\tau_{ак} &= \frac{\tau_a * k_\tau}{\varepsilon_{M\tau} * \varepsilon_{n\tau}} = \frac{10,6 * 0,7}{0,64 * 0,75} = 15,5 МПа
\end{aligned}
\tag{Д.62}$$

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

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

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

Запас прочности щеки от касательных напряжений определяем по пределу усталости

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{ак} + \alpha_\tau * \tau_m} = \frac{115}{15,5 + 0,6 * (-2,8)} = 8,32
\tag{Д.63}$$

Максимальное и минимальное нормальные напряжения щеки:

$$\begin{aligned}
P_{щ. max} &= \frac{K_{max} + K_R}{2} = \frac{25617 - 15324}{2} = 5147 H, \\
P_{щ. min} &= \frac{K_{min} + K_R}{2} = \frac{-9386 - 15324}{2} = -12355 H,
\end{aligned}
\tag{Д.64}$$

$$\begin{aligned}
M_{\text{ц, max}} &= 0,25 * (K_{\text{max}} + K_R + 2 * (-P'_{\text{ПП}})) * l_{\text{ку}} = 0,25 * (25617 - 15324 + 2 * \\
&* 8000) * 28 * 10^{-3} = 184 \text{ Нм} \\
M_{\text{ц, min}} &= 0,25 * (K_{\text{min}} + K_R + 2 * (-P'_{\text{ПП}})) * l_{\text{ку}} = 0,25 * (-12355 - 15324 + 2 * \\
&* 8000) * 28 * 10^{-3} = -81,8 \text{ Нм}
\end{aligned} \tag{Д.65}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{\Sigma \text{ max}} &= \frac{M_{\text{ц, max}}}{W_{\text{цц}}} + \frac{P_{\text{ц, max}}}{F_{\text{ц}}} = \frac{184 * 10^{-6}}{4,21 * 10^{-6}} + \frac{5147 * 10^{-6}}{1368 * 10^{-6}} = 47,5 \text{ МПа}, \\
\sigma_{\Sigma \text{ min}} &= \frac{M_{\text{ц, min}}}{W_{\text{цц}}} + \frac{P_{\text{ц, min}}}{F_{\text{ц}}} = \frac{-81,8 * 10^{-6}}{4,21 * 10^{-6}} + \frac{-12355 * 10^{-6}}{1368 * 10^{-6}} = -25,9 \text{ МПа},
\end{aligned} \tag{Д.66}$$

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

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

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned}
\sigma_{\text{m}} &= \frac{\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}}{2} = \frac{47,5 - 25,9}{2} = 10,8 \text{ МПа} \\
\sigma_{\text{a}} &= \frac{\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}}{2} = \frac{47,5 + 25,9}{2} = 36,7 \text{ МПа} \\
\sigma_{\text{ак}} &= \frac{\sigma_{\text{a}} * k_{\sigma}}{\varepsilon_{\text{M}\sigma} * \varepsilon_{\text{n}\sigma}} = \frac{36,7 * 1,16}{0,7 * 0,75} = 81,1 \text{ МПа}.
\end{aligned} \tag{Д.67}$$

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

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

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

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

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

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\text{ак}} + \alpha_{\tau} * \sigma_{\text{m}}} = \frac{150}{81,1 + 0,4 * 10,8} = 1,75 \tag{Д.68}$$

Общий запас прочности шатунной шейки

$$n_{\text{шш}} = \frac{n_{\sigma} * n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} = \frac{1,75 * 8,32}{\sqrt{1,75^2 + 8,32^2}} = 1,71. \tag{Д.69}$$

Приложение Е – Спецификация сборочного чертежа

| Форм. зона / лист | Обозначение | Наименование | Кол. | Примечание |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------------|------------|
| | | <u>Документация</u> | | |
| A4 | 16.БР.ЭМСУ.004.00.000.ПЗ | Пояснительная записка | 107 | |
| A1 | 16.БР.ЭМСУ.004.00.000.СБ | Сборочный чертеж | 2 | |
| | | <u>Сборочные единицы</u> | | |
| | 1 | 16.БР.ЭМСУ.004.01.000.СБ | Блок цилиндров | 1 |
| | 2 | 16.БР.ЭМСУ.004.02.000.СБ | Вал коленчатый | 1 |
| | 3 | 16.БР.ЭМСУ.004.03.000.СБ | Головка цилиндров | 1 |
| | 4 | 16.БР.ЭМСУ.004.04.000.СБ | Демпфер крутильных колебаний | 1 |
| | 5 | 16.БР.ЭМСУ.004.05.000.СБ | Картер масляный | 1 |
| | 6 | 16.БР.ЭМСУ.004.06.000.СБ | Коллектор выпускной | 2 |
| | 7 | 16.БР.ЭМСУ.004.07.000.СБ | Колпачок маслоотражательный | 16 |
| | 8 | 16.БР.ЭМСУ.004.08.000.СБ | Кольца маслосъемное | 8 |
| | 9 | 16.БР.ЭМСУ.004.09.000.СБ | Маховик | 1 |
| | 10 | 16.БР.ЭМСУ.004.10.000.СБ | Насос водяной | 1 |
| | 11 | 16.БР.ЭМСУ.004.11.000.СБ | Насос масляный | 1 |
| | 12 | 16.БР.ЭМСУ.004.12.000.СБ | Натяжитель ремня автоматический | 1 |
| | 13 | 16.БР.ЭМСУ.004.13.000.СБ | Приемник масляного насоса | 1 |
| | 14 | 16.БР.ЭМСУ.004.14.000.СБ | Прокладка головки блока | 1 |
| | | | | |
| | | | 16.БР.ЭМСУ.004.00.000.СБ | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
| Разраб. | | Кудашов Д.А. | | |
| Проб. | | Смоленский | | |
| Нконтр. | | Смоленский | | |
| Утв. | | Павлов Д.А. | | |
| | | | Двигатель модернизированный | |
| | | | Литера | Лист |
| | | | | Листов |
| | | | | 1 |
| | | | | 3 |
| | | | ТГУ, ЭМСбэ-1131 | |

| Форм. зона / Лист | Обозначение | Наименование | Кол. | Примечание |
|-----------------------|--------------------------|------------------------------|-------|------------|
| 15 | 16.БР.ЭМСУ.004.15.000.СБ | Ресивер | 1 | |
| 16 | 16.БР.ЭМСУ.004.16.000.СБ | Сальник коленчатого вала | | |
| | | задний | 1 | |
| 17 | 16.БР.ЭМСУ.004.17.000.СБ | Сальник коленчатого вала | | |
| | | передний | 1 | |
| 18 | 16.БР.ЭМСУ.004.18.000.СБ | Толкатель гидравлический | 32 | |
| 19 | 16.БР.ЭМСУ.004.19.000.СБ | Фильтр очистки масла | 1 | |
| 20 | 16.БР.ЭМСУ.004.20.000.СБ | Фарсунка масляная | 8 | |
| 21 | 16.БР.ЭМСУ.004.21.000.СБ | Шатун | 8 | |
| | | <u>Детали</u> | | |
| 22 | 16.БР.ЭМСУ.004.00.022 | Вал распределительный | | |
| | | впускной | 2 | |
| 23 | 16.БР.ЭМСУ.004.00.023 | Вал распределительный | | |
| | | выпускной | 2 | |
| 24 | 16.БР.ЭМСУ.004.00.024 | Вкладыш коренного подшипника | | |
| | | верхний | 5 | |
| 25 | 16.БР.ЭМСУ.004.00.025 | Вкладыш коренного подшипника | 5 | |
| 26 | 16.БР.ЭМСУ.004.00.026 | Вкладыш шатунного подшипника | 8 | |
| 27 | 16.БР.ЭМСУ.004.00.027 | Втулка направляющая | 32 | |
| 28 | 16.БР.ЭМСУ.004.00.028 | Держатель заднего сальника | | |
| | | коленчатого вала | 1 | |
| 29 | 16.БР.ЭМСУ.004.00.029 | Клапан впускной | 16 | |
| 30 | 16.БР.ЭМСУ.004.00.030 | Клапан выпускной | 16 | |
| 16.БР.ЭМСУ.004.00.000 | | | | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
| | | | | |
| | | | | 2 |

