

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	Расчет 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^х 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/см^2 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 6000°C), чем формирование очага детонационного сгорания (температура $600-900^{\circ} \text{C}$).

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 $K = 0,5$:

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12} - 2 \cdot \frac{1-\alpha}{1+K} \cdot 0,208 \cdot L_0 ; \text{ кмоль CO}_2/\text{кг топл;} \quad (2.5)$$

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

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2} - 2K \cdot \frac{1-\alpha}{1+K} \cdot 0,208 \cdot L_0 ; \text{ кмоль H}_2\text{O/кг топл;} \quad (2.7)$$

$$M_{H_2} = 2K \cdot \frac{1-\alpha}{1+K} \cdot 0,208 \cdot L_0 ; \text{ кмоль H}_2/\text{кг топл;} \quad (2.8)$$

$$M_{N_2} = 0,792 \cdot \alpha \cdot L_0 ; \text{ кмоль N}_2/\text{кг топл.} \quad (2.9)$$

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	$M_1, \text{ кмоль гор. см./кг топл.}$	$M_{CO_2}, \text{ кмоль CO}_2/\text{кг топл.}$	$M_{CO}, \text{ кмоль CO/кг топл.}$	$M_{H_2O}, \text{ кмоль H}_2\text{O/кг топл.}$	$M_{H_2}, \text{ кмоль H}_2/\text{кг топл.}$	$M_{N_2}, \text{ кмоль N}_2/\text{кг топл.}$	$M_2, \text{ кмоль пр.сг./кг топл.}$	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

$n, \text{ мин}^{-1}$	$V_{\text{п.ср}}, \text{ м/с}$	$p_m, \text{ Мпа}$	$p_e, \text{ Мпа}$	η_m	η_e	$g_e, \text{ г/(кВт} \cdot \text{ч)}$	$N_e, \text{ кВт}$	$M_e, \text{ Н} \cdot \text{м}$	$G_T, \text{ кг/ч}$
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 кованного 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 кованного 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

$$P_{\text{ПР}} = -0,5 * P_{\text{ПР3}} * l / l_1 = 0,5 * (-16000) * 0.094 / 0.070 = 10743 \text{ Н} ; \quad (5.43)$$

- масса каждого противовеса

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

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 уравновешивания 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/см², 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	m1-2	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	$T_{пред}$	T_1	T_2	$T_{истина}$	T_{1-2}	k_{1-2}	K_{1-2}	DX_{1-2}	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	$\operatorname{tg}\beta$	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								$M_{кр.ц},$ 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
$\Sigma R_{ш.ш\ i}$	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			
	$R_{к.ш1}, Н$	$j_{кв}, град$	$R_{к1}, Н$	$T1, Н$	$K_{рк1}, Н$	$T_{к2}, Н$	$K_{к2}, Н$	$R_{к.ш2}, Н$	$j_{кв}, град$	$T2, Н$	$K_{рк2}, Н$	$T_{к3}, Н$	$K_{к3}, Н$	$R_{к.ш3}, Н$	$j_{кв}, град$	$T3, Н$
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

$K_{Rш}, Н$	$P_k, Н$	$P_k, Н$	$\psi, рад$	$\psi, град$	$Rш.ш., Н$	$\varphi_{кв}, град$
-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

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

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

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

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

где:

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

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

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

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:

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

$$\varepsilon_M = 0,86;$$

$\varepsilon_n = 1,3$ - 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

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

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

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

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

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

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

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

Общий запас прочности шатунной шейки

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

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
				1
			Листов	
			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

