

13.03.03 (141100.62) «Энергетическое машиностроение»
(код и наименование направления подготовки, специальности)

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 Иванов Николай Эдуардович

1. Тема проекта Автомобильный бензиновый двигатель, форсированный по частоте вращения коленчатого вала

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 _____

.

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

Введение;

Обзор способов повышения мощности двигателя с искровым зажиганием;

Тепловой расчет двигателя;

Кинематический расчет;

Динамический расчет

Расчет основных деталей двигателя;

Расчет механизмов и систем двигателя;

Задание на специальную разработку.

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 детали - 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)

Н.Э. Иванов

(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 Иванов Николай Эдуардович
по теме Автомобильный бензиновый двигатель, форсированный по частоте вращения коленчатого вала

№ этап работы	Содержание этапов работы	Форма представления материала	Плановый срок выполнения этапа и представления его на контроль	Планируемый объем выполнения, %	Фактический объем выполнения, %	Отметка о выполнении
1	Тепловой расчет двигателя <i>Чертеж диаграмм теплового расчета; ВСХ</i>	Таблицы, описания Демонстрационный лист	30 апреля 2016 г.	90%		
2	Расчет кинематики и динамики двигателя <i>Чертеж диаграмм кинематического и динамического расчетов</i>	Таблицы, описания Демонстрационный лист	5 мая 2016 г.	90%		
3	Расчет основных деталей двигателя	Таблицы, описания Демонстрационный лист	11 мая 2016 г.	90%		
4	Расчет механизмов и систем двигателя	Таблицы, описания Демонстрационный лист	15 мая 2016 г.	90%		
5	Описание конструкции спроектированной установки	Раздел записки Графический лист	20 мая 2016 г.	80%		
6	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 _____ Н.Э. Иванов
(подпись) (И.О. Фамилия)
Руководитель _____ В.В. Смоленский
(подпись) (И.О. Фамилия)
« ____ » _____ 2016 г.

АННОТАЦИЯ

Настоящая бакалаврская работа состоит из девяти частей. В первой части проекта представлено описание перспективных путей повышения мощности двигателей с искровым зажиганием, во второй части проведен тепловой расчет двигателя, в третьей кинематический, в четвертой динамический расчет, в пятой прочностной расчет основных деталей двигателя, в шестой расчет систем двигателя, в седьмой дано описание конструкции двигателя спроектированного двигателя, проведен анализ его эффективности и токсичности.

Пояснительная записка к бакалаврской работе состоит из 91 стр.

Графическая часть проекта содержит 7 листов формата А1. Продольный и поперечный разрез двигателя, чертеж форсунки коленчатого вала, два листа описания преимуществ спроектированного двигателей, три листа диаграмм.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	8
1. Обзор способов повышения мощности двигателя	
с искровым зажиганием	9
2 Тепловой расчет двигателя.....	19
2.1 Топливо.....	19
2.2 Параметры рабочего тела.....	19
2.3 Параметры окружающей среды и остаточные газы.....	20
2.4 Расчет процесса впуска.....	21
2.5 Расчет процесса сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси	22
2.6 Термодинамический расчёт процесса сгорания	23
2.7 Расчет процессов расширения и выпуска.....	26
2.8 Индикаторные показатели рабочего цикла.....	27
2.9 Эффективные показатели и параметры двигателя.....	28
2.10 Тепловой баланс двигателя.....	29
3 Кинематический расчет	31
4 Динамический расчет	32
4.1 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма.....	32
4.2 Удельные и полные силы инерции.....	32
4.3 Удельные суммарные силы.....	33
4.4 Крутящие моменты.....	34
4.5 Силы, действующие на шатунную шейку коленчатого вала.....	35
4.6 Силы, действующие на колено вала.....	35
4.7 Силы, действующие на коренные шейки.....	35
5 Расчет основных деталей двигателя.....	37
5.1 Расчет поршневой группы.....	37
5.1.1 Расчет поршня.....	37
5.1.2 Расчет поршневого кольца.....	39

5.1.3 Расчет поршневого пальца.....	40
5.2 Расчет шатуна.....	43
5.2.1 Расчет стержня шатуна.....	43
6 Расчет систем двигателя.....	45
6.1 Расчет системы смазки.....	45
6.1.1 Расчет масляного насоса.....	45
6.1.2 Расчет масляного радиатора	46
6.2 Расчет элементов системы охлаждения	47
6.2.1 Расчет водяного насоса.....	47
6.2.2 Расчет поверхности охлаждения водяного радиатора	49
6.2.3 Расчет вентилятора.....	50
7 Задание на специальную разработку.....	52
7.1 Описание спроектированного двигателя на базе ВАЗ – 2112 с модернизированным КШМ.....	52
7.2 Сравнительный анализ двигателя ВАЗ 2112 с модернизированным двигателем.....	53
Заключение.....	56
Список использованных источников.....	57
Приложение А - Результаты теплового расчета.....	60
Приложение Б - Результаты кинематического расчета.....	70
Приложение В - Результаты динамического расчета.....	72
Приложение Г - Результаты расчетов сил действующих в КШМ.....	78
Приложение Д – Спецификация сборочного чертежа.....	90

ВВЕДЕНИЕ

Повышение мощностных показателей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) остается наиболее актуальной проблемой современного двигателестроения. Одним из наиболее простых способов повышения мощности, это увеличение рабочего объема двигателя. Но при этом, требования мирового автомобилестроения ограничивают габариты автомобильного двигателя, что заставляет искать другие пути повышения мощности без значительно увеличения рабочего объема, и, следовательно, габаритов двигателя.

Основными направлениями повышения мощности ДВС без увеличения рабочего объема цилиндров, являются, во-первых, повышение плотности заряда на впуске, обеспечиваемым применением различных типов наддува, а во-вторых, увеличением скоростного режима работы двигателя. При этом основным недостатком применения наддува является значительное удорожание стоимости двигателя, так как стоимость автомобильного компрессора сопоставима со стоимостью двигателя. Недостатком же увеличения частоты вращения коленчатого вала, является повышение механических потерь на трение и в следствии повышенный износ блока цилиндров и деталей кривошипно-шатунного механизма.

Поэтому в бакалаврской работе будет спроектирован двигатель рабочим объемом 1,5 литра с увеличенной частотой вращения коленчатого вала до 7200 мин⁻¹ на номинальном режиме, при этом особое внимание будет уделено снижению механических потерь в кривошипно-шатунном механизме, до уровня близкого к двигателю ВАЗ-2112 с номинальной частотой 5600 мин⁻¹.

1 Обзор способов повышения мощности двигателя с искровым зажиганием

Когда имеется в виду мощность двигателя, необходимо не забывать о том, что эта величина является расчетной. Реальная величина механической энергии, выдаваемой двигателем внутреннего сгорания, измеряется в крутящем моменте при определенных оборотах. Произведение крутящего момента и оборотов, при которых он измерен, и называют мощностью. Мощность высчитывается по следующей формуле:

$$N_e = \frac{P_e \cdot V_d \cdot n}{30\tau}, \text{ кВт.} \quad (1.1)$$

где P_e - среднее эффективное давление равное $P_e = P_{IT} - P_M$, МПа, среднему индикаторному давлению минус механические потери; V_d - рабочий объем двигателя, n - частота вращения коленчатого вала, τ - тактность двигателя.

Рассмотрим практические методы повышения мощности двигателя:

- 1 Увеличение рабочего объема двигателя.
- 2 Увеличение степени сжатия.
- 3 Уменьшение механических потерь.
- 4 Оптимизация процессов горения смеси.
- 5 Увеличение наполнения цилиндров.
- 6 Повышения частоты вращения коленчатого вала.

Рассмотрим каждый из перечисленных методов по отдельности.

Увеличение рабочего объема двигателя.

Увеличить рабочий объем двигателя можно: заменив колен.вал на другой с большим ходом, увеличив диаметр цилиндра или то и другое одновременно. Не надо забывать, что при изменении объема двигателя, необходимо увеличить объем камеры сгорания — для компенсации увеличения объема цилиндра.

Для ВАЗовских двигателей, используемых на переднеприводных автомобилях существуют колен.валы с ходом 60.6, 71, 74.8, 75.6, 78, 80, 84 мм.

При установке колен.вала с большим ходом необходимо доработать (либо заменить) шатуны или поршни.

К расточке цилиндров блока на значительную величину (2мм.) нужно подходить осторожно. Например, при расточке серийного блока ВАЗ 21083 с 82мм. до 84 мм. у двигателя наблюдается повышенный расход масла. Это происходит за счет потери жесткости блока. В этом случае лучше использовать специальную толстостенную отливку блока. Такие блоки ВАЗ выпускает мелкими сериями.

Увеличение объема двигателя приводит к увеличению максимального крутящего момента, но при этом происходит снижение оборотов максимальной мощности. Это происходит из-за уменьшения механического КПД. Если повышение объема происходит за счет увеличения диаметра цилиндров, то возрастает площадь контакта между стенками цилиндра и поршнем с поршневыми кольцами. Как следствие повышается трение. Если повышение объема происходит за счет увеличения хода колен.вала, то возрастает средняя скорость поршня, что приводит к тем же результатам.

В любом случае повышение объема приводит к падению общего КПД двигателя.

Изменение внешней скоростной характеристики серийного двигателя ВАЗ 21083 при замене колен.вала с ходом 71.0 на колен.вал с ходом 74.8

Увеличение степени сжатия.

Термический КПД

Увеличение степени сжатия (степени расширения) является эффективным способом повышения КПД двигателя. Геометрическая степень сжатия рассчитывается по формуле:

Геометрический объем камеры сгорания складывается из:

При работе двигателя, особенно на высоких оборотах, геометрический объем камеры сгорания уменьшается. Это происходит из-за: выбирания зазоров, термического расширения поршня, динамического удлинения шатуна. Так, на гоночном безпрокладочном моторе при сборке поршень не доходил до плос-

кости головки 0.85мм. После эксплуатации двигателя на 9000 об.мин на поршне и плоскости головки присутствовали явные следы контакта.

Степень сжатия зависит от фаз газораспределения (запаздывания закрытия впускного клапана) и угла открытия дроссельной заслонки. Так, на серийных двигателях угол зажигания при частичных нагрузках превышает 40 градусов. Это возможно благодаря низкому наполнению цилиндров и как следствию понижению степени сжатия. Чем выше наполнение, тем выше степень сжатия. Существует понятие — динамическая степень сжатия. У большинства двигателей, дорожных и гоночных, динамическая степень сжатия находится в диапазоне от 7 до 10 и зависит от октанового числа используемого бензина. Очень высокая геометрическая степень сжатия спортивных двигателей в первую очередь объясняется применением распред. валов с широкими фазами. Установка на двигатель модифицированного распред. вала с широкими фазами позволяет несколько увеличить геометрическую степень сжатия. Повышение степени сжатия с переходом на бензин с более высоким октановым числом приводит к увеличению мощности во всем диапазоне оборотов.

Уменьшение механических потерь.

Механический КПД

Механические потери двигателя складываются из: потерь на трение, насосных потерь и потерь на привод вспомогательного оборудования.

Наиболее значительная часть потерь вызвана трением в цилиндре. Потери зависят от площади трущихся деталей, жесткости и количества поршневых колец, толщины масляной пленки и средней скорости поршня. Средняя скорость поршня высчитывается по формуле:

При превышении средней скорости поршня выше 20 м./сек. резко возрастают потери на трение и нагрузки на детали КШМ. Поэтому на высокофорсированных двигателях для увеличения механического КПД необходимо уменьшать ход поршня.

Для уменьшения потерь на трение в паре поршень — цилиндр, необходимо использовать сборные маслосъемные кольца, также целесообразно не-

сколько увеличить зазор между поршнем и цилиндром. Облегчение шатуна, особенно верхней головки, уменьшает боковое давление на поршень, с этой же целью нужно использовать по возможности более длинный шатун, что благоприятно скажется на уменьшении потерь на трение. Теоретически необходимо подогнать по весу и отбалансировать все детали КШМ.

Нами был произведен эксперимент. Был испытан на стенде серийный двигатель ВАЗ 21083. После чего его разобрали, все детали КШМ тщательно подогнали по весу. Отбалансировали колен. вал и шатуны (шатуны балансируются на специальном приспособлении, позволяющем развесить шатуны так, чтобы центр масс у всех находился в одной точке). После повторных испытаний на стенде мы не заметили прибавки мощности. Можно себя успокаивать тем, что хуже не будет.

Для уменьшения потерь на трение в наши гоночные моторы мы устанавливаем новые поршни со значительно уменьшенной площадью юбки, одним компрессионным кольцом, высотой 1.2мм. и сборным маслосъемным кольцом высотой 2мм. Также используем специально изготовленные шатуны Н-образного сечения, которые длиннее серийного 2108 на 12 мм. и намного жестче и легче.

Для уменьшения трения в шейках колен.вала, необходимо хонингованием увеличить на 0.02мм.(от номинального вазовского размера) внутренний диаметр нижней головки шатуна и постелей колен.вала. Падение давления масла при этом не происходит. Также необходимо проконтролировать легкость вращения распред.вала.

При наполнение цилиндров воздухом возникает перепад давлений между цилиндрами двигателя и атмосферой. Двигатель в этой части цикла работает как насос и на его привод расходуется часть мощности. Чем меньше аэродинамическое сопротивление впускной системы, тем меньше потери энергии. Следовательно, уменьшение сопротивления в головке приводит не только к увеличению наполнения, но и к уменьшению насосных потерь. Таким же образом благотворно сказывается установка распред.валов с более широкими фазами.

Уровень масла в поддоне серийного двигателя находится в непосредственной близости от вращающегося колен.вала. При боковых и линейных ускорениях автомобиля масло попадает на противовесы и шейки колен.вала и тормозит его вращение. Применение системы "сухой картер", когда масло откачивается из поддона в отдельную емкость, позволяет увеличить мощность двигателя, особенно при высоких оборотах.

Часть энергии двигателя используется на привод вспомогательного оборудования, такого как: привод механизма ГРМ, водяной насос, генератор и т.д. Для форсированных двигателей, используемых на высоких оборотах, целесообразно увеличить передаточное отношение привода водяного насоса и генератора. При установке кондиционера и гидроусилителя руля эффективная мощность двигателя снижается.

Оптимизация процессов горения смеси.

Характеристики ДВС в конечном счете зависят от процессов происходящих в камере сгорания, где происходит преобразование тепловой энергии в механическую работу. Перемешивание свежего заряда с остаточными газами, воспламенение смеси, протекание горения и потери теплоты зависят от конструкции камеры сгорания.

Конструкция камеры сгорания должна обеспечить перемешивание свежего заряда — для улучшения процессов сгорания, быть компактной — для уменьшения тепловых потерь и уменьшения вероятности возникновения детонации. Чем больше площадь поверхности камеры сгорания, тем больше тепла отводится наружу и теряется, следовательно уменьшается мощность. Чем на большее расстояние перемещается фронт пламени, тем больше вероятностью возникновения детонации потому, что увеличивается время контакта еще не воспламенившейся смеси с горящим зарядом.

Большая часть объема в камере сгорания должна быть сконцентрирована около свечи. Во время движения поршня к ВМТ смесь выдавливается из зазора между головкой поршня и плоскостью головки в сторону свечи зажигания, при этом происходит интенсивное движение (турбулизация) заряда, что способ-

ствуется лучшему сгоранию. Чем меньше зазор, тем меньше вероятность возникновения детонации, так как уменьшается общее количество смеси отдаленной от свечи зажигания. Правда при этом работа двигателя становится жестче, из-за более высокой скорости нарастания давления.

Не следует распиливать камеру сгорания со стороны свечи до размеров цилиндра, хотя при этом и происходит большая концентрация смеси в оптимальной зоне. Необходимо создать небольшую зону противодавления, препятствующую забрызгиванию свечи зажигания.

Полирование поверхности камеры сгорания и днища поршня, способствует некоторому уменьшению тепловых потерь (повышению относительного КПД), хотя в процессе длительной работы двигателя они покрываются нагаром.

Увеличение наполнения цилиндров.

Увеличение коэффициента наполнения цилиндров (объемного КПД) является самым эффективным способом повышения мощности двигателя. Все остальные мероприятия, весьма трудоемкие и дорогостоящие приводят к не очень высоким результатам.

Максимальный коэффициент наполнения серийного двигателя ВАЗ 21083 примерно равен 75%. То есть в двигатель попадает количество воздуха равное 75% от общего объема цилиндров. На лучших гоночных атмосферных двигателях (двигатели без наддува) коэффициент наполнения достигает 115-125%. При правильной настройке двигателя с низким сопротивлением впускной системы, можно добиться показателей коэффициента наполнения выше 100%.

Коэффициент наполнения меняется при разных режимах работы двигателя и достигает своего максимального значения при благоприятном перепаде давлений в цилиндре, впускной и выпускной системах в узком диапазоне оборотов, близком к оборотам максимального крутящего момента.

При работе двигателя во впускной и выпускной системах происходят волновые процессы, их свойства зависят от многих причин: геометрических размеров и аэродинамического сопротивления впускной и выпускной систем,

фаз газораспределения, оборотов двигателя и других факторов. С изменением режимов работы двигателя форма, частота и амплитуда волн меняются.

Перепады давлений в серийном двигателе ВАЗ 21212 при работе с полностью открытой дроссельной заслонкой, на 3000 об/мин. и 6000 об/мин.

Для повышения максимальной мощности необходимо создать условия, при которых наибольший коэффициент наполнения сдвинется на более высокие обороты. Например, если на двигателе ВАЗ 21083 мы повышаем коэффициент наполнения до 100% на 3000 об./мин., то мощность возрастает с 48 до 62 — на 14 л.с., а если на 6000 об./мин. до тех же 100%, то мощность возрастает с 67 до 133 — на 66 л.с.

Увеличение оборотов максимальной мощности для повышения КПД атмосферного двигателя является неизбежным, так как коэффициент наполнения невозможно увеличить выше определенного числа, но можно поднять обороты при которых достигается его максимальное значение. При этом происходит увеличение отдачи энергии за единицу времени. Именно этим объясняются высокие обороты двигателей формулы 1 (17000-18000 об.мин).

Для увеличения коэффициента наполнения также необходимо снизить аэродинамическое сопротивление во впускной и выпускной системах и каналах головки двигателя. Самое высокое сопротивление возникает в районе клапанной щели. Модификации именно этой части газовых каналов нужно уделять особое внимание. Скорость воздуха во впускной системе не должна превышать 50-70 м/с. Для увеличения оборотов двигателя необходимо увеличить проходные сечения газовых каналов и в первую очередь диаметры тарелок клапанов. Это позволит увеличить обороты максимальной мощности и сделать перегиб кривой более плавным. Но при этом может наблюдаться некоторое падение мощности на малых и средних оборотах. Это объясняется тем, что при этих режимах скорость воздуха недостаточно высока.

Изменение внешней скоростной характеристики спортивного двигателя ВАЗ 21083 1.6 группа А, SOLEX 24x26, при замене клапанов с диаметров тарелок 31.5 и 37 на диаметры 34 и 39

Установка на двигатель многодроссельной системы с индивидуальной впускной трубой на каждый цилиндр позволяет значительно повысить мощность, но только в том случае если перекрытие клапанов достигает существенной величины. (перекрытие — это одинаковая высота открытия впускного и выпускного клапана в ВМТ- на серийных распред.валах 0.2 — 0.8 мм, на спортивных 3 — 5 мм.)

Изменение внешней скоростной характеристики серийного двигателя ВАЗ 21083 1.5 , при установке карбюраторов WEBER 40 DCOE. Прибавка мощности 8 л.с.

Изменение внешней скоростной характеристики спортивного двигателя ВАЗ 21083 1.6 группа А, при установке карбюраторов WEBER 45 DCOE. Прибавка мощности 33 л.с.

Установка спортивной выпускной системы также дает эффект только при высоком перекрытии клапанов. Так, установка "паука" на серийный двигатель может повысить мощность максимум на 2-3 л.с. Это обусловлено принципом работы настроенной выпускной системы. В первый момент после открытия выпускного клапана, отработавшие газы устремляются в выпускную трубу со скоростью превышающей скорость звука. Быстрое удаление первой части отработавших газов создает в выпускной трубе низкое давление. При достижении звуковой волной первого резкого увеличения диаметра выпускной системы (как правила резонатора) давление в системе повышается. Это создает первую волну, после чего колебательный процесс продолжается с уменьшающейся амплитудой.

Если впускной клапан открывается в тот момент, когда в выпуске давление ниже чем во впускном канале, то дополнительное разрежение способствует увеличению наполнения. При этом часть свежей смеси высасывается в выпускной канал. При благоприятных условиях эта часть заряда выталкивается обратно в цилиндр зоной повышенного давления перед самым закрытием выпускного клапана. Чем выше высота перекрытия клапанов, тем более ярко выражен этот процесс.

К сожалению это происходит в узком диапазоне оборотов зависящем от геометрии впускной, выпускной систем и фаз газораспределения.

В остальных режимах работы двигателя может происходить обратный процесс, когда зона повышенного давления в выпуске в момент перекрытия мешает поступлению свежего заряда.

Именно поэтому такие выпускные системы называются настроенными. (Настроенными на узкий диапазон оборотов)

Изменение размеров выпускной системы, а также конструкции и месторасположения резонатора, оказывает огромное значение на характеристику форсированного двигателя.

Двигатель чувствует изменения длины любой части "паука" на 20 мм. и диаметра на 1 мм.

Изменение внешней скоростной характеристики при использовании различных конфигураций выпускной системы. Двигатель ВАЗ 2112 1500 головка серийная, низ серийный, модифицированные распред. валы (перекрытие 2.8 мм.) четырех дроссельный впуск SVR.

Рабочая температура спортивного двигателя не должна превышать 75-80 градусов. При такой температуре достигается максимальное наполнение и уменьшается вероятность детонации. На стендовых испытаниях при увеличении температуры охлаждающей жидкости с 70 до 95 градусов наблюдается падение максимальной мощности на 4-6%. Для поддержания низкой температуры двигателя на спортивные автомобили необходимо устанавливать масляные радиаторы, а также водяные радиаторы с повышенной площадью.

При значительном увеличении оборотов и мощности двигателя существенно возрастают нагрузки на его детали. В первую очередь это относится к клапанам, колен.валу, поршням, шатунам и шатунным болтам. Также увеличение давления в цилиндрах двигателя повышает требования к уплотнению разъема между блоком и головкой. Поэтому в высокофорсированных спортивных двигателях необходимо использовать специально изготовленные высококачественные комплектующие.

Для уплотнения разъема головки и блока рекомендуется использовать так называемую безпрокладочную конструкцию. В блоке фрезеруются канавки, в которые вставляются пассивы из специальной термостойкой резины. Головка притягивается с моментом 6 кгм. Такая конструкция намного жестче чем с серийной прокладкой и имеет более высокую теплоотдачу, устойчивость к разрушению от детонации и перегрева двигателя.

Таким образом, видно, что без увеличения рабочего объема увеличение мощности можно достигнуть следующими путями: применение наддува – его мы рассмотрели ранее, влиянием на процесс сгорания рассмотренным выше, осуществлением двухтактного цикла, что имеет свои значительные недостатки, а именно ухудшение условий протекания процесса сгорания, худшее наполнение, худшее использование выделившейся теплоты в процессе расширения, меньший ресурс двигателя. И последнее это увеличение частоты вращения коленчатого вала, что ведет к увеличению механических потерь и повышенному износу двигателя.

Поэтому рассмотрим более внимательно возникающие проблемы на пути повышения частоты вращения коленчатого вала.

Во-первых, повышение частоты вращения коленчатого вала приводит к повышению средней скорости поршня (1.2), а, следовательно, к увеличению износа цилиндропоршневой группы. В связи с чем, при повышении частоты вращения коленчатого вала необходимо уменьшения радиуса кривошипа и длины шатуна, тем самым, снижая её.

$$V_n = \frac{S \cdot n}{30}, \text{ м/с } , \quad (1.2)$$

где S - ход поршня равный 2 радиусам КВ, n - частота вращения коленчатого вала

Во-вторых, повышение частоты вращения коленчатого вала приводит к увеличению инерционных сил, поэтому необходимо облегчать шатун и поршень, без значительного ущерба их износостойкости. А именно уменьшать длину и соответственно размеры шатуна, а также длину юбки на поршне.

2 Тепловой расчет двигателя

Произведем расчет четырехтактного двигателя с впрыском, предназначенного для легкового автомобиля по методике Вибе. [16]

Исходные данные: $V_L = 1.5$ л; $n_N = 7200$ мин⁻¹; $i = 4$ – число цилиндров; $\tau = 4$ – тактность; $\varepsilon = 10,5$ – степень сжатия.

Расчет производится на следующих скоростных режимах:

$n_{\min} = 900$ мин⁻¹, режим холостого хода; $n = 2000$ мин⁻¹; $n_M = 4000$ мин⁻¹, режим максимального крутящего момента; $n_N = 7200$ мин⁻¹, режим максимальной мощности; $n_{\max} = 8000$ мин⁻¹, режим максимально допустимой частоты вращения КВ.

2.1 Топливо

В соответствии с заданной степенью сжатия $\varepsilon = 10,5$ можно использовать бензин марки АИ-93.

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 1 кг топлива:

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

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

Применение впрыска топлива и электронного управления позволяет принять коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$.

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

Количество горючей смеси:

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

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

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

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

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

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.

Таблица 2.1 - Параметры рабочего тела

$n, \text{ мин}^{-1}$	α	$M_1,$ кмоль гор.см./кг топл.	$M_{CO_2},$ кмоль $CO_2/\text{кг}$ топл.	$M_{CO},$ кмоль $CO/\text{кг}$ топл.	$M_{H_2O},$ кмоль $H_2O/\text{кг}$ топл.	$M_{H_2},$ кмоль $H_2/\text{кг}$ топл.	$M_{N_2},$ кмоль $N_2/\text{кг}$ топл.	$M_2,$ кмоль пр.сг./кг топл.	μ_0
900	0,96	0,504849	0,0655	0,0057	0,0696	0,0029	0,3923	0,536704	1,063097
2000	1	0,5247	0,0713	0	0,0725	0	0,4087	0,5524	1.05243
4000	1	0,5247	0,0713	0	0,0725	0	0,4087	0,5524	1.05243
7200	1	0,5247	0,0713	0	0,0725	0	0,4087	0,5524	1.05243
8000	1	0,5247	0,0713	0	0,0725	0	0,4087	0,5524	1.05243
Двигатель ВАЗ-2112									
900	0.96	0,504849	0,0655	0,0057	0,0696	0,0029	0,3923	0,536704	1,063097
2600	1	0,5247	0,0713	0	0,0725	0	0,4087	0,5524	1.05243
3700	1	0,5247	0,0713	0	0,0725	0	0,4087	0,5524	1.05243
5000	1	0,5247	0,0713	0	0,0725	0	0,4087	0,5524	1.05243
5600	1	0,5247	0,0713	0	0,0725	0	0,4087	0,5524	1.05243

2.3 Параметры окружающей среды и остаточные газы

Атмосферные условия:

$$p_0 = 0,1 \text{ МПа и } T_0 = 293 \text{ К.}$$

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;

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

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	1105	0,110
2000	1,189	293	0,1	1210	0,113
4000	1,189	293	0,1	1300	0,115
7200	1,189	293	0,1	1330	0,118
8000	1,189	293	0,1	1370	0,120
Двигатель ВА3-2112					
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

Температура подогрева свежего заряда на номинальном скоростном режиме принимается $\Delta T_N = 8^\circ\text{C}$. Тогда, $A_T = \Delta T_N / (110 - 0,0125n_N) = 8 / (110 - 0,0125 \cdot 5600) = 0,2$;

$$\Delta T = A_T(110 - 0,0125n) = 0,2 (110 - 0,0125n) = 22 - 0,0025n. \quad (2.13)$$

Плотность заряда на впуске:

$$\rho_k = p_k \cdot 10^6 / (R_B T_k) = 0,1 \cdot 10^6 / (287 \cdot 293) = 1,189 \text{ кг/м}^3.$$

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:

$$\gamma_r = \frac{T_\kappa + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{\varphi_{оч} p_r}{\varepsilon \varphi_{доз} p_a - \varphi_{оч} p_r} = \frac{293 + 8}{1060} \cdot \frac{0,118}{9,9 \cdot 1,1 \cdot 0,085 - 0,118} = 0,0415, \quad (2.16)$$

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

Температура в конце впуска:

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

Коэффициент наполнения:

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

Удельный объем рабочего тела в конце процесса наполнения

$$V_a = 8,314 \cdot 10^{-3} \left[\left(\alpha \cdot \frac{l_0}{\mu_B} + \frac{1}{\mu_m} \right) T_a \right] / [(1 + \alpha \cdot l_0) p_a] \text{ (м}^3\text{)}, \quad (2.19)$$

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

Результаты расчета процесса впуска приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Расчет процесса впуска

n, мин ⁻¹	ΔT , °C	Δp_a , МПа	p_a , МПа	$\varphi_{оч}$	$\varphi_{доз}$	γ_r	T_a , К	η_v	V_a , К
900	19,75	0,010275	0,089725	0,99	0,9	0,041708	344,4699	0,728776	1,05061
2000	17	0,016054	0,083946	0,94	0,96	0,036777	341,9252	0,736186	1,11679
4000	12	0,021231	0,078769	0,88	1,05	0,030947	334,8677	0,775829	1,16563
7200	4	0,0271313	0,072869	0,84	0,97	0,034421	331,3737	0,667776	1,24686
8000	2	0,031466	0,068534	0,8	0,92	0,03652	332,8754	0,591791	1,33173
Двигатель ВАЗ-2112									
900	19,75	0,005779	0,094221	1	0,85	0,043126	344,4703	0,721787	1,00049
2600	15,5	0,010275	0,089725	0,94	0,93	0,036289	338,3532	0,770691	1,03394
3700	12,75	0,013588	0,086412	0,98	1	0,033797	336,4559	0,804532	1,06756
5000	9,5	0,016054	0,083946	0,81	0,95	0,029931	330,4714	0,758778	1,07938
5600	8	0,019425	0,080575	0,77	0,94	0,029751	330,0071	0,721778	1,12296

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_1	P_c , МПа	T_c , К	Θ°ПКВ	V_y , м ³ /кг	P_y , МПа	T_y , К
900	1,06057	1,3704	2,250885	822,9999	15	0,120855	1,737669	767,4028
2000	1,050572	1,37167	2,112198	819,3635	22	0,153412	1,278015	715,0775
4000	1,050858	1,3728	1,987199	804,5864	26	0,179064	1,030859	673,2341
7200	1,050688	1,37517	1,848629	800,6406	29	0,2086996	0,851296	647,9795
8000	1,050585	1,37525	1,738991	804,6256	32	0,242999	0,711395	630,4833
Двигатель ВАЗ-2112								
900	1,060488	1,37058	2,364652	823,3493	15	0,115161	1,823871	767,5247
2600	1,050596	1,372	2,259369	811,433	20	0,134725	1,469604	722,1175
3700	1,050718	1,3728	2,180028	808,4022	23	0,150917	1,267603	697,7188
5000	1,050909	1,37378	2,122703	795,8551	26	0,166039	1,098591	665,2796
5600	1,050917	1,3753	2,044748	797,5824	28	0,182916	0,977444	652,0824

Текущие значения удельного объёма, давления и температуры рабочего тела рассчитываются по аналогичным формулам.

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

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

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

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;

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

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

$n, \text{мин}^{-1}$	δ	Ψ	ζ	$q_z, \text{Дж/кг}$	$E_2, \text{МПа}$	$\varphi_z, ^\circ \text{ПКВ}$	m
900	0,9435	0,81	0,764277	2098,549	41,946456	42	3.1
2000	1	0,86	0,86	2310,212	43,440894	48	3.2
4000	1	0,96	0,96	2590,321	46,66714	54	3.3
7200	1	0,97	0,97	2555,006	43,03215	60	3.4
8000	1	0,99	0,99	2630,187	41,46473	70	3.5
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° ПКВ, а значения указанных параметров приводятся Приложении В.

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 газов от конца процесса сгорания до 540° поворота коленчатого вала находятся из соотношений

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

где φ_{PT} – текущее значение поворота коленчатого вала

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

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

Для оценки правильности выбора значения температуры отработавших газов, произведём проверку

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

погрешность расчёта Δ :

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

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	0,16606	2605,3	4,553	6,3267	1,1888	0,507	1838	1104,2	-0,065
2000	0,171561	2819,93	4,734	6,5096	1,1824	0,517	2004	1207	-0,194
4000	0,189587	3012,81	4,578	6,148	1,1752	0,541	2191	1307,5	0,579
7200	0,22103	2920,74	3,806	5,641	1,1774	0,496	2148	1331	0,081
8000	0,28784	2860,89	2,863	4,6278	1,1779	0,471	2178	1380,9	0,066
Двигатель ВА3-2112									
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

Ошибка выбора температуры остаточных газов не превышает 5 %.

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, мин ⁻¹	L _i , кДж	P _i , Мпа	N _i , кВт	η _i	g _i , г/кВт*ч
900	0,9854048	1,0366619	11,662446	0,3982229	205,78797
2000	1,1065808	1,095157	27,378926	0,4335122	189,03617
4000	1,2406601	1,1764051	58,820254	0,4418794	185,45667
7200	1,187885	1,0529843	94,768588	0,4595196	178,3373
8000	1,1750886	0,9750105	97,501045	0,480124	170,68399
Двигатель ВАЗ-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

Средняя скорость поршня:

$$v_n = \frac{Sn}{30}, \text{ м/с} \quad (2.56)$$

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

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

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.

Таблица 2.8 - Эффективные показатели двигателя

п, мин ⁻¹	V _{п.ср} , м/с	p _м , Мпа	p _е , Мпа	η _м	η _е	g _е , г/(кВт.ч)	Ne, кВт	Me, Н.м	G _т , кг/ч
900	1,68	0,061176	0,975486	0,94	0,3747	218,6936	10,97422	115,5912	2,399
2000	3,73	0,08828	1,006877	0,92	0,3985	205,6103	25,17193	119,3109	5,175
4000	7,467	0,13756	1,038845	0,88	0,3902	210,0141	51,94225	123,099	10,908
7200	13,44	0,216408	0,836576	0,79	0,365	224,4701	75,29187	99,13095	16,901
8000	14,93	0,23612	0,73889	0,75	0,3638	225,2278	73,88905	87,55556	16,6411
Двигатель ВА3-2112									
900	2,13	0,0671	1,0389	0,93	0,4029	273,3719	11,68	123,99	3,377
2600	6,153	0,1202	1,0449	0,89	0,3951	267,3998	33,96	124,72	9,043
3700	8,756	0,1546	1,0834	0,87	0,3924	258,8332	50,11	129,3	12,464
5000	11,833	0,1952	1,0581	0,84	0,4064	261,652	66,13	126,29	15,336
5600	13,253	0,2139	1,0071	0,82	0,4066	271,5434	70,49	120,19	17,208

2.10 Тепловой баланс двигателя

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

$$Q_o = \frac{H_u G_T}{3.6} = \frac{43930 G_T}{3.6} = 12203 G_T \quad (2.67)$$

Теплота, эквивалентная эффективной работе за 1 с:

$$Q_e = 1000 N_e \text{ и } q_e = Q_e * 100 / Q_o \quad (2.68)$$

Теплота, передаваемая охлаждающей среде:

$$Q_B = \frac{ciD^{1+2m}n^m(H_u - \Delta H_u)}{\alpha H_u}, \quad (2.69)$$

$$q_B = Q_B * 100 / Q_o; \quad (2.70)$$

Теплота, унесенная с отработанными газами:

$$Q_r = \left(\frac{G_T}{3.6} \right) \left\{ M_2 \left[(mc_V'')_{t_o}^{t_r} + 8.315 \right]_{t_o}^{t_r} - M_1 \left[(mc_V'')_{t_o}^{t_{20}} + 8.315 \right]_{t_o}^{t_{20}} \right\}, \quad (2.71)$$

$$q_r = Q_r * 100 / Q_0 \quad (2.72)$$

где $(mc_V'')_{t_o}^{20} = 20.775$ 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.

$$Q_{н.с} = \Delta H_U * G_T / 3.6 \quad (2.73)$$

$$q_{н.с.} = Q_{н.с.} * 100 / Q_0 \quad (2.74)$$

Неучтенные потери теплоты:

$$Q_{ост} = Q_0 - (Q_e + Q_g + Q_r + Q_{н.с.}), \quad (2.75)$$

$$q_{ост} = Q_{ост} * 100 / Q_0 \quad (2.76)$$

Результаты расчетов тепловой баланс двигателя сводим в таблицу 2.9.

Таблица 2.9 - 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	2,4	23363	8432	36,1	6352	27,2	6080	26,0	0	0	1181	5,1
2000	5,2	42977	16556	38,5	12405	28,9	12509	29,1	0	0	1508	3,5
4000	10,9	60525	22048	36,4	18022	29,8	18004	29,7	0	0	2450	4,0
7200	16,9	107949	33381	30,9	34522	32,0	35201	32,6	0	0	4845	4,5
8000	16,6	115752	33212	28,7	35804	30,9	36961	31,9	0	0	6514	5,6

3 Кинематический расчет

Премещение поршня. [2].

$$S_x = R \left[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right] \text{ мм.} \quad (3.1)$$

Угловая скорость вращения коленчатого вала

$$\omega = \pi n / 30 = 3,14 \cdot 5600 / 30 = 586 \text{ рад/с.}$$

Скорость поршня

$$v_{\Pi} = \omega R \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right) \text{ м/с.} \quad (3.2)$$

Ускорении поршня

$$j = \omega^2 R (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi); \text{ м/с}^2. \quad (3.3)$$

Максимальное значение ускорения поршня достигается при $\varphi=0^0$;

$$j_{\max} = \omega^2 R (1 + \lambda) = 586^2 \cdot 35,5 (1 + 0,289) = 15767 \text{ м/с}^2. \quad (3.4)$$

Расчет производится аналитически через каждые 10^0 угла поворота коленчатого вала. Расчитанные значения представлены в приложении, график представлен на плакате.

4 Динамический расчет

4.1 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма

С учетом диаметра цилиндра, отношения S/D , рядного расположения цилиндров и достаточно высокого значения p_z устанавливаются: [1]

- масса поршневой группы:

$$m_n = m'_n \cdot F_n = 75 \cdot 0,00535 = 0,316 \text{ кг}; \quad (4.1)$$

- масса шатуна :

$$m_{ш} = m'_{ш} \cdot F_n = 109,6 \cdot 0,00535 = 0,624 \text{ кг}; \quad (4.2)$$

- масса неуравновешанных частей одного колена вала без противовесов :

$$m_k = m'_k \cdot F_n = 150 \cdot 0,00535 = 0,805 \text{ кг}. \quad (4.3)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца:

$$m_{ш.п} = 0,275 \cdot m_{ш} = 0,275 \cdot 0,624 = 0,165 \text{ кг}. \quad (4.4)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа:

$$m_{ш.к} = 0,725 \cdot m_{ш} = 0,725 \cdot 0,624 = 0,473 \text{ кг}. \quad (4.5)$$

Массы, совершающие возвратно-поступательное движение:

$$m_j = m_n + m_{ш.п} = 0,316 + 0,165 = 0,481 \text{ кг}. \quad (4.6)$$

Массы, совершающие вращательное движение:

$$m_r = m_k + m_{ш.к} = 0,805 + 0,473 = 1,278 \text{ кг}. \quad (4.7)$$

4.2 Удельные и полные силы инерции

Сила инерции возвратно-поступательного движения масс

$$p_j = -j m_j / F_n = -j 0,481 \cdot 10^{-6} / 0,00535 = -j 141 \cdot 10^{-6} \text{ МПа}. \quad (4.8)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс

$$K_R = -m_R R \omega^2 = -1,278 \cdot 0,00374 \cdot 586^2 = -28,02 \text{ кН.} \quad (4.9)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна

$$K_{Ru} = -m_{u.k} R \omega^2 = -0,473 \cdot 0,00374 \cdot 586^2 = -8,7 \text{ кН.} \quad (4.10)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа

$$K_{Rk} = -m_{.k} R \omega^2 = -0,805 \cdot 0,00374 \cdot 586^2 = -19,32 \text{ кН.} \quad (4.11)$$

4.3 Удельные суммарные силы

Удельная сила, сосредоточенная на оси поршневого пальца:

$$p = \Delta p_z + p_j \text{ (МПа).} \quad (4.12)$$

Удельная нормальная сила:

$$p_N = p \cdot \operatorname{tg} \beta \text{ (МПа).} \quad (4.13)$$

Удельная сила, действующая вдоль шатуна:

$$p_s = p(1/\cos \beta) \text{ (МПа).} \quad (4.14)$$

Удельная сила, действующая по радиусу кривошипа

$$p_k = p \cos(\varphi + \beta) / \cos \beta \text{ (МПа).} \quad (4.15)$$

Удельная и полная тангенциальные силы

$$p_T = p \sin(\varphi + \beta) / \cos \beta \text{ (МПа) и } T = p_T \cdot 0,004776 \cdot 10^3 \quad (4.16)$$

Расчетные значения представлены в таблице 4.2.

По данным таблицы 4.2. строят графики изменения удельных сил p_j , p , p_s , p_N , p_k , и p_T в зависимости от угла поворота коленчатого вала φ . Графики представлены в графической части бакалаврской работы.

Среднее значение тангенциальной силы за цикл:

$$T_{cp} = \frac{2 \cdot 10^6}{\pi \tau} p_i F_{II} = \frac{2 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 4} \cdot 1,2486 \cdot 0,00535 = 1063 \text{ Н}; \quad (4.17)$$

$$p_{T_{cp}} = \frac{\Sigma F_1 - \Sigma F_2}{OB} M_p = \frac{1991 \cdot 1170}{240} \cdot 0,05 = 0,196 \text{ МПа}; \quad (4.18)$$

по данным расчета по площади, заключенной между кривой p_T и осью абсцисс
ошибка $\Delta = (1063 - 1049)100/1063 = 1,31\%$

$$T_{cp} = p_{T_{cp}} F_{II} = 0,196 \cdot 0,00535 \cdot 10^6 = 1049 \text{ Н}; \quad (4.19)$$

4.4 Крутящие моменты.

Крутящий момент одного цилиндра

$$M_{кр.ц} = TR = T \cdot 0,0374 \cdot 10^3 \text{ Нм} \quad (4.20)$$

Период изменения крутящего момента четырехтактного двигателя с равными интервалами между вспышками

$$\Theta = 720 / i = 720 / 4 = 180^\circ \quad (4.21)$$

Средний крутящий момент двигателя:

- по данным теплового расчета

$$M_{кр.ср} = M_i = M_e / \eta_m = 143,8 / 0,9052 = 158,8 \text{ Нм} \quad (4.22)$$

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

$$M_{кр.ср} = \frac{F_1 - F_2}{OA} M_m = \frac{1470 - 615}{60} 10 = 160,5 \text{ Нм} \quad (4.23)$$

- ошибка $\Delta = (158,8 - 160,5)100/158,8 = 1,07\%$.

Максимальный и минимальный крутящие моменты

$$M_{кр\ max}=570\ \text{Нм}; \quad M_{кр\ min}=277\ \text{Нм}$$

4.5 Силы, действующие на шатунную шейку коленчатого вала

Суммарная сила, действующая на шатунную шейку по радиусу кривошипа:

$$P_k = K + K_{R_{III}} = K + p_k F_{II} \text{ Н.} \quad (4.24)$$

По развернутой диаграмме R_{III} определяют

$$R_{III.\max} = 17,31\ \text{кН}; \quad R_{III.\min} = 0,577\ \text{кН}$$

$$R_{III.\text{cp}} = FM_p / OB = 28425 \cdot 0,1 / 240 = 10,66\ \text{кН}; \quad (3.3)$$

где OB – длина диаграммы, мм; F – площадь под кривой R_{III} , мм².

По полярной диаграмме строят диаграмму износа шатунной шейки. По диаграмме износа определяют расположение оси масляного отверстия.

4.6 Силы, действующие на колено вала

Суммарная сила, действующая на колено вала по радиусу кривошипа:

$$K_{PK} = P_K + K_{RK} = P_K - 8,960\ \text{кН.} \quad (4.25)$$

Результирующая сила, действующая на колено вала,

$$R_k = \sqrt{(PT_k \cdot 10^3 \cdot F_n)^2 + (K_{PK})^2} \quad (4.26)$$

4.7 Силы, действующие на коренные шейки

Коленчатый вал рассчитываемого двигателя полноопрный с кривошипами, расположенными под углом $\gamma_k=180^\circ$. Порядок работы двигателя 1–3–4–2. Следовательно, когда первый кривошип повернут на угол $\phi_1=0^\circ$, третий криво-

шип будет находиться в положении $\varphi_3=0(720) - 180=540^0$, четвертый – $\varphi_4=0(720) - 360=360^0$ и второй – $\varphi_2=0(720) - 540=180^0$.

Сила, действующая на первую коренную шейку:

$R_{к.ш1} = -0,5R_{к1}$ (см. таблица 4.5). Изменение силы $R_{к.ш1}$ в зависимости от φ показывает полярная диаграмма $R_{к}$, но повернутая на 180^0 .

Сила, действующая на вторую коренную шейку:

$$R_{к.ш2} = \sqrt{T_{к2}^2 + K_{к2}^2}, \quad (4.27)$$

где $T_{к2} = -0,5(T_1 - T_2)$; $K_{к2} = -0,5(K_{рк1} - K_{рк2})$.

Сила, действующая на третью коренную шейку:

$$R_{к.ш3} = \sqrt{T_{к3}^2 + K_{к3}^2}, \quad (4.28)$$

где $T_{к3} = 0,5(T_2 + T_3)$; $K_{к3} = 0,5(K_{рк2} + K_{рк3})$.

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 360^0 .

5 Расчет основных деталей двигателя

5.1 Расчет поршневой группы

5.1.1 Расчет поршня

Напряжение изгиба в днище поршня.[5]

$$\sigma_{из} = p_{зд}(r_i/\delta)^2 = 7,659(31,75/6,5)^2 = 182,2 \text{ МПа}, \quad (5.1)$$

где $r_i = D/2 - (s+t+\Delta t) = 82,5/2 - (5-3,9-0,6) = 31,75 \text{ мм}$.

Днище поршня должно быть усилено ребрами жесткости.

Напряжение сжатия в сечении х – х

$$\sigma_{сж} = P_{зд}/F_{х-х} = 0,0409/0,00103 = 39,9 \text{ МПа}, \quad (5.2)$$

где $P_{зд} = p_{зд} \cdot F_{П} = 7,659 \cdot 53,45 \cdot 10^{-4} = 0,0409 \text{ МН}$;

$$F_{х-х} = (\pi/4)(d_k^2 - d_i^2) - n_m F' = [(3,14/4)(73,5^2 - 63,5^2) - 10 \cdot 5] \cdot 10^{-6} = 0,00103 \text{ м}^2;)$$

$$d_k = D - 2(t + \Delta t) = 82,5 - 2(3,9 + 5) = 73,5 \text{ мм};$$

$$F' = (d_k - d_i) d_m / 2 = (73,5 - 63,5) \cdot 1/2 = 5 \text{ мм}^2.$$

Напряжение разрыва в сечении х – х:

$$\omega_{х.х \max} = \pi n_{х.х \max} / 30 = 3,14 \cdot 7500 / 30 = 785 \text{ рад/с}; , \quad (5.3)$$

- масса головки поршня с кольцами, расположенными выше сечения х – х:

$$m_{х-х} = 0,5 m_n = 0,5 \cdot 0,316 = 0,158 \text{ кг}; , \quad (5.4)$$

- максимальная разрывающая сила

$$P_j = m_{х-х} R \omega_{х.х \max}^2 (1 + \lambda) = 0,158 \cdot 0,0374 \cdot 785^2 (1 + 0,289) = 0,0045 \text{ МН}; , \quad (5.5)$$

Напряжение разрыва

$$\sigma_p = P_j / F_{x-x} = 0,0045 / 0,00103 = 4,4 \text{ МПа.} , \quad (4.28)$$

Напряжение в верхней кольцевой перемычке:

- среза

$$\tau = 0,0314 p_{z\pi} D / h_{\pi} = 0,0314 \cdot 7,659 \cdot 82,5 / 3,7 = 5,4 \text{ МПа; } , \quad (4.28)$$

- изгиба

$$\sigma_{из} = 0,0045 p_{z\pi} (D / h_{\pi})^2 = 0,0045 \cdot 7,659 \cdot (82,5 / 3,7)^2 = 17,1 \text{ МПа; } , \quad (4.28)$$

- сложное

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{из}^2 + 4\tau^2} = \sqrt{17,1^2 + 4 \cdot 5,4^2} = 20,2 \text{ МПа.} , \quad (4.28)$$

- удельное давление поршня на стенку цилиндра:

$$q_1 = N_{max} / (h_{ю} D) = 0,0079 / (31,3 \cdot 82,5) \cdot 10^{-3} = 3,059 \text{ МПа; } , \quad (4.28)$$

$$q_2 = N_{max} / (H D) = 0,0079 / (50,3 \cdot 82,5) \cdot 10^{-3} = 1,904 \text{ МПа. } , \quad (4.28)$$

Диаметры головки и юбки поршня:

$$D_{\Gamma} = D - \Delta_{\Gamma} = 82 - 0,57 = 81,43 \text{ мм; } , \quad (4.28)$$

$$D_{Ю} = D - \Delta_{Ю} = 82 - 0,165 = 81,835 \text{ мм; } , \quad (4.28)$$

где $\Delta_{\Gamma} = 0,007D = 0,007 \cdot 82 = 0,57 \text{ мм;}$ $\Delta_{Ю} = 0,002D = 0,002 \cdot 82 = 0,165 \text{ мм.}$

Диаметральные зазоры в горячем состоянии

$$\Delta_z = D[1 + \alpha_y(T_y - T_0)] - D_z[1 + \alpha_n(T_n - T_0)] = , \quad (4.28)$$

$$= 82,5[1 + 11 \cdot 10^{-6}(383 - 293)] - 81,93[1 + 22 \cdot 10^{-6}(593 - 293)] = 0,118 \text{ мм};$$

$$\Delta_{ю} = D[1 + \alpha_y(T_{ю} - T_0)] - D_{ю}[1 + \alpha_n(T_{ю} - T_0)] = , \quad (4.28)$$

$$= 82,5[1 + 11 \cdot 10^{-6}(383 - 293)] - 82,335 [1 + 22 \cdot 10^{-6}(413 - 293)] = 0,056 \text{ мм},$$

где $T_y=383 \text{ К}$, $T_n=593 \text{ К}$, $T_{ю}=413 \text{ К}$, $T_0=293 \text{ К}$ температуры стенок цилиндра, головки и юбки поршня в рабочем состоянии и начальная температура приняты с учетом водяного охлаждения двигателя.

5.1.2 Расчет поршневого кольца

Среднее давление кольца на стенку цилиндра

$$P_{cp} = 0,152 E \frac{A_0 / t}{(D/t - 1)^3 (D/t)} = 0,152 \cdot 1 \cdot 10^5 \cdot \frac{11,7 / 3,9}{(82,5 / 3,9 - 1)^3 (82,5 / 3,9)} = 0,265 \text{ МПа}, \quad (5.6)$$

где $A_0=3t=3 \cdot 3,9=11,7 \text{ мм}$.

Давление (МПа) кольца на стенку цилиндра в различных точках окружности

$$p = p_{cp} \mu_k, \quad (5.7)$$

Значения μ_k для различных углов ψ , а также результаты расчета p приведены ниже.

Таблица 5.1 - Давление кольца на стенку цилиндра в различных точках окружности:

$\psi, \text{ град.}$	0	30	60	90	120	150	180
μ_k	1,05	1,05	1,14	0,90	0,45	0,67	2,85
$p, \text{ МПа}$	0,277	0,277	0,3	0,237	0,118	0,176	0,75

Напряжение изгиба кольца в рабочем состоянии

$$\sigma_{из1}=2,61p_{cp}(D/t-1)^2=2,61\cdot0,265(82,5/3,9-1)^2=279 \text{ МПа.}, \quad (5.8)$$

$$\sigma_{из2}=\frac{4E(1-0,114A_0/t)}{m(D/t-1,4)(D/t)}=\frac{4\cdot1\cdot10^5(1-0,114\cdot11,7/3,9)}{1,57(82,5/3,9-1,4)(82,5/3,9)}=401 \text{ МПа.}, \quad (5.9)$$

Напряжение изгиба при давлении кольца на поршень

Монтажный зазор в рамке поршневого кольца

$$\Delta_k=\Delta'_k+\pi D[\alpha_k(T_k-T_0)-\alpha_y(T_y-T_0)]=0,08+3,14\cdot82,5[11\cdot10^{-6}(493-293)-11\cdot10^{-6}(383-293)]=0,414 \text{ мм.}, \quad (5.10)$$

где Δ'_k – минимально допустимый зазор замке кольца во время работы двигателя (при расчете принимается $\Delta'_k=0,08$ мм), $T_k=493$ К, $T_y=383$ К, $T_0=293$ К.

5.1.3 Расчет поршневого пальца

Расчетная сила, действующая на поршневой палец:

- газовая

$$P_{z\max}=p_{z\max}F_n=9,1489\cdot53,45\cdot10^4=0,0409 \text{ МН.}, \quad (5.11)$$

- инерционная

$$P_j=-m_n\omega_m^2R(1+\lambda)\cdot10^{-6}=, \quad (5.12)$$
$$=-0,316\cdot691^2\cdot0,0374(1+0,289)\cdot10^{-6}=-0,00703 \text{ МН.}$$

где $\omega_m=\pi n_m/30=3,14\cdot6600/30=691$ рад/с;

- расчетная

$$P = P_{z \max} + kP_j = 0,0409 - 0,82 \cdot 0,00703 = 0,0352 \text{ МН.}, \quad (5.13)$$

где $k=0,82$ – коэффициент, учитывающий массу поршневого пальца.

Удельное давление пальца на втулку поршневой головки шатуна

$$q_{uu} = P/d_n l_{uu} = 0,0352/0,022 \cdot 0,028 = 68,1 \text{ МПа.}, \quad (5.14)$$

Удельное давление пальца на бобышки

$$q_{\phi} = P/d_n(l_n - b) = 0,0352/0,022(0,028 - 0,032) = 53,3 \text{ МПа.}, \quad (5.15)$$

Напряжение изгиба в среднем сечении пальца

$$\sigma_{из} = \frac{P(l_n + 2b - 1,5l_{uu})}{1,2(1 - \alpha^4)d_n^3} = \frac{0,0352(0,068 + 2 \cdot 0,032 - 1,5 \cdot 0,028)}{1,2(1 - 0,682^4)0,022^3} = 262,5 \text{ МПа.}, \quad (5.16)$$

где $\alpha = d_{\phi}/d_n = 15/22 = 0,682$.

Касательная напряжения среза в сечениях между бобышками и головкой шатуна

$$\tau = \frac{0,85P(1 + \alpha + \alpha^2)}{(1 - \alpha^4)d_n^2} = \frac{0,85 \cdot 0,0352(1 + 0,682 + 0,682^2)}{(1 - 0,682^2) \cdot 0,022^2} = 132 \text{ МПа.}, \quad (5.17)$$

Наибольшее увеличение горизонтального диаметра пальца при овализации:

$$\Delta d_{n \max} = \frac{1,35P}{El_n} \left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^3 [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \frac{1,35 \cdot 0,0352}{2 \cdot 10^5 \cdot 0,068} \left(\frac{1 + 0,682}{1 - 0,682} \right)^3 [0,1 - (0,682 - 0,4)^3] \cdot 10^3 = 0,0159 \text{ мм} \quad (5.18)$$

Напряжение овализации на внешней поверхности пальца:

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

$$\begin{aligned}\sigma_{\alpha 0} &= \frac{15P}{l_n d_n} \left[0,19 \frac{(2+\alpha)(1+\alpha)}{(1-\alpha)^2} - \frac{1}{1-\alpha} \right] [0,1-(\alpha-0,4)^3] = \\ &= \frac{15 \cdot 0,0352}{0,068 \cdot 0,022} \left[0,19 \frac{(2+0,682)(1+0,682)}{(1-0,682)^2} - \frac{1}{1-0,682} \right] [0,1-(0,682-0,4)^3] = 73 \text{ МПа}\end{aligned}\quad (5.19)$$

- в вертикальной плоскости (точки 3, $\psi=90^0$)

$$\begin{aligned}\sigma_{\alpha 90} &= -\frac{15P}{l_n d_n} \left[0,174 \frac{(2+\alpha)(1+\alpha)}{(1-\alpha)^2} + \frac{0,636}{1-\alpha} \right] [0,1-(\alpha-0,4)^3] = \\ &= -\frac{15 \cdot 0,0352}{0,068 \cdot 0,022} \left[0,174 \frac{(2+0,682)(1+0,682)}{(1-0,682)^2} + \frac{0,636}{1-0,682} \right] [0,1-(0,682-0,4)^3] = -92,6 \text{ МПа}\end{aligned}$$

Напряжение овализации на внутренней поверхности пальца:

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

$$\begin{aligned}\sigma_{\alpha 0} &= -\frac{15P}{l_n d_n} \left[0,19 \frac{(1+2\alpha)(1+\alpha)}{(1-\alpha)^2 \alpha} + \frac{1}{1-\alpha} \right] [0,1-(\alpha-0,4)^3] = \\ &= -\frac{15 \cdot 0,0352}{0,068 \cdot 0,022} \left[0,19 \frac{(1+2 \cdot 0,682)(1+0,682)}{(1-0,682)^2 \cdot 0,682} + \frac{1}{1-0,682} \right] [0,1-(0,682-0,4)^3] = -147 \text{ МПа}\end{aligned}$$

- в вертикальной плоскости (точки 4, $\psi=90^0$)

$$\begin{aligned}\sigma_{\alpha 90} &= \frac{15P}{l_n d_n} \left[0,174 \frac{(1+2\alpha)(1+\alpha)}{(1-\alpha)^2 \alpha} - \frac{0,636}{1-\alpha} \right] [0,1-(\alpha-0,4)^3] = \\ &= \frac{15 \cdot 0,0352}{0,068 \cdot 0,022} \left[0,174 \frac{(1+2 \cdot 0,682)(1+0,682)}{(1-0,682)^2 \cdot 0,682} - \frac{0,636}{1-0,682} \right] [0,1-(0,682-0,4)^3] = 159 \text{ МПа}\end{aligned}$$

5.2 Расчет шатуна

5.2.1 Расчет стержня шатуна

Сила, сжимающая шатун, достигает максимального значения в начале рабочего хода при рзд. .[5]

$$P_{сж} = [F_n(p_{z0} - p_0) - m_j R \omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi)] \cdot 10^{-6} = 0,029719 \text{ МН} \quad (5.20)$$

Сила , растягивающая шатун, достигает максимального значения в начале впуска (в в.м.т.).

$$P_{сж} = [F_n p_r - m_j R \omega^2 (1 + \lambda)] \cdot 10^{-6} = -0,010971 \text{ МН} \quad (5.21)$$

Площадь и моменты инерции

$$\begin{aligned} F_{ср} &= h_{ш} b_{ш} - (b_{ш} - a_{ш})(h_{ш} - 2t_{ш}) = \\ &= 15.14 - (14 - 7)(15 - 2.4,4) = 166,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \end{aligned} \quad (5.22)$$

$$\begin{aligned} J_x &= [b_{ш} h_{ш}^3 - (b_{ш} - a_{ш})(h_{ш} - 2t_{ш})^3] / 12 = \\ &= [153.14 - (14 - 7)(15 - 2.4,4)^3] / 12 = 3798,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \end{aligned} \quad (5.23)$$

$$\begin{aligned} J_y &= [b_{ш}^3 h_{ш} - (b_{ш} - a_{ш})^3 (h_{ш} - 2t_{ш})] / 12 = \\ &= [15.143 - (14 - 7)^3 (15 - 2.4,4)] / 12 = 3252,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \end{aligned} \quad (5.24)$$

Максимальное напряжение от сжимающей силы:

- в плоскости качания шатуна

$$\sigma_{\max.x} = K_x \cdot P_{сж} / F_{ср} \cdot 10^{-6} = 1,268 \cdot 0,029719 / 166,6 \cdot 10^{-6} = 226,32 \text{ МПа} \quad (5.25)$$

где $K_x = 1,268$

в плоскости, перпендикулярной плоскости качания шатуна:

$$\sigma_{\max.y} = K_y \cdot P_{сж} / F_{ср} \cdot 10^{-6} = 1,095 \cdot 0,029719 / 166,6 \cdot 10^{-6} = 195,34 \text{ МПа} \quad (5.26)$$

где $K_y=1,095$

Минимальное напряжение от растягивающей силы

$$\sigma_{\min}=P_p/F_{\text{ср}}=0,029719/166,6 \cdot 10^{-6} = -65,852 \text{ МПа.} \quad (5.27)$$

Среднее напряжение и амплитуды цикла:

$$\sigma_{m.x} := \frac{\sigma_{\max x} + \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_{m.x} = 80.2371 \text{ МПа} \quad (5.28)$$

$$\sigma_{m.y} := \frac{\sigma_{\max y} + \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_{m.y} = 64.7456 \text{ МПа} \quad (5.29)$$

$$\sigma_{a.x} := \frac{\sigma_{\max x} - \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_{a.x} = 146.0893 \text{ МПа} \quad (5.30)$$

$$\sigma_{a.y} := \frac{\sigma_{\max y} - \sigma_{\min}}{2} \quad \sigma_{a.y} = 130.5978 \text{ МПа} \quad (5.31)$$

$$\sigma_{a.k.x} := \frac{\sigma_{a.x} \cdot k_{\sigma}}{\varepsilon_M \cdot \varepsilon_P} \quad \sigma_{a.k.x} = 277.8492 \text{ МПа} \quad (5.32)$$

$$\sigma_{a.k.y} := \frac{\sigma_{a.y} \cdot k_{\sigma}}{\varepsilon_M \cdot \varepsilon_P} \quad \sigma_{a.k.y} = 248.3857 \text{ МПа} \quad (5.33)$$

где $k_{\sigma}=1,272$; $\varepsilon_M=0,88$ – определяется по табл. 48 [1]; $\varepsilon_P=1,3$ – определяется по табл. 49 [1].

Запас прочности.

$$\begin{aligned} n_{T.\sigma.x} &:= \frac{\sigma_T}{\sigma_{a.k.x} + \sigma_{m.x}} & n_{T.\sigma.x} &= 1.1729 \\ n_{T.\sigma.y} &:= \frac{\sigma_T}{\sigma_{a.k.y} + \sigma_{m.y}} & n_{T.\sigma.y} &= 1.34129 \end{aligned} \quad (5.34)$$

6 Расчет систем двигателя

6.1 Расчет элементов системы смазки

6.1.1 Расчет масляного насоса

Количество тепла, отводимого маслом от двигателя.[1]:

$$Q_m = 0,021 \cdot Q_0 = 0,021 \cdot 215,88 = 4,53 \text{ кДж/с.} \quad (6.1)$$

Теплоемкость масла $c_m = 2,094 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$.

Плотность масла $\rho_m = 900 \text{ кг/м}^3$.

Температура нагрева масла в двигателе $\Delta T_m = 10 \text{ K}$.

Циркуляционный расход масла

$$V_u = Q_m / (\rho_m \cdot c_m \cdot \Delta T_m) = 4,53 / (900 \cdot 2,094 \cdot 10) = 0,000238 \text{ м}^3 / \text{с.} \quad (6.2)$$

Циркуляционный расход с учетом стабилизации давления масла в системе

$$V' = 2V_u = 2 \cdot 0,000238 = 0,000478 \text{ м}^3 / \text{с.} \quad (6.3)$$

Объемный коэффициент подачи $\eta_n = 0,7$.

Расчетная производительность насоса

$$V_p = V' / \eta_n = 0,000478 / 0,7 = 0,000682 \text{ м}^3 / \text{с.} \quad (6.4)$$

Модуль зацепления зуба $m = 4,5 \text{ мм}$.

Высота зуба $h = 2m = 2 \cdot 4,5 = 9 \text{ мм}$.

Число зубьев шестерен $z = 7$.

Диаметр начальной окружности шестерни

$$D_0 = zm = 7 \cdot 4,5 = 31,5 \text{ мм} = 0,0315 \text{ м.} \quad (6.5)$$

Диаметр внешней окружности шестерни

$$D = m(z+2) = 4,5(7+2) = 40,5 \text{ мм} = 0,0405 \text{ м.} \quad (6.6)$$

Окружная частота на внешнем диаметре шестерни $u_n = 6,36 \text{ м/с}$.

Частота вращения шестерни (насоса)

$$n_n = u_n 60 / (\pi D) = 6,36 \cdot 60 / (3,14 \cdot 0,0405) = 3000 \text{ об/мин.} \quad (6.7)$$

$$b = \frac{60 \cdot V_p}{2\pi m^2 z n_n} = \frac{60 \cdot 0,000682}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,5^2 \cdot 7 \cdot 3000} = 0,015 \text{ м.} \quad (6.8)$$

Длина зуба шестерни

Рабочее давление масла в системе $p = 40 \cdot 10^4 \text{ Па}$.

Механический к.п.д. масляного насоса $\eta_{м.н} = 0,87$.

Мощность, затрачиваемая на привод масляного насоса:

$$N_n = V_p \cdot p / (\eta_{м.н} \cdot 10^3) = 0,000682 \cdot 40 \cdot 10^4 / (0,87 \cdot 10^3) = 0,31 \text{ кВт.} \quad (6.9)$$

6.1.2 Расчет масляного радиатора

Количество тепла, отводимого маслом от двигателя $Q_m = 4530 \text{ кДж/с}$.

Коэффициент теплоотдачи от масла к стенке радиатора $\alpha_1 = 250 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

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

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

Коэффициент теплоотдачи от стенки радиатора к воде $\alpha_2 = 3200 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Коэффициент теплопередачи от масла к воде

$$K_m = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda_{\text{теп}} + 1/\alpha_2} = \frac{1}{1/250 + 0,0002/100 + 1/3200} = 232 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (6.10)$$

Средняя температура масла в радиаторе $T_{м.ср}=358$ К.

Средняя температура воды в радиаторе $T_{вод.ср}=348$ К.

Поверхность охлаждения масляного радиатора, омываемая водой:

$$F_m = \frac{Q_m}{K_m (T_{м.ср} - T_{вод.ср})} = \frac{4530}{232(358 - 348)} = 2,01 \text{ м}^2. \quad (6.11)$$

6.2 Расчет элементов системы охлаждения

6.2.1 Расчет водяного насоса

Циркуляционный расход воды в системе охлаждения.[1]

$$G_{жс} = Q_6 / (c_{жс} \rho_{жс} \Delta T_{жс}) = 69730 / (4187 \cdot 1000 \cdot 9,6) = 0,00173 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6.12)$$

где $\Delta T_{жс}=9,6$ К – температурный перепад воды при принудительной циркуляции.

Расчетная производительность насоса

$$G_{жс.р} = G_{жс} / \eta = 0,00173 / 0,82 = 0,00212 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6.13)$$

где $\eta=0,82$ – коэффициент подачи насоса.

Радиус входного отверстия крыльчатки

$$r_1 = \sqrt{G_{жс.р} / (\pi c_1) + r_0^2} = \sqrt{0,00212 / (3,14 \cdot 1,8) + 0,01} = 0,0193 \text{ м}, \quad (6.14)$$

где $c_1=1,8$ – скорость воды на входе в насос, м/с; $r_0=0,01$ – радиус ступицы крыльчатки, м.

Окружная скорость потока воды на выходе из колеса

$$\begin{aligned} u_2 &= \sqrt{1 + \operatorname{tg} \alpha_2 \operatorname{ctg} \beta_2} \sqrt{p_{жс} / (\rho_{жс} \eta_h)} = \\ &= \sqrt{1 + \operatorname{tg} 10^\circ \operatorname{ctg} 45^\circ} \sqrt{120000 / (1000 \cdot 0,65)} = 14,7 \text{ м/с}, \end{aligned} \quad (6.15)$$

где угол $\alpha_1=10^0$, а угол $\beta_2=45^0$; $\eta_h=0,65$ – гидравлический к.п.д. насоса.

Радиус крыльчатки колеса на выходе

$$r_2 = 30u_2 / (\pi n_{в.н}) = 30 \cdot 14,7 / (3,14 \cdot 4600) = 0,0305 \text{ м.} \quad (6.16)$$

Окружная скорость входа потока

$$u_1 = u_2 r_1 / r_2 = 14,7 \cdot 0,0193 / 0,0305 = 9,32 \text{ м/с.} \quad (6.17)$$

Угол между скоростями c_1 и u_1 принимается $\alpha_1=90^0$, при этом $\operatorname{tg} \beta_1 = c_1 / u_1 = 1,8 / 9,32 = 0,1956$, откуда $\beta_1 = 10^0 15'$.

Ширина лопатки на входе

$$b_1 = \frac{G_{ж.р}}{(2\pi r_1 - z\delta_1 / \sin \beta_1) \cdot 1,8} = \frac{0,00212}{(2 \cdot 3,14 \cdot 0,0193 - 4 \cdot 0,003 / \sin 10^0 15') \cdot 1,8} = 0,0596 \text{ м,} \quad (6.18)$$

где $z=4$ – число лопаток на крыльчатке насоса; $\delta_1=0,003$ – толщина лопаток у входа, м.

Радиальная скорость потока на входе из колеса

$$c_r = \frac{p_{ж} \operatorname{tg} \alpha_2}{\rho_{ж} \eta_h u_2} = \frac{120000 \cdot \operatorname{tg} 10^0}{1000 \cdot 0,65 \cdot 14,7} = 2,2 \text{ м/с.} \quad (6.19)$$

Ширина лопатки на выходе

$$b_2 = \frac{G_{ж.р}}{(2\pi r_2 - z\delta_2 / \sin \beta_2) c_r} = \frac{0,00212}{(2 \cdot 3,14 \cdot 0,0305 - 4 \cdot 0,003 / \sin 45^0) \cdot 2,2} = 0,0037 \text{ м} \quad (6.20)$$

где $\delta_2=0,003$ – толщина лопаток на выходе, м.

Мощность, потребляемая водяным насосом:

$$N_{в.н} = G_{ж.р} p_{ж} / (1000 \eta_m) = 0,00212 \cdot 120000 / (1000 \cdot 0,82) = 0,34 \text{ кВт,} \quad (6.21)$$

где $\eta_m=0,82$ – механический к.п.д. водяного насоса.

6.2.2 Расчет поверхности охлаждения водяного радиатора

Количество воздуха, проходящего через радиатор:

$$G'_{возд} = Q_{возд} / (c_{возд} \Delta T_{возд}) = 69730 / (1000 \cdot 24) = 2,9 \text{ кг/с}, \quad (6.22)$$

где $\Delta T_{возд}=24$ – температурный перепад воздуха в решетке радиатора, К.

Массовый расход воды, проходящей через радиатор:

$$G'_{жс} = G_{жс} \rho_{жс} = 0,00173 \cdot 1000 = 1,73 \text{ кг/с}. \quad (6.23)$$

Средняя температура охлаждающего воздуха, проходящего через радиатор:

$$T_{ср.возд} = \frac{T_{возд.вх} + (T_{возд.вх} + \Delta T_{возд})}{2} = \frac{313 + (313 + 24)}{2} = 325 \text{ К}. \quad (6.24)$$

где $T_{возд.вх}=313$ – расчетная температура воздуха перед радиатором, К.

Средняя температура воды в радиаторе

$$T_{ср.вод} = \frac{T_{вод.вх} + (T_{вод.вх} - \Delta T_{в})}{2} = 358,2 \text{ К}, \quad (6.25)$$

где $T_{вод.вх}=363$ – температура воды перед радиатором, К; $\Delta T_{в}=9,6$ – температурный перепад воды в радиаторе, К.

Поверхность охлаждения радиатора

$$F = \frac{Q_{\text{вод}}}{K(T_{\text{ср.вод}} - T_{\text{ср.возд}})} = \frac{69730}{160(358,2 - 325)} = 11,51 \text{ м}^2, \quad (6.26)$$

где $K=160$ – коэффициент теплопередачи для радиаторов легковых автомобилей, Вт/(м²·К).

6.2.3 Расчет вентилятора

Плотность воздуха при средней его температуре в радиаторе

$$\rho_{\text{возд}} = p_0 \cdot 10^6 / (R_g T_{\text{ср.возд}}) = 0,1 \cdot 10^6 / (287 \cdot 325) = 1,07 \text{ кг/м}^3. \quad (6.27)$$

Производительность вентилятора

$$G_{\text{возд}} = G'_{\text{возд}} / \rho_{\text{возд}} = 2,9 / 1,07 = 2,71 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6.28)$$

Фронтальная поверхность радиатора

$$F_{\text{фр.рад}} = G_{\text{возд}} / \omega_{\text{возд}} = 2,71 / 20 = 0,135 \text{ м}^2, \quad (6.29)$$

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

Диаметр вентилятора

$$D_{\text{вент}} = 2\sqrt{F_{\text{фр.рад}} / \pi} = 2\sqrt{0,135 / 3,14} = 0,415 \text{ м}. \quad (6.30)$$

Окружная скорость вентилятора

$$u = \psi_{\text{л}} \sqrt{\Delta p_{\text{тр}} / \rho_{\text{возд}}} = 3,41 \sqrt{800 / 1,07} = 93,4 \text{ м/с}, \quad (6.31)$$

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

Частота вращения вентилятора

$$n_{\text{вент}}=60u/(\pi D_{\text{вент}})=60\cdot 93,4/(3,14\cdot 0,415)=4600 \text{ об/мин.} \quad (6.32)$$

Таким образом, выполнено условие $n_{\text{вент}}=n_{\text{в.н}}=4600$ об/мин (вентилятор и водяной насос имеют общий привод).

Мощность, затрачиваемая на привод осевого вентилятора,

$$N_{\text{вент}}=G_{\text{возд}} \Delta p_{\text{тр}}/(1000\eta_{\text{в}})=2,71\cdot 800/(1000\cdot 0,38)=5,7 \text{ кВт,} \quad (6.33)$$

где $\eta_{\text{в}}=0,38$ – к.п.д. клепанного вентилятора.

7 Задание на специальную разработку

7.1 Описание спроектированного двигателя на базе ВАЗ – 2112 с модернизированным КШМ

Четырехцилиндровый, рядный, четырехтактный, бензиновый двигатель с распределенным впрыском топлива, жидкостного охлаждения, с четырьмя клапанами на цилиндр. Расчетная эффективная мощность $N_e=84,2$ кВт при частоте вращения коленчатого вала $n=7200$ об/мин (см. п.1.1.10). Двигатель четырехцилиндровый ($i=4$) с рядным расположением цилиндров, рабочим объемом $V_l=1,5$ л, диаметр цилиндра $D=92$ мм, ход поршня $S=56$ мм. Степень сжатия $\varepsilon=10,5$. Коленчатый вал – пятиопорный, чугунный, литой. Головка блока – из алюминиевого сплава. Привод распределительного вала – поликлиновой ремень. Расположение клапанов – верхнее, рядное, наклонное. Привод клапанов – через гидрокомпенсаторы от двух распределительных валов (для впускных и выпускных клапанов).

В ходе модернизации были внесены в конструкцию следующие изменения. Во-первых, был уменьшен радиус кривошипа, таким образом, чтобы средняя скорость поршня на номинальных оборотах спроектированного двигателя с радиусом КШМ 28 мм равна средней скорости поршня базового двигателя с радиусом КШМ 35,5 мм и составляет 13,44 м/с. Таким образом, механические потери в цилиндропоршневой группе при увеличении частоты вращения КВ не увеличатся.

Во-вторых, уменьшена длина до 97 мм и габариты шатуна, а также уменьшена длина юбки поршня. Эти мероприятия приводят к уменьшению инерционных сил, а также нагрузки на подшипники коленчатого вала.

7.2 Сравнительный анализ двигателя ВАЗ 2112 с модернизированным двигателем

Двигатель с модернизированным КШМ имеет скорость поршня при частоте вращения 7200 мин^{-1} такую же, как и базовый двигатель при частоте вращения 5600 мин^{-1} , что показано на рисунке 7.1. Таким образом, механические потери на трение в цилиндропоршневой группе останутся на прежнем уровне.

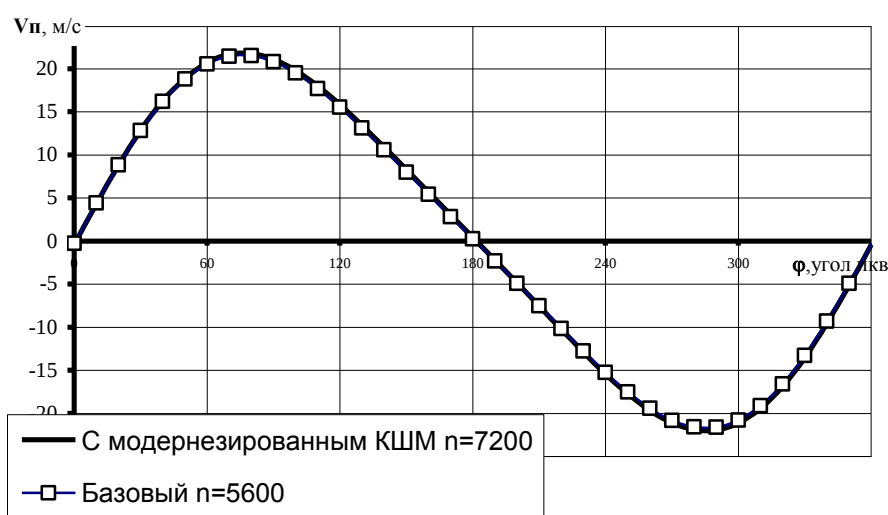


Рисунок 7.1 - Диаграмма скорости поршня в V_p - ϕ координатах.

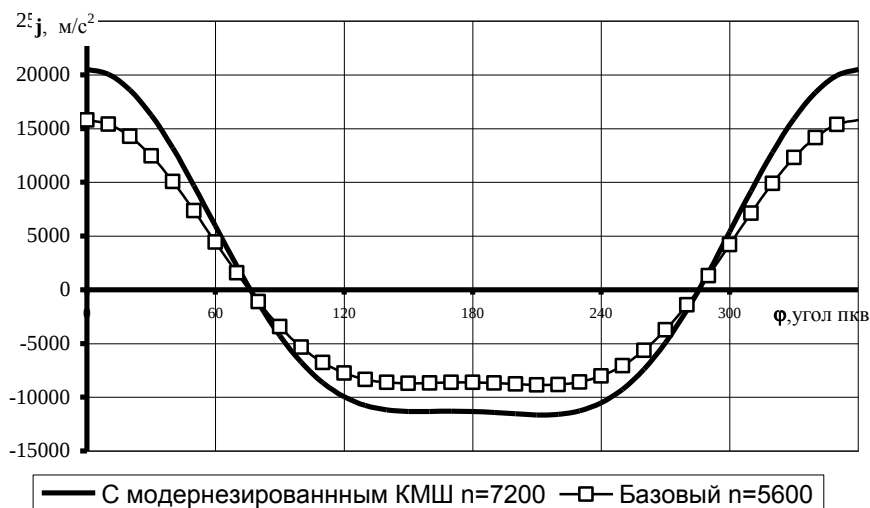


Рисунок 7.2 - Диаграмма ускорения поршня в j_p - ϕ координатах.

При этом увеличение частоты вращения до 7200 мин^{-1} увеличивает ускорение поршня (рисунок 7.2) на 5000 м/с^2 , тем самым увеличивая действие инерционных сил на коренные и шатунные подшипники коленчатого вала. Но,

увеличивая длину двигателя, у нас увеличивается длина коленчатого вала, причем в основном за счет увеличения длины коренных и шатунных шеек, тем самым, уменьшая нагрузки на подшипники коленчатого вала. Рассматривая диаграмму изменения суммарных сил (рисунок 7,3), видно, что у базового двигателя пиковые нагрузки выше, а в среднем ниже, это связано с более высоким максимальным давлением в процессе сгорания по сравнению с модернизированным ДВС, у которого более высокие инерциальные нагрузки.

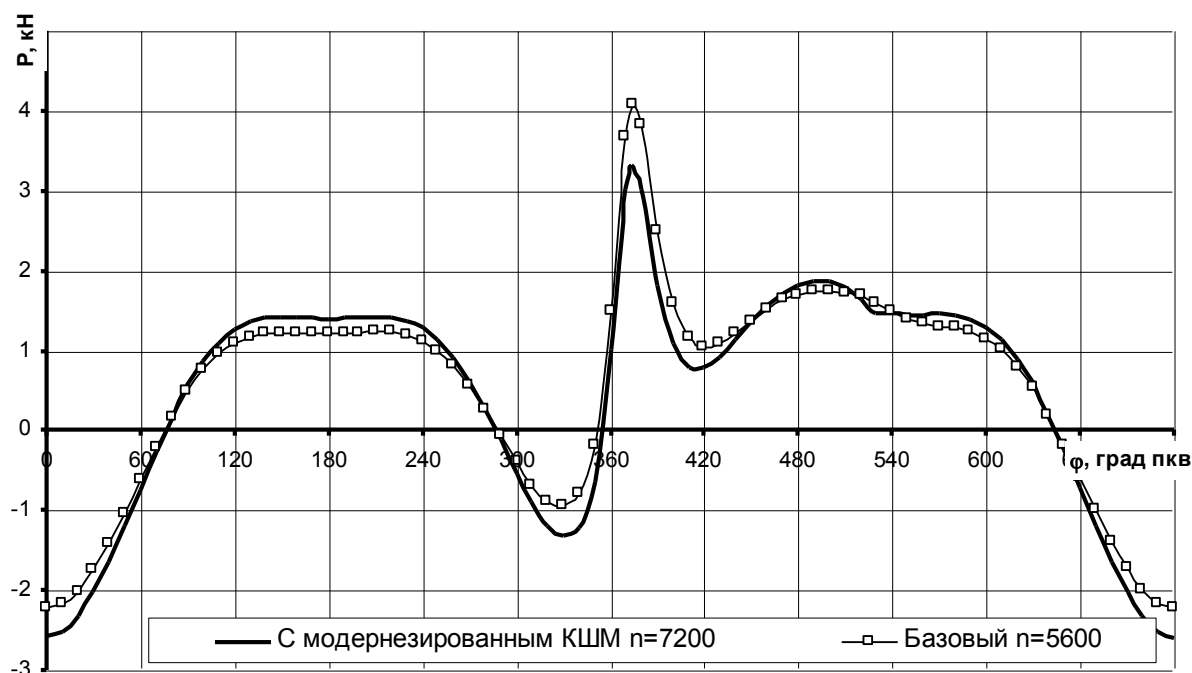


Рисунок 7.3 - Диаграмма изменения суммарных сил в $P-\varphi$ координатах.

Рассматривая причины уменьшения максимального давления в процессе сгорания по сравнению с базовым двигателем, следует отметить, большую протяженность камеры сгорания в проектируемом двигателе, а также снижение коэффициента наполнения из-за повышения потерь при впуске связанных с увеличением скорости во впускном трубопроводе.

Для сравнительного анализа основные показатели базового и проектируемого двигателя сведены в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 - Сравнение расчетных эффективных и экономических показателей базового и модернизированного двигателей

п	g _е баз	g _е нов	Me баз	Me нов	Gt баз	Gt нов	Ne баз	Ne нов
Об/мин	г/кВт*ч	г/кВт*ч	Н*м	Н*м	кг/ч	кг/ч	КВт	КВт
900	271,2995	266,33	109,6317	106,328	3,673048	3,436	11,5025	10,63
2000	240,2463	235,348	131,5549	127,25	12,36788	12,148	51,48	48,76
3400	254,6321	230,16	124,9823	120,32	17,0123	16,983	62,33	59,42
5000	262,2322	240,12	115,1884	113,08	18,2401	18,106	68,55	66,23
5600	271,3461	258,54	101,2225	100,41	18,95112	18,845	74,6	69,54
7200		274,54		97,41		20,245		84,54
8000		283,54		94,41		22,357		81,54

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе спроектирован бензиновый двигатель с модернизированным КШМ, работающим на номинальном скоростном режиме 7200 мин^{-1} . В процессе модернизации внесены следующие изменения в конструкцию: уменьшен ход поршня с 71 до 56 мм, увеличен диаметр цилиндров с 82 до 92 мм, увеличилась общая длина двигателя с 510 до 545 мм, снизилась высота с 653 до 620 мм. Для снижения динамических и инерционных нагрузок проведено снижение массы поршня за счет уменьшения длины юбки и массы бобышек, также снижена масса шатуна на 10% за счет уменьшения его длины с 121 до 97 мм. Проведены основные расчеты двигателя, а именно, тепловой, кинематический, динамический, основных деталей и систем двигателя.

Получено в двигателе с модернизированным КШМ:

- минимальный удельный эффективный расход топлива 254 г/кВт*ч ;
- максимальную мощность при номинальных оборотах $n=7200 \text{ мин}^{-1}$ 84 кВт, по сравнению с базовым увеличение составило 13%;
- снижение токсичности в отработавших газах по оксидам азота (NO) и оксидам углерода (CO), при увеличении токсичности по несгоревшим углеводородам (CH), поэтому для выполнения двигателем норм по токсичности необходимо установка каталитического нейтрализатора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей [Текст]/ Колчин, А.И. Демидов В.П. // Учебное пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Высшая школа 1980. - с.496.
2. 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.
3. Ховаха, М.С. Автомобильные двигатели – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] /Под редакцией М.С. Ховаха// М.: Машиностроение, 1977. - с.636.
4. Ложкин М. Н. Расчёт и анализ параметров рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания : учеб. пособие / М. Н. Ложкин, А. М. Дзюбан; ТГУ ; Автомех. ин-т ; каф. "Тепловые двигатели". - ТГУ. - Тольятти : ТГУ, 2010. - 107 с. : ил. - Библиогр.: с. 88. - Прил.: с. 89-106. - 14-72
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. Вырубов, С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко и др.; Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова. –4-е издание, перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1984. – с.384
6. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя [Текст] / В.И. Анурьев// В 3-х т. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. - с.296.
7. Вибе, И.И. Уточненный тепловой расчет двигателя [Текст] / И.И. Вибе// М. Машиностроение, 1971. - с.282
8. Кузнецов Ю.М. «Охрана труда на предприятиях автомобильного транспорта». М.: Транспорт, 1986.
9. Луканин В.Н. «Промышленная транспортная экология». М.: Высшая школа, 2001.

10. Долин П.А. «Справочник по технике безопасности». М.: Энергоатомиздат, 1985.
11. Чумаков Л.Л. Курс лекций по дисциплине «Экономика предприятия», 2004
12. Кальней Е.Д. Методические указания по выполнению курсовых и дипломных проектов по дисциплине «Основы технического творчества и патентоведения»
13. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982.
14. Кузнецов В.Р., Собольников В.А. «Турбулентность и горение». М. Наука, 1986.
15. Войнов В.В. «Процессы сгорания в двигателях внутреннего сгорания». М. Наука, 1984.
16. Звонов В.А. «Токсичность двигателей внутреннего сгорания». М. Машиностроение, 1981.
17. Nlootat G., et al, “A Model for Converting SI Engine Flame Arrival Signals into Flame Contours”, SAE, SP 1099, №950109, стр. 99-110, 1999.
18. 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.
19. 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.
20. Наканиши К., и др, “Разработка новой системы впуска для четырёхклапанного двигателя, работающего на бедных смесях”, SAE, SP 1097, №95050, стр. 25-43, 1997.
21. Хашимото Н., и др, “Разработка низкотоксичной, высокоэффективной камеры сгорания для высокомоощного четырехклапанного двигателя”, SAE, SP 1098, №95068, стр. 347-365, 1998.
22. Аносов Ю.М. «Основы отраслевых технологий и организации производства». С-П., Политехника, 2002.

23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. Машиностроение. Энциклопедия : в 40 т. / гл. ред. К.В. Фролов (пред.) и др.— М.: Машиностроение, 2013.- Т. IV-14: Двигатели внутреннего сгорания.- 784с.
27. Семенов, Е.С. Исследование турбулентности в цилиндре поршневого двигателя / Е.С. Семенов, А.С. Соколик // Известия АН СССР. – 1958. - № 8. - С. 130-140.
28. Смоленская, Н.М. Исследование эффективности рабочего процесса бензиновых двигателей с использованием электропроводности пламени / Н.М. Смоленская, В.В. Смоленский, П.В. Ивашин, А.П. Шайкин // ВНТК "Проведение научных исследований в области машиностроения". 27-28 ноября 2009. Тольятти: Изд-во ТГУ. - 2009. С.244-250.
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 $n = 900 \text{ мин}^{-1}$

					ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ												
θ	ϕ	α	ε	μ	P_y	T_y	V_a	ζ	E_2	γ	λ	μ					
15	42	0,96	10,5	1,063097	1,737669	767,4028	1,05061	0,764277	41,94646	0,041708	0,28866	3					
Расчёт процесса сгорания																	
ϕ	ϕ_1	$V_{ст}$	σ	$\psi(\phi_1)$	X_{1-2}	$T_{пред}$	T_1	T_2	$T_{2истина}$	T_{1-2}	k_{1-2}	K_{1-2}	ΔX_{1-2}	P	μ	μ_{1-2}	X
0	-15	0,120855	0,04376	1,20784	1,11E-06	767,4028	767,4028	774,166	767,4028	770,7842			2,22E-06	1,737669	1	1	0
1	-14	0,118196	0,03816	1,18127	1,66E-05	774,1656	774,1656	780,565	773,6403	777,3653	1,358508	6,57867	3,33E-05	1,7912	1	1	2,22E-06
2	-13	0,115715	0,03294	1,15647	7,21E-05	780,565	780,565	787,356	779,9302	783,9606	1,357664	6,591844	0,000144	1,844485	1	1,000001	3,55E-05
3	-12	0,113412	0,0281	1,13346	0,000194	787,3562	787,3562	795,021	786,6063	791,1884	1,356829	6,604927	0,000388	1,898048	1	1,000007	0,00018
4	-11	0,11129	0,02363	1,11225	0,000409	795,0206	795,0206	804,178	794,142	799,5995	1,355927	6,619136	0,000818	1,952806	1	1,000023	0,000568
5	-10	0,109349	0,01955	1,09285	0,000743	804,1784	804,1784	815,576	803,1462	809,8774	1,354894	6,635491	0,001486	2,010082	1,0001	1,000059	0,001387
6	-9	0,107589	0,01585	1,07527	0,001222	815,5763	815,5763	830,072	814,3544	822,8239	1,353657	6,65519	0,002443	2,071606	1,0002	1,000129	0,002873
7	-8	0,106013	0,01253	1,05951	0,001868	830,0715	830,0715	848,608	828,6136	839,3398	1,352142	6,679531	0,003736	2,139478	1,0003	1,000248	0,005316
8	-7	0,10462	0,0096	1,04559	0,002704	848,6081	848,6081	870,58	846,8593	859,5941	1,350274	6,70981	0,005408	2,216113	1,0005	1,000435	0,009052
9	-6	0,103412	0,00706	1,03351	0,003748	870,5802	870,5802	899,794	870,09	885,1873	1,34808	6,745809	0,007496	2,30415	1,0009	1,000712	0,01446
10	-5	0,102388	0,0049	1,02328	0,005013	899,7944	899,7944	935,972	899,3184	917,8834	1,34545	6,789555	0,010025	2,406299	1,0013	1,001103	0,021956
11	-4	0,10155	0,00314	1,01491	0,006505	935,9724	935,9724	980,003	935,518	957,9878	1,342304	6,842765	0,01301	2,525156	1,0019	1,001633	0,031981
12	-3	0,100898	0,00177	1,00839	0,008223	980,0032	980,0032	1032,63	979,5795	1006,317	1,338737	6,904288	0,016447	2,663035	1,0027	1,002331	0,044991
13	-2	0,100432	0,00078	1,00373	0,010156	1032,632	1032,632	1094,4	1032,249	1063,517	1,334814	6,97346	0,020311	2,821756	1,0037	1,003223	0,061437
14	-1	0,100152	0,0002	1,00093	0,012277	1094,402	1094,402	1165,6	1094,072	1130,003	1,33063	7,04906	0,024554	3,002438	1,005	1,004336	0,081748
15	0	0,100058	0	1	0,01455	1165,604	1165,604	1246,23	1165,338	1205,915	1,326295	7,129422	0,029099	3,205322	1,0064	1,005695	0,106303
16	1	0,100152	0,0002	1,00093	0,01692	1246,225	1246,225	1335,91	1246,032	1291,068	1,321927	7,212598	0,033841	3,429615	1,0082	1,00732	0,135402
17	2	0,100432	0,00078	1,00373	0,019321	1335,911	1335,911	1433,94	1335,798	1384,923	1,317634	7,29655	0,038642	3,673385	1,0103	1,009226	0,169243
18	3	0,100898	0,00177	1,00839	0,021669	1433,936	1433,936	1539,19	1433,908	1486,562	1,313513	7,379325	0,043339	3,933501	1,0126	1,011421	0,207884
19	4	0,10155	0,00314	1,01491	0,023873	1539,188	1539,188	1650,18	1539,248	1594,684	1,309636	7,459188	0,047745	4,205645	1,0152	1,013904	0,251223
20	5	0,102388	0,0049	1,02328	0,02583	1650,179	1650,179	1765,07	1650,325	1707,624	1,306058	7,534707	0,05166	4,484395	1,0181	1,016663	0,298968
21	6	0,103412	0,00706	1,03351	0,027441	1765,069	1765,069	1881,73	1765,299	1823,397	1,302811	7,604783	0,054881	4,763395	1,0212	1,019673	0,350628
22	7	0,10462	0,0096	1,04559	0,028609	1881,725	1881,725	1997,81	1882,034	1939,767	1,299911	7,668652	0,057218	5,035612	1,0246	1,0229	0,40551
23	8	0,106013	0,01253	1,05951	0,029254	1997,809	1997,809	2110,88	1998,19	2054,345	1,29736	7,725854	0,058508	5,293673	1,028	1,026295	0,462728

24	9	0,107589	0,01585	1,07527	0,029317	2110,88	2110,88	2218,53	2111,327	2164,705	1,295151	7,77619	0,058635	5,530262	1,0316	1,0298	0,521235
25	10	0,109349	0,01955	1,09285	0,028772	2218,529	2218,529	2318,51	2219,033	2268,521	1,293269	7,81968	0,057543	5,738567	1,0351	1,033347	0,57987
26	11	0,11129	0,02363	1,11225	0,027624	2318,512	2318,512	2408,89	2319,064	2363,699	1,291693	7,856522	0,055248	5,912708	1,0386	1,036866	0,637413
27	12	0,113412	0,0281	1,13346	0,025921	2408,886	2408,886	2488,13	2409,479	2448,506	1,2904	7,887052	0,051841	6,04813	1,042	1,040282	0,692661
28	13	0,115715	0,03294	1,15647	0,023744	2488,126	2488,126	2555,21	2488,752	2521,668	1,289364	7,911715	0,047488	6,141907	1,0451	1,043525	0,744503
29	14	0,118196	0,03816	1,18127	0,021207	2555,21	2555,21	2609,67	2555,861	2582,44	1,288557	7,931031	0,042414	6,192917	1,048	1,046533	0,791991
30	15	0,120855	0,04376	1,20784	0,018445	2609,669	2609,669	2651,59	2610,339	2630,628	1,287953	7,945572	0,03689	6,201861	1,0505	1,049256	0,834405
31	16	0,12369	0,04972	1,23618	0,0156	2651,586	2651,586	2681,55	2652,268	2666,569	1,287524	7,955933	0,031201	6,171133	1,0528	1,051657	0,871294
32	17	0,1267	0,05605	1,26626	0,012813	2681,552	2681,552	2700,58	2682,241	2691,064	1,287244	7,962716	0,025625	6,104547	1,0547	1,05372	0,902495
33	18	0,129884	0,06275	1,29808	0,010203	2700,577	2700,577	2709,98	2701,27	2705,278	1,287088	7,966502	0,020406	6,006955	1,0562	1,055441	0,92812
34	19	0,133239	0,06981	1,33161	0,007865	2709,978	2709,978	2711,25	2710,67	2710,612	1,287033	7,967837	0,015731	5,883812	1,0575	1,056835	0,948526
35	20	0,136765	0,07723	1,36685	0,00586	2711,246	2711,246	2705,92	2711,934	2708,581	1,287059	7,967218	0,01172	5,740735	1,0584	1,057929	0,964257
36	21	0,14046	0,08501	1,40378	0,004213	2705,915	2705,915	2695,45	2706,596	2700,684	1,287147	7,965082	0,008425	5,58312	1,0591	1,05876	0,975978
37	22	0,144321	0,09313	1,44237	0,002917	2695,452	2695,452	2681,17	2696,125	2688,312	1,287282	7,961801	0,005833	5,415844	1,0596	1,059371	0,984403
38	23	0,148347	0,1016	1,4826	0,001941	2681,172	2681,172	2664,18	2681,834	2672,678	1,287452	7,957678	0,003882	5,243068	1,06	1,059802	0,990236
39	24	0,152536	0,11041	1,52447	0,00124	2664,183	2664,183	2645,37	2664,835	2654,778	1,287648	7,952953	0,002479	5,068163	1,0602	1,060097	0,994118
40	25	0,156886	0,11957	1,56794	0,000758	2645,372	2645,372	2625,41	2646,012	2635,391	1,287861	7,947808	0,001516	4,893722	1,0604	1,060289	0,996597
41	26	0,161395	0,12905	1,613	0,000443	2625,409	2625,409	2604,78	2626,037	2615,093	1,288086	7,942374	0,000886	4,721637	1,0605	1,06041	0,998114
42	27	0,16606	0,13887	1,65963	0,000247	2604,777	2604,777	2583,81	2605,393	2594,292	1,28832	7,936744	0,000494	4,553222	1,0605	1,060483	0,999

Таблица А2 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
θ	ϕ	α	ε	μ	P_y	T_y	V_a	ζ	E_2	γ	λ	μ					
22	48	1	10,5	1,052432	1,278015	715,0775	1,116792	0,87	43,44089	0,036777	0,28866	3,2					
Расчёт процесса сгорания																	
f	f1	Vст	s	y (f1)	X1-2	Tпред	T1	T2	TИстина	T1-2	k1-2	K1-2	DX1-2	P	m	m1-2	X
0	-22	0,153412	0,09313	1,442365	3E-07	715,0775	715,0775	726,1894	715,077	720,6334			6E-07	1,278015	1	1	0
1	-21	0,149307	0,08501	1,403776	5,21E-06	726,1894	726,1894	733,5284	722,233	729,8589	1,365434	6,47295	1,04E-05	1,326287	1	1	6E-07
2	-20	0,14538	0,07723	1,366853	2,48E-05	733,5284	733,5284	741,0588	729,43	737,2936	1,364088	6,49318	4,95E-05	1,375688	1,000001	1	1,1E-05
3	-19	0,141632	0,06981	1,331614	7,11E-05	741,0588	741,0588	749,0042	736,816	745,0315	1,363026	6,50924	0,000142	1,426393	1,000003	1,000002	6,05E-05
4	-18	0,138065	0,06275	1,298078	0,000157	749,0042	749,0042	757,6681	744,611	753,3362	1,361942	6,52574	0,000315	1,478733	1,00001	1,000007	0,000203
5	-17	0,134681	0,05605	1,26626	0,000297	757,6681	757,6681	767,4386	753,117	762,5534	1,360802	6,54321	0,000595	1,533224	1,000026	1,000018	0,000517

6	-16	0,131481	0,04972	1,236176	0,000506	767,4386	767,4386	778,7881	762,719	773,1134	1,359562	6,56232	0,001012	1,590595	1,000056	1,000041	0,001112
7	-15	0,128467	0,04376	1,207841	0,000797	778,7881	778,7881	792,2656	773,881	785,5269	1,358176	6,58384	0,001594	1,651801	1,000107	1,000082	0,002124
8	-14	0,125641	0,03816	1,181268	0,001186	792,2656	792,2656	807,2811	787,149	799,7734	1,356593	6,60864	0,002372	1,718029	1,000188	1,000148	0,003718
9	-13	0,123004	0,03294	1,156471	0,001687	807,2811	807,2811	826,6732	803,141	816,9772	1,354833	6,63646	0,003374	1,7907	1,000308	1,000248	0,00609
10	-12	0,120556	0,0281	1,133461	0,002313	826,6732	826,6732	850,1685	822,533	838,4209	1,352787	6,66914	0,004626	1,871439	1,000479	1,000393	0,009464
11	-11	0,1183	0,02363	1,11225	0,003076	850,1685	850,1685	878,5042	846,041	864,3364	1,350354	6,7085	0,006153	1,96203	1,000713	1,000596	0,01409
12	-10	0,116237	0,01955	1,092849	0,003987	878,5042	878,5042	912,414	874,404	895,4591	1,347574	6,75417	0,007974	2,064367	1,001024	1,000868	0,020243
13	-9	0,114367	0,01585	1,075266	0,005052	912,414	912,414	952,5989	908,358	932,5064	1,344446	6,80643	0,010103	2,180373	1,001427	1,001225	0,028216
14	-8	0,112691	0,01253	1,059511	0,006274	952,5989	952,5989	999,6965	948,606	976,1477	1,340992	6,86524	0,012547	2,311897	1,001938	1,001682	0,03832
15	-7	0,11121	0,0096	1,045591	0,007652	999,6965	999,6965	1054,248	995,789	1026,972	1,337258	6,93019	0,015303	2,460603	1,002572	1,002255	0,050867
16	-6	0,109926	0,00706	1,033513	0,009178	1054,248	1054,248	1116,667	1050,45	1085,458	1,333305	7,0005	0,018356	2,627845	1,003346	1,002959	0,06617
17	-5	0,108838	0,0049	1,023284	0,010838	1116,667	1116,667	1187,203	1113	1151,935	1,329212	7,07511	0,021676	2,814541	1,004275	1,003811	0,084526
18	-4	0,107947	0,00314	1,014907	0,01261	1187,203	1187,203	1265,916	1183,69	1226,56	1,325061	7,1527	0,02522	3,021051	1,005371	1,004823	0,106202
19	-3	0,107253	0,00177	1,008388	0,014464	1265,916	1265,916	1352,645	1262,58	1309,28	1,320932	7,23185	0,028927	3,247054	1,006646	1,006009	0,131422
20	-2	0,106758	0,00078	1,003729	0,01636	1352,645	1352,645	1446,983	1349,5	1399,814	1,316902	7,3111	0,032719	3,491459	1,008109	1,007378	0,160349
21	-1	0,10646	0,0002	1,000932	0,01825	1446,983	1446,983	1548,263	1444,05	1497,623	1,313034	7,38908	0,0365	3,752321	1,009764	1,008937	0,193068
22	0	0,106361	0	1	0,02008	1548,263	1548,263	1655,546	1545,56	1601,905	1,309379	7,46456	0,040159	4,026805	1,01161	1,010687	0,229568
23	1	0,10646	0,0002	1,000932	0,021787	1655,546	1655,546	1767,625	1653,08	1711,586	1,305974	7,53651	0,043574	4,311187	1,013641	1,012625	0,269727
24	2	0,106758	0,00078	1,003729	0,023307	1767,625	1767,625	1883,04	1765,41	1825,333	1,302842	7,60411	0,046615	4,600902	1,015844	1,014743	0,313302
25	3	0,107253	0,00177	1,008388	0,024575	1883,04	1883,04	2000,115	1881,08	1941,577	1,299996	7,66676	0,049149	4,890661	1,018202	1,017023	0,359916
26	4	0,107947	0,00314	1,014907	0,025527	2000,115	2000,115	2117,003	1998,4	2058,559	1,29744	7,72405	0,051053	5,174615	1,020687	1,019445	0,409066
27	5	0,108838	0,0049	1,023284	0,026109	2117,003	2117,003	2231,759	2115,54	2174,381	1,29517	7,77575	0,052218	5,446586	1,023269	1,021978	0,460119
28	6	0,109926	0,00706	1,033513	0,026279	2231,759	2231,759	2342,414	2230,53	2287,087	1,293178	7,8218	0,052558	5,700338	1,02591	1,02459	0,512336
29	7	0,11121	0,0096	1,045591	0,026012	2342,414	2342,414	2447,066	2341,42	2394,74	1,29145	7,86223	0,052024	5,929889	1,028568	1,027239	0,564895
30	8	0,112691	0,01253	1,059511	0,025301	2447,066	2447,066	2543,975	2446,29	2495,52	1,289972	7,89721	0,050603	6,129823	1,031199	1,029884	0,616919
31	9	0,114367	0,01585	1,075266	0,024165	2543,975	2543,975	2631,645	2543,39	2587,81	1,288726	7,92698	0,048329	6,295595	1,033758	1,032479	0,667521
32	10	0,116237	0,01955	1,092849	0,022641	2631,645	2631,645	2708,908	2631,25	2670,277	1,287693	7,95185	0,045283	6,423793	1,036202	1,03498	0,715851
33	11	0,1183	0,02363	1,11225	0,020792	2708,908	2708,908	2774,973	2708,67	2741,94	1,286855	7,97216	0,041584	6,512323	1,038492	1,037347	0,761134
34	12	0,120556	0,0281	1,133461	0,018696	2774,973	2774,973	2829,461	2774,88	2802,217	1,286192	7,98832	0,037391	6,560514	1,040595	1,039544	0,802718
35	13	0,123004	0,03294	1,156471	0,016443	2829,461	2829,461	2872,41	2829,48	2850,935	1,285684	8,00074	0,032885	6,569117	1,042486	1,041541	0,840109
36	14	0,125641	0,03816	1,181268	0,014129	2872,41	2872,41	2904,246	2872,53	2888,328	1,285313	8,00985	0,028258	6,540205	1,044149	1,043318	0,872994
37	15	0,128467	0,04376	1,207841	0,011848	2904,246	2904,246	2925,729	2904,45	2914,988	1,28506	8,01607	0,023696	6,476973	1,045578	1,044864	0,901252
38	16	0,131481	0,04972	1,236176	0,009684	2925,729	2925,729	2937,884	2926	2931,807	1,284908	8,01982	0,019369	6,383475	1,046777	1,046178	0,924949

39	17	0,134681	0,05605	1,26626	0,007706	2937,884	2937,884	2941,903	2938,2	2939,893	1,284839	8,0215	0,015411	6,264318	1,047756	1,047267	0,944317
40	18	0,138065	0,06275	1,298078	0,005961	2941,903	2941,903	2939,065	2942,26	2940,484	1,28484	8,02148	0,011921	6,124341	1,048536	1,048146	0,959729
41	19	0,141632	0,06981	1,331614	0,004476	2939,065	2939,065	2930,642	2939,44	2934,854	1,284897	8,02008	0,008953	5,968324	1,049139	1,048837	0,97165
42	20	0,14538	0,07723	1,366853	0,003259	2930,642	2930,642	2917,83	2931,03	2924,236	1,284998	8,01759	0,006518	5,800742	1,049591	1,049365	0,980603
43	21	0,149307	0,08501	1,403776	0,002297	2917,83	2917,83	2901,696	2918,23	2909,763	1,285133	8,01427	0,004594	5,625589	1,049921	1,049756	0,987121
44	22	0,153412	0,09313	1,442365	0,001565	2901,696	2901,696	2883,146	2902,1	2892,421	1,285294	8,01031	0,00313	5,44627	1,050153	1,050037	0,991715
45	23	0,157691	0,1016	1,482603	0,001029	2883,146	2883,146	2862,916	2883,54	2873,031	1,285475	8,00588	0,002058	5,265568	1,050312	1,050233	0,994845
46	24	0,162144	0,11041	1,524469	0,000652	2862,916	2862,916	2841,578	2863,31	2852,247	1,285669	8,0011	0,001303	5,085661	1,050416	1,050364	0,996903
47	25	0,166768	0,11957	1,567944	0,000397	2841,578	2841,578	2819,557	2841,97	2830,568	1,285874	7,99608	0,000794	4,908188	1,050482	1,050449	0,998206
48	26	0,171561	0,12905	1,613005	0,000232	2819,557	2819,557	2797,158	2819,94	2808,357	1,286087	7,99087	0,000465	4,734329	1,050522	1,050502	0,999

Таблица А3 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$

					ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ											
θ	ϕ	α	ε	μ	P_y	T_y	V_a	ζ	E_2	γ	λ	μ				
12	55	1	28	1,0524	5,3815	976,1432	1,0086	0,96	145,0471	0,0117	0,2934	3,4				
Расчёт процесса сгорания																
f	f_1	Vст	s	y(f1)	X1-2	Tпред	T1	T2	T1-2	k1-2	K1-2	$\Delta X1-2$	P	m	m_{1-2}	X
0	-26	0,1791	0,12905	1,613005	1,23E-07	673,2341	673,23	680,78	677,0067			2,46E-07	1,030859	1	1	0
1	-25	0,1741	0,11957	1,567944	2,3E-06	680,7793	680,78	688,08	684,4301	1,372293	6,37212	4,59E-06	1,071759	1	1	2,46E-07
2	-24	0,1692	0,11041	1,524469	1,14E-05	688,0809	688,08	695,52	691,8022	1,371064	6,38991	2,28E-05	1,114017	1	1	4,84E-06
3	-23	0,1646	0,1016	1,482603	3,38E-05	695,5236	695,52	703,23	699,3786	1,369868	6,40733	6,76E-05	1,157732	1,000001	1,000001	2,76E-05
4	-22	0,1601	0,09313	1,442365	7,67E-05	703,2336	703,23	711,39	707,3117	1,368666	6,42497	0,000153	1,203084	1,000005	1,000003	9,53E-05
5	-21	0,1558	0,08501	1,403776	0,000148	711,3899	711,39	720,23	715,8098	1,367433	6,44317	0,000296	1,250355	1,000013	1,000009	0,000249
6	-20	0,1517	0,07723	1,366853	0,000256	720,2296	720,23	730,04	725,1368	1,366141	6,46238	0,000512	1,299941	1,000028	1,00002	0,000544
7	-19	0,1478	0,06981	1,331614	0,000409	730,044	730,04	741,18	735,6122	1,364756	6,48311	0,000819	1,352373	1,000054	1,000041	0,001056
8	-18	0,1441	0,06275	1,298078	0,000617	741,1803	741,18	754,04	747,6115	1,363241	6,50598	0,001234	1,408326	1,000095	1,000075	0,001875
9	-17	0,1406	0,05605	1,26626	0,000889	754,0426	754,04	769,09	761,5658	1,361557	6,53163	0,001777	1,468624	1,000158	1,000127	0,003109
10	-16	0,1372	0,04972	1,236176	0,001233	769,089	769,09	786,82	777,9549	1,359663	6,56077	0,002466	1,534249	1,000249	1,000203	0,004886
11	-15	0,1341	0,04376	1,207841	0,001659	786,8208	786,82	807,77	797,2965	1,357523	6,59404	0,003318	1,606333	1,000374	1,000311	0,007353
12	-14	0,1311	0,03816	1,181268	0,002176	807,7723	807,77	832,51	820,1417	1,35511	6,63205	0,004351	1,686138	1,000543	1,000458	0,010671
13	-13	0,1284	0,03294	1,156471	0,00279	832,5111	832,51	859,78	846,1437	1,352405	6,67528	0,005579	1,77504	1,000764	1,000653	0,015022
14	-12	0,1258	0,0281	1,133461	0,003508	859,7763	859,78	893,53	876,6534	1,349502	6,72243	0,007016	1,874501	1,001048	1,000906	0,020601

15	-11	0,1235	0,02363	1,11225	0,004336	893,5304	893,53	932,74	913,1369	1,346313	6,77513	0,008671	1,985995	1,001405	1,001226	0,027617
16	-10	0,1213	0,01955	1,092849	0,005275	932,7433	932,74	977,93	955,3355	1,342778	6,83468	0,010551	2,110937	1,001846	1,001625	0,036289
17	-9	0,1194	0,01585	1,075266	0,006328	977,9276	977,93	1029,5	1003,732	1,339024	6,89928	0,012655	2,250647	1,002382	1,002114	0,04684
18	-8	0,1176	0,01253	1,059511	0,007489	1029,537	1029,5	1087,9	1058,742	1,335105	6,96828	0,014979	2,406261	1,003026	1,002704	0,059495
19	-7	0,1161	0,0096	1,045591	0,008754	1087,946	1087,9	1153,4	1120,689	1,331082	7,0408	0,017509	2,578642	1,003788	1,003407	0,074474
20	-6	0,1147	0,00706	1,033513	0,010112	1153,431	1153,4	1226,1	1189,789	1,327021	7,11582	0,020223	2,768306	1,004678	1,004233	0,091982
21	-5	0,1136	0,0049	1,023284	0,011546	1226,147	1226,1	1306,1	1266,13	1,322986	7,19222	0,023093	2,975329	1,005707	1,005192	0,112206
22	-4	0,1127	0,00314	1,014907	0,013038	1306,112	1306,1	1393,2	1349,649	1,319037	7,26887	0,026076	3,199278	1,006881	1,006294	0,135298
23	-3	0,1119	0,00177	1,008388	0,014561	1393,186	1393,2	1487,1	1440,12	1,315225	7,34468	0,029122	3,439144	1,008207	1,007544	0,161374
24	-2	0,1114	0,00078	1,003729	0,016085	1487,054	1487,1	1587,2	1537,134	1,311591	7,41868	0,03217	3,693288	1,009688	1,008948	0,190496
25	-1	0,1111	0,0002	1,000932	0,017575	1587,214	1587,2	1693	1640,093	1,308167	7,48999	0,03515	3,959412	1,011324	1,010506	0,222665
26	0	0,111	0	1	0,018991	1692,972	1693	1803,4	1748,202	1,304975	7,55792	0,037983	4,234561	1,013112	1,012218	0,257815
27	1	0,1111	0,0002	1,000932	0,020293	1803,433	1803,4	1917,5	1860,472	1,302028	7,6219	0,040586	4,515147	1,015044	1,014078	0,295798
28	2	0,1114	0,00078	1,003729	0,021436	1917,512	1917,5	2033,9	1975,731	1,299333	7,68153	0,042873	4,797017	1,017108	1,016076	0,336384
29	3	0,1119	0,00177	1,008388	0,022379	2033,949	2033,9	2151,3	2092,642	1,296888	7,73655	0,044757	5,075556	1,019288	1,018198	0,379257
30	4	0,1127	0,00314	1,014907	0,02308	2151,334	2151,3	2268,1	2209,738	1,294689	7,7868	0,04616	5,345828	1,021565	1,020427	0,424014
31	5	0,1136	0,0049	1,023284	0,023506	2268,142	2268,1	2382,8	2325,461	1,292729	7,83225	0,047012	5,602751	1,023912	1,022738	0,470174
32	6	0,1147	0,00706	1,033513	0,023629	2382,78	2382,8	2493,6	2438,211	1,290996	7,87294	0,047258	5,841292	1,026303	1,025108	0,517185
33	7	0,1161	0,0096	1,045591	0,023433	2493,641	2493,6	2599,2	2546,401	1,289479	7,90896	0,046866	6,056682	1,028707	1,027505	0,564443
34	8	0,1176	0,01253	1,059511	0,022912	2599,162	2599,2	2697,9	2648,524	1,288164	7,94049	0,045824	6,244635	1,03109	1,029898	0,611309
35	9	0,1194	0,01585	1,075266	0,022075	2697,887	2697,9	2788,5	2743,207	1,287037	7,96773	0,04415	6,401542	1,033421	1,032255	0,657133
36	10	0,1213	0,01955	1,092849	0,020943	2788,528	2788,5	2870	2829,273	1,286085	7,99093	0,041886	6,524649	1,035666	1,034543	0,701283
37	11	0,1235	0,02363	1,11225	0,019551	2870,017	2870	2941,6	2905,786	1,285292	8,01035	0,039102	6,61218	1,037796	1,036731	0,743169
38	12	0,1258	0,0281	1,133461	0,017947	2941,554	2941,6	3002,6	2972,094	1,284646	8,02628	0,035894	6,663418	1,039785	1,038791	0,782271
39	13	0,1284	0,03294	1,156471	0,016187	3002,634	3002,6	3053,1	3027,849	1,28413	8,03903	0,032373	6,678713	1,041611	1,040698	0,818165
40	14	0,1311	0,03816	1,181268	0,014332	3053,063	3053,1	3093	3073,01	1,283732	8,04889	0,028663	6,659436	1,043257	1,042434	0,850538
41	15	0,1341	0,04376	1,207841	0,012447	3092,957	3093	3122,7	3107,835	1,283439	8,05619	0,024893	6,607866	1,044715	1,043986	0,879202
42	16	0,1372	0,04972	1,236176	0,010593	3122,714	3122,7	3143	3132,848	1,283237	8,06123	0,021186	6,52703	1,045981	1,045348	0,904095
43	17	0,1406	0,05605	1,26626	0,008827	3142,983	3143	3154,6	3148,797	1,283113	8,06431	0,017653	6,420513	1,047058	1,04652	0,925281
44	18	0,1441	0,06275	1,298078	0,007194	3154,611	3154,6	3158,6	3156,596	1,283058	8,0657	0,014388	6,292242	1,047956	1,047507	0,942935
45	19	0,1478	0,06981	1,331614	0,005729	3158,581	3158,6	3156	3157,268	1,283059	8,06567	0,011458	6,146271	1,048688	1,048322	0,957322
46	20	0,1517	0,07723	1,366853	0,004453	3155,955	3156	3147,8	3151,88	1,283107	8,06447	0,008907	5,986585	1,049271	1,048979	0,968781
47	21	0,1558	0,08501	1,403776	0,003375	3147,806	3147,8	3135,2	3141,49	1,283194	8,06231	0,006751	5,816938	1,049724	1,049497	0,977687

48	22	0,1601	0,09313	1,442365	0,002491	3135,174	3135,2	3119	3127,094	1,283311	8,05938	0,004983	5,640723	1,050067	1,049895	0,984438
49	23	0,1646	0,1016	1,482603	0,001789	3119,014	3119	3100,2	3109,594	1,283453	8,05585	0,003578	5,460895	1,05032	1,050194	0,989421
50	24	0,1692	0,11041	1,524469	0,001248	3100,175	3100,2	3079,4	3089,775	1,283613	8,05185	0,002497	5,279933	1,050502	1,050411	0,992999
51	25	0,1741	0,11957	1,567944	0,000845	3079,375	3079,4	3057,2	3068,291	1,283788	8,0475	0,00169	5,099838	1,050629	1,050566	0,995496
52	26	0,1791	0,12905	1,613005	0,000555	3057,207	3057,2	3034,1	3045,672	1,283974	8,04289	0,001109	4,922172	1,050715	1,050672	0,997186
53	27	0,1842	0,13887	1,659631	0,000352	3034,136	3034,1	3010,5	3022,327	1,284169	8,03808	0,000705	4,7481	1,050772	1,050743	0,998296
54	28	0,1896	0,14901	1,707801	0,000216	3010,519	3010,5	2986,6	2998,569	1,284369	8,03312	0,000433	4,578457	1,050808	1,05079	0,999

Таблица А4 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 7200 \text{ мин}^{-1}$

					ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ												
θ	ϕ	α	ε	μ	P_y	T_y	V_a	ζ	E_2	γ	λ	μ					
29	60	1	10,5	1,05243	0,8513	647,98	1,24686	0,96	43,032	0,034	0,2887	3,5					
Расчёт процесса сгорания																	
f	f1	Vсг	s	y (f1)	X1-2	Tпред	T1	T2	T2истина	T1-2	k1-2	K1-2	DX1-2	P	m	m ₁₋₂	X
0	-29	0,2087	0,159	1,7575	3,4E-08	647,979	647,98	655,51	647,98	651,74			6,9E-08	0,8513	1	1	0
1	-28	0,2028	0,149	1,7078	7,4E-07	655,51	655,51	662,607	655,02	659,06	1,377	6,3095	1,5E-06	0,8856	1	1	7E-08
2	-27	0,1971	0,139	1,6596	4E-06	662,607	662,61	669,789	662,13	666,2	1,375	6,328	8,1E-06	0,9212	1	1	2E-06
3	-26	0,1915	0,129	1,613	1,3E-05	669,789	669,79	677,107	669,32	673,45	1,374	6,3457	2,6E-05	0,9581	1	1	1E-05
4	-25	0,1862	0,12	1,5679	3E-05	677,107	677,11	684,634	676,64	680,87	1,373	6,3635	6,1E-05	0,9964	1	1	4E-05
5	-24	0,181	0,11	1,5245	6,1E-05	684,634	684,63	692,477	684,17	688,56	1,372	6,3814	0,00012	1,0362	1	1	1E-04
6	-23	0,1761	0,102	1,4826	0,00011	692,477	692,48	700,771	692,02	696,62	1,37	6,3997	0,00022	1,0777	1	1,00001	0,0002
7	-22	0,1713	0,093	1,4424	0,00018	700,771	700,77	709,689	700,33	705,23	1,369	6,4187	0,00036	1,1211	1	1,00002	0,0004
8	-21	0,1667	0,085	1,4038	0,00028	709,689	709,69	719,435	709,25	714,56	1,368	6,4385	0,00056	1,1666	1	1,00003	0,0008
9	-20	0,1623	0,077	1,3669	0,00041	719,435	719,43	730,248	719,01	724,84	1,366	6,4597	0,00082	1,2146	1,0001	1,00005	0,0014
10	-19	0,1581	0,07	1,3316	0,00058	730,248	730,25	742,407	729,84	736,33	1,365	6,4826	0,00116	1,2656	1,0001	1,00009	0,0022
11	-18	0,1541	0,063	1,2981	0,0008	742,407	742,41	756,221	742,02	749,31	1,363	6,5076	0,00159	1,32	1,0002	1,00014	0,0033
12	-17	0,1504	0,056	1,2663	0,00107	756,221	756,22	772,031	755,85	764,13	1,361	6,5353	0,00213	1,3785	1,0002	1,00021	0,0049
13	-16	0,1468	0,05	1,2362	0,00139	772,031	772,03	790,208	771,69	781,12	1,359	6,5661	0,00278	1,4418	1,0004	1,0003	0,0071
14	-15	0,1434	0,044	1,2078	0,00178	790,208	790,21	811,144	789,9	800,68	1,357	6,6004	0,00356	1,5106	1,0005	1,00043	0,0098
15	-14	0,1403	0,038	1,1813	0,00224	811,144	811,14	835,247	810,88	823,2	1,355	6,6385	0,00448	1,5859	1,0007	1,00059	0,0134
16	-13	0,1373	0,033	1,1565	0,00277	835,247	835,25	862,93	835,02	849,09	1,352	6,6809	0,00554	1,6685	1,0009	1,00079	0,0179

17	-12	0,1346	0,028	1,1335	0,00338	862,93	862,93	894,608	862,76	878,77	1,349	6,7275	0,00676	1,7593	1,0012	1,00105	0,0234
18	-11	0,1321	0,024	1,1123	0,00408	894,608	894,61	930,685	894,49	912,65	1,346	6,7785	0,00815	1,8594	1,0015	1,00136	0,0302
19	-10	0,1298	0,02	1,0928	0,00486	930,685	930,69	971,534	930,63	951,11	1,343	6,8336	0,00971	1,9696	1,0019	1,00174	0,0383
20	-9	0,1277	0,016	1,0753	0,00572	971,534	971,53	1017,49	971,55	994,51	1,339	6,8926	0,01144	2,0908	1,0024	1,00219	0,048
21	-8	0,1258	0,013	1,0595	0,00667	1017,49	1017,5	1068,85	1017,6	1043,2	1,336	6,9551	0,01334	2,2236	1,003	1,00273	0,0595
22	-7	0,1242	0,01	1,0456	0,0077	1068,85	1068,9	1125,84	1069	1097,3	1,332	7,0203	0,01539	2,3686	1,0037	1,00335	0,0728
23	-6	0,1227	0,007	1,0335	0,0088	1125,84	1125,8	1188,61	1126,1	1157,2	1,329	7,0877	0,0176	2,5261	1,0045	1,00408	0,0882
24	-5	0,1215	0,005	1,0233	0,00997	1188,61	1188,6	1257,24	1189	1222,9	1,325	7,1564	0,01994	2,696	1,0054	1,00492	0,1058
25	-4	0,1205	0,003	1,0149	0,01119	1257,24	1257,2	1331,7	1257,7	1294,5	1,321	7,2256	0,02239	2,8781	1,0064	1,00587	0,1258
26	-3	0,1197	0,002	1,0084	0,01246	1331,7	1331,7	1411,82	1332,3	1371,8	1,318	7,2946	0,02491	3,0718	1,0075	1,00694	0,1481
27	-2	0,1192	8E-04	1,0037	0,01374	1411,82	1411,8	1497,35	1412,5	1454,6	1,314	7,3625	0,02747	3,2758	1,0088	1,00814	0,1731
28	-1	0,1189	2E-04	1,0009	0,01501	1497,35	1497,3	1587,88	1498,2	1542,6	1,311	7,4287	0,03003	3,4887	1,0102	1,00947	0,2005
29	0	0,1187	0	1	0,01626	1587,88	1587,9	1682,87	1588,8	1635,4	1,308	7,4926	0,03253	3,7086	1,0117	1,01093	0,2306
30	1	0,1189	2E-04	1,0009	0,01746	1682,87	1682,9	1781,64	1683,9	1732,3	1,305	7,5536	0,03492	3,9331	1,0133	1,01251	0,2631
31	2	0,1192	8E-04	1,0037	0,01856	1781,64	1781,6	1883,38	1782,8	1832,5	1,303	7,6115	0,03713	4,1595	1,0151	1,01422	0,298
32	3	0,1197	0,002	1,0084	0,01955	1883,38	1883,4	1987,15	1884,7	1935,3	1,3	7,6658	0,03911	4,3847	1,017	1,01605	0,3351
33	4	0,1205	0,003	1,0149	0,02039	1987,15	1987,2	2091,9	1988,6	2039,5	1,298	7,7163	0,04079	4,6054	1,019	1,01798	0,3742
34	5	0,1215	0,005	1,0233	0,02106	2091,9	2091,9	2196,48	2093,5	2144,2	1,296	7,763	0,04211	4,8182	1,021	1,02	0,415
35	6	0,1227	0,007	1,0335	0,02151	2196,48	2196,5	2299,68	2198,2	2248,1	1,294	7,8056	0,04302	5,0194	1,0232	1,0221	0,4571
36	7	0,1242	0,01	1,0456	0,02174	2299,68	2299,7	2400,28	2301,5	2350	1,292	7,8444	0,04348	5,2056	1,0254	1,02426	0,5002
37	8	0,1258	0,013	1,0595	0,02172	2400,28	2400,3	2497,03	2402,2	2448,7	1,291	7,8792	0,04344	5,3734	1,0276	1,02645	0,5436
38	9	0,1277	0,016	1,0753	0,02145	2497,03	2497	2588,76	2499	2542,9	1,289	7,9102	0,04289	5,52	1,0298	1,02866	0,5871
39	10	0,1298	0,02	1,0928	0,02092	2588,76	2588,8	2674,38	2590,9	2631,6	1,288	7,9375	0,04183	5,6427	1,0319	1,03084	0,63
40	11	0,1321	0,024	1,1123	0,02014	2674,38	2674,4	2752,93	2676,6	2713,7	1,287	7,9612	0,04028	5,7397	1,0341	1,03299	0,6718
41	12	0,1346	0,028	1,1335	0,01913	2752,93	2752,9	2823,6	2755,2	2788,3	1,286	7,9817	0,03827	5,8094	1,0361	1,03507	0,7121
42	13	0,1373	0,033	1,1565	0,01792	2823,6	2823,6	2885,8	2825,9	2854,7	1,286	7,9989	0,03585	5,8512	1,038	1,03706	0,7503
43	14	0,1403	0,038	1,1813	0,01654	2885,8	2885,8	2939,14	2888,2	2912,5	1,285	8,0132	0,03309	5,8652	1,0399	1,03894	0,7862
44	15	0,1434	0,044	1,2078	0,01504	2939,14	2939,1	2983,46	2941,6	2961,3	1,285	8,0248	0,03008	5,852	1,0415	1,04069	0,8193
45	16	0,1468	0,05	1,2362	0,01345	2983,46	2983,5	3018,82	2986	3001,1	1,284	8,0339	0,02691	5,813	1,0431	1,04229	0,8494
46	17	0,1504	0,056	1,2663	0,01184	3018,82	3018,8	3045,51	3021,4	3032,2	1,284	8,0407	0,02367	5,7502	1,0444	1,04373	0,8763
47	18	0,1541	0,063	1,2981	0,01023	3045,51	3045,5	3064	3048,1	3054,8	1,284	8,0455	0,02046	5,6658	1,0456	1,04502	0,8999
48	19	0,1581	0,07	1,3316	0,00868	3064	3064	3074,92	3066,6	3069,5	1,284	8,0486	0,01736	5,5626	1,0467	1,04613	0,9204
49	20	0,1623	0,077	1,3669	0,00723	3074,92	3074,9	3079,02	3077,5	3077	1,284	8,05	0,01445	5,4435	1,0475	1,04709	0,9378

50	21	0,1667	0,085	1,4038	0,0059	3079,02	3079	3077,13	3081,6	3078,1	1,284	8,0502	0,01179	5,3114	1,0483	1,0479	0,9522
51	22	0,1713	0,093	1,4424	0,00471	3077,13	3077,1	3070,11	3079,7	3073,6	1,284	8,0492	0,00942	5,1694	1,0489	1,04856	0,964
52	23	0,1761	0,102	1,4826	0,00368	3070,11	3070,1	3058,81	3072,7	3064,5	1,284	8,0472	0,00737	5,0202	1,0493	1,0491	0,9734
53	24	0,181	0,11	1,5245	0,00281	3058,81	3058,8	3044,06	3061,4	3051,4	1,284	8,0445	0,00563	4,8664	1,0497	1,04953	0,9808
54	25	0,1862	0,12	1,5679	0,0021	3044,06	3044,1	3026,59	3046,6	3035,3	1,284	8,0411	0,0042	4,7101	1,05	1,04986	0,9864
55	26	0,1915	0,129	1,613	0,00153	3026,59	3026,6	3007,08	3029,1	3016,8	1,284	8,0372	0,00306	4,5533	1,0502	1,05011	0,9906
56	27	0,1971	0,139	1,6596	0,00108	3007,08	3007,1	2986,07	3009,6	2996,6	1,284	8,0329	0,00217	4,3976	1,0504	1,05029	0,9937
57	28	0,2028	0,149	1,7078	0,00075	2986,07	2986,1	2964,04	2988,6	2975,1	1,285	8,0283	0,0015	4,2443	1,0505	1,05042	0,9958
58	29	0,2087	0,159	1,7575	0,0005	2964,04	2964	2941,36	2966,5	2952,7	1,285	8,0235	0,001	4,0942	1,0506	1,05052	0,9973
59	30	0,2148	0,17	1,8087	0,00033	2941,36	2941,4	2918,31	2943,8	2929,8	1,285	8,0185	0,00065	3,9481	1,0506	1,05058	0,9983
60	31	0,221	0,181	1,8613	0,00021	2918,31	2918,3	2895,1	2920,7	2906,7	1,285	8,0134	0,00041	3,8065	1,0506	1,05062	0,999

Таблица А5 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при $n = 8000 \text{ мин}^{-1}$

					ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ												
θ	ϕ	α	ε	μ	P_y	T_y	V_a	ζ	E_2	γ	λ	μ					
32	70	1	10,5	1,052432	0,711395	630,4833	1,33207	0,99	41,46473	0,036255	0,28866	3,7					
Расчёт процесса сгорания																	
f	f ₁	Vст	s	y(f ₁)	X1-2	Tпред	T1	T2	T2истина	T1-2	k1-2	K1-2	DX1-2	P	m	m ₁₋₂	X
0	-32	0,243	0,1927	1,9154	7E-09	630,48	630,48	637,379	630,48	633,931			1,5E-08	0,7114	1	1	0
1	-31	0,236	0,1813	1,8613	2E-07	637,38	637,38	644,336	637,39	640,858	1,37999	6,2633	3,7E-07	0,7401	1	1	1E-08
2	-30	0,229	0,1702	1,8087	1E-06	644,34	644,34	651,364	644,36	647,85	1,37868	6,2815	2,2E-06	0,77	1	1	4E-07
3	-29	0,223	0,1595	1,7575	4E-06	651,36	651,36	658,477	651,41	654,921	1,37739	6,2995	7,4E-06	0,8011	1	1	3E-06
4	-28	0,217	0,149	1,7078	9E-06	658,48	658,48	665,697	658,54	662,087	1,37611	6,3176	1,8E-05	0,8334	1	1	1E-05
5	-27	0,211	0,1389	1,6596	2E-05	665,7	665,7	673,056	665,78	669,377	1,37485	6,3355	3,8E-05	0,867	1	1	3E-05
6	-26	0,205	0,1291	1,613	4E-05	673,06	673,06	680,606	673,16	676,831	1,37358	6,3536	7,1E-05	0,902	1	1	7E-05
7	-25	0,199	0,1196	1,5679	6E-05	680,61	680,61	688,408	680,74	684,507	1,37232	6,3717	0,00012	0,9383	1,00001	1,00001	0,0001
8	-24	0,193	0,1104	1,5245	1E-04	688,41	688,41	696,536	688,56	692,472	1,37105	6,3901	0,00019	0,9762	1,00001	1,00001	0,0003
9	-23	0,188	0,1016	1,4826	0,0001	696,54	696,54	705,085	696,7	700,811	1,36976	6,409	0,00029	1,0156	1,00002	1,00002	0,0004
10	-22	0,183	0,0931	1,4424	0,0002	705,09	705,09	714,167	705,27	709,626	1,36844	6,4283	0,00042	1,0568	1,00004	1,00003	0,0007
11	-21	0,178	0,085	1,4038	0,0003	714,17	714,17	723,913	714,38	719,04	1,36707	6,4485	0,00058	1,0999	1,00006	1,00005	0,0012
12	-20	0,173	0,0772	1,3669	0,0004	723,91	723,91	734,472	724,15	729,193	1,36565	6,4697	0,00079	1,1451	1,00009	1,00007	0,0017

13	-19	0,169	0,0698	1,3316	0,0005	734,47	734,47	746,013	734,73	740,243	1,36416	6,492	0,00105	1,1926	1,00013	1,00011	0,0025
14	-18	0,165	0,0628	1,2981	0,0007	746,01	746,01	758,724	746,3	752,369	1,36259	6,5159	0,00137	1,2427	1,00018	1,00015	0,0036
15	-17	0,161	0,0561	1,2663	0,0009	758,72	758,72	772,81	759,04	765,767	1,36091	6,5416	0,00175	1,2958	1,00025	1,00022	0,0049
16	-16	0,157	0,0497	1,2362	0,0011	772,81	772,81	788,493	773,15	780,652	1,35912	6,5692	0,0022	1,3521	1,00034	1,00029	0,0067
17	-15	0,153	0,0438	1,2078	0,0014	788,49	788,49	806,01	788,87	797,251	1,3572	6,5992	0,00272	1,4121	1,00045	1,00039	0,0089
18	-14	0,15	0,0382	1,1813	0,0017	806,01	806,01	825,608	806,42	815,809	1,35514	6,6316	0,00333	1,4762	1,00059	1,00052	0,0116
19	-13	0,147	0,0329	1,1565	0,002	825,61	825,61	847,545	826,05	836,577	1,35293	6,6668	0,00403	1,5448	1,00076	1,00067	0,0149
20	-12	0,144	0,0281	1,1335	0,0024	847,55	847,55	872,084	848,03	859,815	1,35058	6,7048	0,00483	1,6184	1,00096	1,00086	0,019
21	-11	0,141	0,0236	1,1123	0,0029	872,08	872,08	899,488	872,61	885,786	1,34809	6,7457	0,00573	1,6974	1,0012	1,00108	0,0238
22	-10	0,139	0,0195	1,0928	0,0034	899,49	899,49	930,015	900,06	914,752	1,34545	6,7895	0,00674	1,7824	1,00149	1,00135	0,0295
23	-9	0,136	0,0158	1,0753	0,0039	930,02	930,02	963,915	930,63	946,965	1,34269	6,8363	0,00785	1,8736	1,00184	1,00166	0,0363
24	-8	0,134	0,0125	1,0595	0,0045	963,91	963,91	1001,42	964,57	982,668	1,33981	6,8857	0,00908	1,9716	1,00223	1,00203	0,0441
25	-7	0,133	0,0096	1,0456	0,0052	1001,4	1001,4	1042,74	1002,1	1022,08	1,33684	6,9376	0,01042	2,0765	1,00269	1,00246	0,0532
26	-6	0,131	0,0071	1,0335	0,0059	1042,7	1042,7	1088,07	1043,5	1065,41	1,3338	6,9917	0,01187	2,1886	1,00322	1,00296	0,0636
27	-5	0,13	0,0049	1,0233	0,0067	1088,1	1088,1	1137,55	1088,9	1112,81	1,33071	7,0475	0,01343	2,3078	1,00382	1,00352	0,0755
28	-4	0,129	0,0031	1,0149	0,0075	1137,5	1137,5	1191,28	1138,4	1164,41	1,32761	7,1048	0,01509	2,4343	1,0045	1,00416	0,0889
29	-3	0,128	0,0018	1,0084	0,0084	1191,3	1191,3	1249,34	1192,2	1220,31	1,32452	7,1629	0,01684	2,5676	1,00526	1,00488	0,104
30	-2	0,127	0,0008	1,0037	0,0093	1249,3	1249,3	1311,71	1250,3	1280,52	1,32147	7,2215	0,01866	2,7074	1,00611	1,00569	0,1208
31	-1	0,127	0,0002	1,0009	0,0103	1311,7	1311,7	1378,35	1312,7	1345,03	1,31847	7,28	0,02056	2,853	1,00706	1,00659	0,1395
32	0	0,127	0	1	0,0112	1378,4	1378,4	1449,14	1379,3	1413,75	1,31556	7,338	0,02249	3,0037	1,0081	1,00758	0,1601
33	1	0,127	0,0002	1,0009	0,0122	1449,1	1449,1	1523,85	1450,1	1486,49	1,31274	7,395	0,02445	3,1583	1,00924	1,00867	0,1825
34	2	0,127	0,0008	1,0037	0,0132	1523,9	1523,9	1602,23	1524,9	1563,04	1,31005	7,4506	0,02639	3,3158	1,01047	1,00985	0,207
35	3	0,128	0,0018	1,0084	0,0142	1602,2	1602,2	1683,92	1603,3	1643,08	1,30748	7,5044	0,02831	3,4746	1,01181	1,01114	0,2334
36	4	0,129	0,0031	1,0149	0,0151	1683,9	1683,9	1768,49	1685	1726,21	1,30505	7,5562	0,03015	3,6332	1,01324	1,01253	0,2617
37	5	0,13	0,0049	1,0233	0,0159	1768,5	1768,5	1855,42	1769,6	1811,96	1,30277	7,6057	0,03189	3,7899	1,01477	1,014	0,2918
38	6	0,131	0,0071	1,0335	0,0167	1855,4	1855,4	1944,12	1856,6	1899,77	1,30063	7,6526	0,03349	3,9429	1,01638	1,01557	0,3237
39	7	0,133	0,0096	1,0456	0,0175	1944,1	1944,1	2033,93	1945,3	1989,03	1,29865	7,6969	0,03491	4,0902	1,01808	1,01723	0,3572
40	8	0,134	0,0125	1,0595	0,0181	2033,9	2033,9	2124,11	2035,1	2079,02	1,29681	7,7384	0,03612	4,23	1,01984	1,01896	0,3921
41	9	0,136	0,0158	1,0753	0,0185	2124,1	2124,1	2213,88	2125,3	2169	1,29512	7,7769	0,03708	4,3604	1,02167	1,02076	0,4283
42	10	0,139	0,0195	1,0928	0,0189	2213,9	2213,9	2302,44	2215,1	2258,16	1,29357	7,8126	0,03775	4,4796	1,02355	1,02261	0,4653
43	11	0,141	0,0236	1,1123	0,0191	2302,4	2302,4	2388,95	2303,7	2345,7	1,29217	7,8453	0,03811	4,586	1,02546	1,0245	0,5031
44	12	0,144	0,0281	1,1335	0,0191	2388,9	2388,9	2472,57	2390,2	2430,76	1,2909	7,8752	0,03814	4,6779	1,02738	1,02642	0,5412
45	13	0,147	0,0329	1,1565	0,0189	2472,6	2472,6	2552,5	2473,8	2512,54	1,28976	7,9022	0,03783	4,7541	1,02931	1,02835	0,5793

46	14	0,15	0,0382	1,1813	0,0186	2552,5	2552,5	2627,96	2553,7	2590,23	1,28875	7,9264	0,03717	4,8137	1,03123	1,03027	0,6172
47	15	0,153	0,0438	1,2078	0,0181	2628	2628	2698,26	2629,2	2663,11	1,28786	7,9479	0,03616	4,8558	1,03311	1,03217	0,6543
48	16	0,157	0,0497	1,2362	0,0174	2698,3	2698,3	2762,78	2699,5	2730,52	1,28707	7,9669	0,03482	4,8801	1,03494	1,03402	0,6905
49	17	0,161	0,0561	1,2663	0,0166	2762,8	2762,8	2821	2764	2791,89	1,2864	7,9833	0,03317	4,8865	1,0367	1,03582	0,7253
50	18	0,165	0,0628	1,2981	0,0156	2821	2821	2872,54	2822,2	2846,77	1,28582	7,9974	0,03126	4,8752	1,03838	1,03754	0,7585
51	19	0,169	0,0698	1,3316	0,0146	2872,5	2872,5	2917,14	2873,7	2894,84	1,28533	8,0093	0,02911	4,8468	1,03996	1,03917	0,7897
52	20	0,173	0,0772	1,3669	0,0134	2917,1	2917,1	2954,69	2918,3	2935,91	1,28494	8,0191	0,02678	4,8022	1,04143	1,0407	0,8189
53	21	0,178	0,085	1,4038	0,0122	2954,7	2954,7	2985,19	2955,9	2969,94	1,28462	8,027	0,02434	4,7425	1,04279	1,04211	0,8456
54	22	0,183	0,0931	1,4424	0,0109	2985,2	2985,2	3008,81	2986,4	2997	1,28437	8,0331	0,02182	4,669	1,04402	1,0434	0,87
55	23	0,188	0,1016	1,4826	0,0097	3008,8	3008,8	3025,83	3010	3017,32	1,28419	8,0376	0,0193	4,5833	1,04512	1,04457	0,8918
56	24	0,193	0,1104	1,5245	0,0084	3025,8	3025,8	3036,64	3027	3031,23	1,28407	8,0406	0,01683	4,4871	1,0461	1,04561	0,9111
57	25	0,199	0,1196	1,5679	0,0072	3036,6	3036,6	3041,72	3037,8	3039,18	1,284	8,0422	0,01446	4,3821	1,04695	1,04653	0,9279
58	26	0,205	0,1291	1,613	0,0061	3041,7	3041,7	3041,62	3042,9	3041,67	1,28398	8,0427	0,01223	4,27	1,04768	1,04732	0,9424
59	27	0,211	0,1389	1,6596	0,0051	3041,6	3041,6	3036,93	3042,7	3039,28	1,284	8,0422	0,01018	4,1526	1,0483	1,04799	0,9546
60	28	0,217	0,149	1,7078	0,0042	3036,9	3036,9	3028,28	3038	3032,61	1,28406	8,0407	0,00833	4,0314	1,04882	1,04856	0,9648
61	29	0,223	0,1595	1,7575	0,0034	3028,3	3028,3	3016,28	3029,4	3022,28	1,28415	8,0385	0,0067	3,908	1,04924	1,04903	0,9732
62	30	0,229	0,1702	1,8087	0,0026	3016,3	3016,3	3001,51	3017,4	3008,9	1,28427	8,0356	0,00529	3,7837	1,04958	1,04941	0,9799
63	31	0,236	0,1813	1,8613	0,0021	3001,5	3001,5	2984,53	3002,6	2993,02	1,28441	8,0322	0,0041	3,6597	1,04985	1,04971	0,9852
64	32	0,243	0,1927	1,9154	0,0016	2984,5	2984,5	2965,84	2985,6	2975,19	1,28456	8,0284	0,00312	3,537	1,05005	1,04995	0,9893
65	33	0,25	0,2044	1,9709	0,0012	2965,8	2965,8	2945,88	2966,9	2955,86	1,28473	8,0242	0,00232	3,4165	1,05021	1,05013	0,9924
66	34	0,257	0,2164	2,0279	0,0008	2945,9	2945,9	2925,02	2946,9	2935,45	1,28491	8,0197	0,00169	3,2987	1,05033	1,05027	0,9947
67	35	0,265	0,2287	2,0861	0,0006	2925	2925	2903,57	2926,1	2914,29	1,2851	8,015	0,0012	3,1841	1,05041	1,05037	0,9964
68	36	0,272	0,2412	2,1458	0,0004	2903,6	2903,6	2881,79	2904,6	2892,68	1,2853	8,0101	0,00084	3,0731	1,05048	1,05045	0,9976
69	37	0,28	0,254	2,2067	0,0003	2881,8	2881,8	2859,87	2882,8	2870,83	1,2855	8,0052	0,00057	2,966	1,05052	1,0505	0,9984
70	38	0,288	0,2671	2,2689	0,0002	2859,9	2859,9	2837,97	2860,9	2848,92	1,28571	8,0001	0,00038	2,8629	1,05055	1,05053	0,999

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

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

$\varphi_{кв}, \text{град}$	$\varphi_{кв}, \text{рад}$	$S_x, \text{мм}$	$V_x, \text{м/с}$	$W_{x1}, \text{м/с}^2$	$W_{x2}, \text{м/с}^2$	$W_x, \text{м/с}^2$
0	0	0	0	19651,48	5672,5919	25324,1
10	0,1745	0,5472	5,231	19352,93	5330,4927	24683,4
20	0,3491	2,1613	10,2	18466,35	4345,4575	22811,8
30	0,5236	4,7616	14,66	17018,68	2836,2959	19855
40	0,6981	8,2205	18,41	15053,91	985,03524	16038,9
50	0,8727	12,373	21,3	12631,73	-985,0352	11646,7
60	1,0472	17,031	23,25	9825,739	-2836,296	6989,44
70	1,2217	21,992	24,22	6721,202	-4345,457	2375,74
80	1,3963	27,057	24,26	3412,444	-5330,493	-1918,05
90	1,5708	32,041	23,46	1,2E-12	-5672,592	-5672,59
100	1,7453	36,782	21,94	-3412,44	-5330,493	-8742,94
110	1,9199	41,145	19,87	-6721,2	-4345,457	-11066,7
120	2,0944	45,031	17,38	-9825,74	-2836,296	-12662
130	2,2689	48,37	14,64	-12631,7	-985,0352	-13616,8
140	2,4435	51,119	11,74	-15053,9	985,03524	-14068,9
150	2,618	53,259	8,797	-17018,7	2836,2959	-14182,4
160	2,7925	54,784	5,847	-18466,3	4345,4575	-14120,9
170	2,9671	55,696	2,915	-19352,9	5330,4927	-14022,4
180	3,1416	56	2E-15	-19651,5	5672,5919	-13978,9
190	3,3161	55,696	-2,915	-19352,9	5330,4927	-14022,4
200	3,4907	54,784	-5,847	-18466,3	4345,4575	-14120,9
210	3,6652	53,259	-8,797	-17018,7	2836,2959	-14182,4
220	3,8397	51,119	-11,74	-15053,9	985,03524	-14068,9
230	4,0143	48,37	-14,64	-12631,7	-985,0352	-13616,8
240	4,1888	45,031	-17,38	-9825,74	-2836,296	-12662
250	4,3633	41,145	-19,87	-6721,2	-4345,457	-11066,7
260	4,5379	36,782	-21,94	-3412,44	-5330,493	-8742,94
270	4,7124	32,041	-23,46	-3,6E-12	-5672,592	-5672,59
280	4,8869	27,057	-24,26	3412,444	-5330,493	-1918,05
290	5,0615	21,992	-24,22	6721,202	-4345,457	2375,74
300	5,236	17,031	-23,25	9825,739	-2836,296	6989,44
310	5,4105	12,373	-21,3	12631,73	-985,0352	11646,7
320	5,5851	8,2205	-18,41	15053,91	985,03524	16038,9
330	5,7596	4,7616	-14,66	17018,68	2836,2959	19855
340	5,9341	2,1613	-10,2	18466,35	4345,4575	22811,8
350	6,1087	0,5472	-5,231	19352,93	5330,4927	24683,4
360	6,2832	2E-31	-7E-15	19651,48	5672,5919	25324,1
370	6,4577	0,5472	5,231	19352,93	5330,4927	24683,4
380	6,6323	2,1613	10,2	18466,35	4345,4575	22811,8
390	6,8068	4,7616	14,66	17018,68	2836,2959	19855
400	6,9813	8,2205	18,41	15053,91	985,03524	16038,9
410	7,1558	12,373	21,3	12631,73	-985,0352	11646,7
420	7,3304	17,031	23,25	9825,739	-2836,296	6989,44
430	7,5049	21,992	24,22	6721,202	-4345,457	2375,74
440	7,6794	27,057	24,26	3412,444	-5330,493	-1918,05
450	7,854	32,041	23,46	6,02E-12	-5672,592	-5672,59
460	8,0285	36,782	21,94	-3412,44	-5330,493	-8742,94
470	8,203	41,145	19,87	-6721,2	-4345,457	-11066,7

480	8,3776	45,031	17,38	-9825,74	-2836,296	-12662
490	8,5521	48,37	14,64	-12631,7	-985,0352	-13616,8
500	8,7266	51,119	11,74	-15053,9	985,03524	-14068,9
510	8,9012	53,259	8,797	-17018,7	2836,2959	-14182,4
520	9,0757	54,784	5,847	-18466,3	4345,4575	-14120,9
530	9,2502	55,696	2,915	-19352,9	5330,4927	-14022,4
540	9,4248	56	6E-15	-19651,5	5672,5919	-13978,9
550	9,5993	55,696	-2,915	-19352,9	5330,4927	-14022,4
560	9,7738	54,784	-5,847	-18466,3	4345,4575	-14120,9
570	9,9484	53,259	-8,797	-17018,7	2836,2959	-14182,4
580	10,123	51,119	-11,74	-15053,9	985,03524	-14068,9
590	10,297	48,37	-14,64	-12631,7	-985,0352	-13616,8
600	10,472	45,031	-17,38	-9825,74	-2836,296	-12662
610	10,647	41,145	-19,87	-6721,2	-4345,457	-11066,7
620	10,821	36,782	-21,94	-3412,44	-5330,493	-8742,94
630	10,996	32,041	-23,46	-8,4E-12	-5672,592	-5672,59
640	11,17	27,057	-24,26	3412,444	-5330,493	-1918,05
650	11,345	21,992	-24,22	6721,202	-4345,457	2375,74
660	11,519	17,031	-23,25	9825,739	-2836,296	6989,44
670	11,694	12,373	-21,3	12631,73	-985,0352	11646,7
680	11,868	8,2205	-18,41	15053,91	985,03524	16038,9
690	12,043	4,7616	-14,66	17018,68	2836,2959	19855
700	12,217	2,1613	-10,2	18466,35	4345,4575	22811,8
710	12,392	0,5472	-5,231	19352,93	5330,4927	24683,4
720	12,566	1E-30	-1E-14	19651,48	5672,5919	25324,1

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)

Таблица В1 - Сводная таблица динамического расчета двигателя.

φ°	Δp_r , 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_T , МПа	T , кН	$M_{кр.ц}$, Нм
0	0,0128	21539	-2,542	-2,5287	0	0	1	-2,529	1	-2,529	0	0	0	0
10	0,0028	20988	-2,477	-2,4738	0,0521	-0,129	1,0014	-2,477	0,975767	-2,414	0,224914	-0,55639	-3,46139	-166,839
20	-0,0072	19379	-2,287	-2,2939	0,1029	-0,236	1,0053	-2,306	0,904474	-2,075	0,438741	-1,00645	-6,26124	-301,792
30	-0,0092	16838	-1,987	-1,9961	0,1514	-0,302	1,0113	-2,019	0,790277	-1,577	0,631072	-1,2597	-7,83679	-377,733
40	-0,0122	13562	-1,6	-1,6125	0,1961	-0,316	1,0189	-1,643	0,639878	-1,032	0,79287	-1,27854	-7,95395	-383,381
50	-0,0152	9796	-1,156	-1,1712	0,2355	-0,276	1,027	-1,203	0,462126	-0,541	0,917162	-1,07414	-6,68241	-322,092
60	-0,0182	5811	-0,686	-0,7038	0,2683	-0,189	1,0348	-0,728	0,267354	-0,188	0,999645	-0,70359	-4,37716	-210,979
70	-0,0212	1872	-0,221	-0,2421	0,2929	-0,071	1,0412	-0,252	0,066479	-0,016	1,039078	-0,25159	-1,56515	-75,4403
80	-0,0232	-1780	0,21	0,1868	0,3082	0,0576	1,0454	0,1953	-0,13008	-0,024	1,037314	0,193787	1,205578	58,10884
90	-0,0232	-4957	0,5849	0,5617	0,3134	0,1761	1,0469	0,5881	-0,31342	-0,176	0,998899	0,561089	3,490615	168,2476
100	-0,0315	-7535	0,8892	0,8577	0,3082	0,2644	1,0454	0,8967	-0,47701	-0,409	0,930268	0,797897	4,963826	239,2564
110	-0,0315	-9464	1,1167	1,0853	0,2929	0,3179	1,0412	1,13	-0,61698	-0,67	0,838712	0,910236	5,662707	272,9425
120	-0,0315	-10762	1,2699	1,2384	0,2683	0,3323	1,0348	1,2815	-0,73204	-0,907	0,731358	0,905728	5,634661	271,5907
130	-0,0315	-11508	1,358	1,3265	0,2355	0,3124	1,027	1,3624	-0,82298	-1,092	0,614368	0,814978	5,070092	244,3784
140	-0,0305	-11827	1,3956	1,3652	0,1961	0,2677	1,0189	1,3909	-0,89194	-1,218	0,492477	0,672317	4,182577	201,6002
150	-0,0295	-11865	1,4	1,3706	0,1514	0,2075	1,0113	1,3861	-0,94166	-1,291	0,368864	0,505549	3,145092	151,5935
160	-0,0285	-11765	1,3882	1,3598	0,1029	0,14	1,0053	1,3669	-0,97488	-1,326	0,24529	0,333541	2,075006	100,0153
170	-0,0265	-11650	1,3747	1,3483	0,0521	0,0702	1,0014	1,3501	-0,99385	-1,34	0,122382	0,165004	1,026512	49,47788
180	-0,0245	-11602	1,3691	1,3446	4E-17	5E-17	1	1,3446	-1	-1,345	1,23E-16	1,65E-16	1,02E-15	4,94E-14
190	-0,0225	-11649	1,3746	1,3521	-0,052	-0,07	1,0014	1,354	-0,99385	-1,344	-0,12238	-0,16548	-1,02945	-49,6192
200	-0,0205	-11762	1,388	1,3675	-0,103	-0,141	1,0053	1,3747	-0,97488	-1,333	-0,24529	-0,33543	-2,08676	-100,582
210	-0,0185	-11861	1,3996	1,3811	-0,151	-0,209	1,0113	1,3968	-0,94166	-1,301	-0,36886	-0,50944	-3,16932	-152,761
220	-0,0165	-11822	1,395	1,3786	-0,196	-0,27	1,0189	1,4046	-0,89194	-1,23	-0,49248	-0,67892	-4,22366	-203,58
230	-0,0179	-11502	1,3573	1,3393	-0,236	-0,315	1,027	1,3755	-0,82298	-1,102	-0,61437	-0,82284	-5,11899	-246,735

240	-0,0105	-10754	1,269	1,2585	-0,268	-0,338	1,0348	1,3023	-0,73204	-0,921	-0,73136	-0,92042	-5,72604	-275,995
250	-0,0002	-9455	1,1157	1,1155	-0,293	-0,327	1,0412	1,1614	-0,61698	-0,688	-0,83871	-0,93556	-5,82024	-280,535
260	0,0140	-7525	0,888	0,902	-0,308	-0,278	1,0454	0,9429	-0,47701	-0,43	-0,93027	-0,83907	-5,21997	-251,602
270	0,0339	-4946	0,5836	0,6175	-0,313	-0,194	1,0469	0,6465	-0,31342	-0,194	-0,9989	-0,61684	-3,83744	-184,965
280	0,0625	-1767	0,2085	0,2711	-0,308	-0,084	1,0454	0,2834	-0,13008	-0,035	-1,03731	-0,28118	-1,74926	-84,3142
290	0,1045	1886	-0,223	-0,1181	-0,293	0,0346	1,0412	-0,123	0,066479	-0,008	-1,03908	0,122687	0,763256	36,78894
300	0,1678	5826	-0,687	-0,5196	-0,268	0,1394	1,0348	-0,538	0,267354	-0,139	-0,99964	0,519422	3,231398	155,7534
310	0,2662	9813	-1,158	-0,8916	-0,236	0,21	1,027	-0,916	0,462126	-0,412	-0,91716	0,817782	5,087537	245,2193
320	0,4226	13580	-1,602	-1,1798	-0,196	0,2313	1,0189	-1,202	0,639878	-0,755	-0,79287	0,935452	5,819579	280,5037
330	0,6700	16857	-1,989	-1,3192	-0,151	0,1997	1,0113	-1,334	0,790277	-1,043	-0,63107	0,83249	5,179038	249,6296
331	0,7011	17148	-2,023	-1,3224	-0,147	0,194	1,0106	-1,336	0,803455	-1,063	-0,61308	0,810744	5,043751	243,1088
332	0,7334	17432	-2,057	-1,3235	-0,142	0,1879	1,01	-1,337	0,816261	-1,08	-0,59478	0,787216	4,897381	236,0538
333	0,7670	17707	-2,089	-1,3225	-0,137	0,1814	1,0093	-1,335	0,828688	-1,096	-0,5762	0,762001	4,740516	228,4929
334	0,8019	17975	-2,121	-1,3191	-0,132	0,1746	1,0087	-1,331	0,840729	-1,109	-0,55734	0,735198	4,573767	220,4556
335	0,8381	18234	-2,152	-1,3135	-0,128	0,1675	1,0081	-1,324	0,852376	-1,12	-0,5382	0,706908	4,397775	211,9728
336	0,8758	18485	-2,181	-1,3054	-0,123	0,1601	1,0075	-1,315	0,863622	-1,127	-0,5188	0,677239	4,213198	203,0761
337	0,9149	18727	-2,21	-1,2948	-0,118	0,1525	1,0069	-1,304	0,874462	-1,132	-0,49914	0,646299	4,020715	193,7985
338	0,9557	18960	-2,237	-1,2816	-0,113	0,1446	1,0063	-1,29	0,884888	-1,134	-0,47924	0,6142	3,821027	184,1735
339	0,9981	19184	-2,264	-1,2656	-0,108	0,1366	1,0058	-1,273	0,894894	-1,133	-0,4591	0,58106	3,614858	174,2362
340	1,0424	19399	-2,289	-1,2467	-0,103	0,1283	1,0053	-1,253	0,904474	-1,128	-0,43874	0,547	3,402961	164,0227
341	1,0886	19605	-2,313	-1,2248	-0,098	0,1199	1,0048	-1,231	0,913624	-1,119	-0,41816	0,512145	3,186127	153,5713
342	1,1371	19801	-2,337	-1,1994	-0,093	0,1114	1,0043	-1,205	0,922337	-1,106	-0,39738	0,476632	2,965197	142,9225
343	1,1879	19987	-2,359	-1,1706	-0,088	0,1029	1,0038	-1,175	0,930608	-1,089	-0,3764	0,440607	2,741077	132,1199
344	1,2414	20164	-2,379	-1,1379	-0,083	0,0942	1,0034	-1,142	0,938433	-1,068	-0,35523	0,404228	2,514757	121,2113
345	1,2978	20330	-2,399	-1,1012	-0,078	0,0856	1,003	-1,104	0,945806	-1,042	-0,33389	0,367671	2,287332	110,2494
346	1,3574	20487	-2,417	-1,06	-0,073	0,077	1,0026	-1,063	0,952725	-1,01	-0,31238	0,331133	2,060022	99,29305
347	1,4206	20633	-2,435	-1,0142	-0,067	0,0685	1,0023	-1,016	0,959184	-0,973	-0,29072	0,294834	1,834202	88,40852
348	1,4875	20769	-2,451	-0,9632	-0,062	0,0601	1,0019	-0,965	0,965179	-0,93	-0,26891	0,259023	1,61142	77,67045
349	1,5586	20894	-2,466	-0,9069	-0,057	0,0519	1,0016	-0,908	0,970708	-0,88	-0,24698	0,223982	1,393421	67,1629
350	1,6342	21009	-2,479	-0,8449	-0,052	0,044	1,0014	-0,846	0,975767	-0,824	-0,22491	0,190023	1,182161	56,98015
351	1,7146	21114	-2,491	-0,7768	-0,047	0,0364	1,0011	-0,778	0,980353	-0,762	-0,20274	0,157497	0,979813	47,22701

352	1,7999	21207	-2,502	-0,7026	-0,042	0,0293	1,0009	-0,703	0,984464	-0,692	-0,18047	0,126789	0,788771	38,01874
353	1,8904	21290	-2,512	-0,6218	-0,037	0,0227	1,0007	-0,622	0,988097	-0,614	-0,15811	0,098314	0,611626	29,48035
354	1,9861	21361	-2,521	-0,5345	-0,031	0,0167	1,0005	-0,535	0,991249	-0,53	-0,13567	0,072518	0,451144	21,74516
355	2,0872	21422	-2,528	-0,4407	-0,026	0,0115	1,0003	-0,441	0,99392	-0,438	-0,11316	0,049865	0,31022	14,95259
356	2,1934	21472	-2,534	-0,3403	-0,021	0,0071	1,0002	-0,34	0,996107	-0,339	-0,09059	0,030832	0,19181	9,245235
357	2,3046	21511	-2,538	-0,2337	-0,016	0,0037	1,0001	-0,234	0,997809	-0,233	-0,06798	0,015891	0,09886	4,765036
358	2,4203	21539	-2,542	-0,1213	-0,01	0,0013	1,0001	-0,121	0,999026	-0,121	-0,04534	0,005499	0,034209	1,648861
359	2,5401	21555	-2,544	-0,0034	-0,005	2E-05	1	-0,003	0,999757	-0,003	-0,02268	7,82E-05	0,000487	0,023453
360	2,6633	21561	-2,544	0,119	-7E-17	-9E-18	1	0,119	1	0,119	-2,5E-16	-2,9E-17	-1,8E-16	-8,7E-15
361	2,7889	21556	-2,544	0,2454	0,0052	0,0013	1	0,2454	0,999757	0,245	0,022677	0,005564	0,034617	1,668537
362	2,9162	21539	-2,542	0,3745	0,0104	0,0039	1,0001	0,3746	0,999026	0,374	0,045342	0,016983	0,105652	5,092425
363	3,0438	21511	-2,538	0,5054	0,0157	0,0079	1,0001	0,5055	0,997809	0,504	0,067985	0,03436	0,213759	10,30321
364	3,1705	21473	-2,534	0,6367	0,0209	0,0133	1,0002	0,6368	0,996107	0,634	0,090594	0,057681	0,358841	17,29612
365	3,2949	21423	-2,528	0,767	0,0261	0,02	1,0003	0,7673	0,99392	0,762	0,113158	0,086796	0,53997	26,02655
366	3,4157	21362	-2,521	0,895	0,0313	0,028	1,0005	0,8954	0,991249	0,887	0,135666	0,121416	0,755347	36,40771
367	3,5313	21291	-2,512	1,019	0,0365	0,0372	1,0007	1,0197	0,988097	1,007	0,158107	0,161108	1,002276	48,30972
368	3,6401	21208	-2,503	1,1376	0,0417	0,0474	1,0009	1,1386	0,984464	1,12	0,180469	0,205298	1,277185	61,56032
369	3,7408	21115	-2,492	1,2493	0,0469	0,0586	1,0011	1,2506	0,980353	1,225	0,202742	0,253277	1,57567	75,94728
370	3,8318	21011	-2,479	1,3526	0,0521	0,0704	1,0014	1,3544	0,975767	1,32	0,224914	0,304218	1,892584	91,22256
371	3,9120	20896	-2,466	1,4463	0,0572	0,0828	1,0016	1,4486	0,970708	1,404	0,246975	0,357195	2,22216	107,1081
372	3,9801	20771	-2,451	1,5291	0,0624	0,0954	1,0019	1,5321	0,965179	1,476	0,268914	0,411204	2,558157	123,3032
373	4,0351	20635	-2,435	1,6002	0,0675	0,108	1,0023	1,6038	0,959184	1,535	0,290719	0,465195	2,894046	139,493
374	4,0762	20489	-2,418	1,6586	0,0726	0,1204	1,0026	1,6629	0,952725	1,58	0,312381	0,518105	3,223203	155,3584
375	4,1030	20332	-2,399	1,7038	0,0777	0,1324	1,003	1,709	0,945806	1,611	0,333888	0,568886	3,539122	170,5857
376	4,1152	20166	-2,38	1,7356	0,0828	0,1437	1,0034	1,7416	0,938433	1,629	0,35523	0,616548	3,835629	184,8773
377	4,1127	19989	-2,359	1,754	0,0879	0,1541	1,0038	1,7607	0,930608	1,632	0,376397	0,660181	4,107081	197,9613
378	4,0958	19803	-2,337	1,759	0,0929	0,1634	1,0043	1,7666	0,922337	1,622	0,397378	0,698997	4,348558	209,6005
379	4,0650	19607	-2,314	1,7513	0,0979	0,1715	1,0048	1,7597	0,913624	1,6	0,418162	0,732344	4,556017	219,6
380	4,0210	19402	-2,289	1,7316	0,1029	0,1782	1,0053	1,7408	0,904474	1,566	0,438741	0,759735	4,726416	227,8132
381	3,9649	19187	-2,264	1,7008	0,1079	0,1835	1,0058	1,7107	0,894894	1,522	0,459104	0,780852	4,857787	234,1453
382	3,8976	18963	-2,238	1,66	0,1129	0,1874	1,0063	1,6705	0,884888	1,469	0,47924	0,795557	4,949273	238,555

383	3,8206	18730	-2,21	1,6105	0,1178	0,1897	1,0069	1,6216	0,874462	1,408	0,499141	0,803889	5,001105	241,0533
384	3,7352	18488	-2,182	1,5537	0,1227	0,1906	1,0075	1,5653	0,863622	1,342	0,518797	0,806048	5,014539	241,7008
385	3,6428	18237	-2,152	1,4909	0,1275	0,1902	1,0081	1,5029	0,852376	1,271	0,538198	0,802384	4,991746	240,6022
386	3,5449	17978	-2,121	1,4235	0,1324	0,1884	1,0087	1,4359	0,840729	1,197	0,557336	0,793372	4,935676	237,8996
387	3,4428	17710	-2,09	1,353	0,1372	0,1856	1,0093	1,3656	0,828688	1,121	0,576201	0,779582	4,849886	233,7645
388	3,3379	17435	-2,057	1,2806	0,142	0,1818	1,01	1,2933	0,816261	1,045	0,594784	0,761656	4,738367	228,3893
389	3,2314	17152	-2,024	1,2075	0,1467	0,1771	1,0106	1,2203	0,803455	0,97	0,613077	0,740276	4,605362	221,9784
390	3,1244	16861	-1,99	1,1348	0,1514	0,1718	1,0113	1,1477	0,790277	0,897	0,631072	0,716138	4,455193	214,7403
391	3,0178	16563	-1,954	1,0635	0,156	0,1659	1,012	1,0762	0,776735	0,826	0,648759	0,689923	4,29211	206,8797
392	2,9126	16257	-1,918	0,9942	0,1607	0,1597	1,0127	1,0069	0,762838	0,758	0,666131	0,662285	4,120168	198,5921
393	2,8093	15945	-1,881	0,9278	0,1653	0,1533	1,0135	0,9403	0,748593	0,695	0,68318	0,633826	3,943122	190,0585
394	2,7084	15626	-1,844	0,8645	0,1698	0,1468	1,0142	0,8768	0,734009	0,635	0,699899	0,605093	3,764368	181,4425
395	2,6104	15300	-1,805	0,8049	0,1743	0,1403	1,015	0,817	0,719094	0,579	0,716279	0,576566	3,5869	172,8886
396	2,5155	14969	-1,766	0,7492	0,1787	0,1339	1,0157	0,761	0,703857	0,527	0,732315	0,548662	3,413305	164,5213
397	2,4240	14631	-1,726	0,6975	0,1831	0,1277	1,0165	0,709	0,688308	0,48	0,747998	0,521732	3,245768	156,446
398	2,3358	14288	-1,686	0,6499	0,1875	0,1219	1,0173	0,6611	0,672456	0,437	0,763322	0,496067	3,0861	148,75
399	2,2511	13939	-1,645	0,6063	0,1918	0,1163	1,0181	0,6173	0,656309	0,398	0,778282	0,471903	2,935775	141,5043
400	2,2030	13585	-1,603	0,6	0,1961	0,1176	1,0189	0,6113	0,639878	0,384	0,79287	0,475727	2,959563	142,6509
410	1,5968	9819	-1,159	0,4382	0,2355	0,1032	1,027	0,45	0,462126	0,202	0,917162	0,401871	2,500094	120,5046
420	1,1966	5833	-0,688	0,5083	0,2683	0,1364	1,0348	0,526	0,267354	0,136	0,999645	0,508148	3,16126	152,3727
430	0,9283	1895	-0,224	0,7047	0,2929	0,2064	1,0412	0,7338	0,066479	0,047	1,039078	0,732255	4,555459	219,5731
440	0,7442	-1757	0,2074	0,9515	0,3082	0,2933	1,0454	0,9948	-0,13008	-0,124	1,037314	0,987033	6,140471	295,9707
450	0,6149	-4934	0,5823	1,1971	0,3134	0,3752	1,0469	1,2533	-0,31342	-0,375	0,998899	1,195821	7,439373	358,5778
460	0,5223	-7513	0,8865	1,4088	0,3082	0,4342	1,0454	1,4728	-0,47701	-0,672	0,930268	1,310581	8,153309	392,9895
470	0,4550	-9441	1,1141	1,5691	0,2929	0,4596	1,0412	1,6337	-0,61698	-0,968	0,838712	1,316009	8,187077	394,6171
480	0,4056	-10739	1,2672	1,6728	0,2683	0,4488	1,0348	1,731	-0,73204	-1,225	0,731358	1,223435	7,611159	366,8579
490	0,3693	-11486	1,3553	1,7246	0,2355	0,4062	1,027	1,7712	-0,82298	-1,419	0,614368	1,059548	6,591599	317,7151
500	0,3428	-11805	1,393	1,7358	0,1961	0,3403	1,0189	1,7685	-0,89194	-1,548	0,492477	0,854835	5,318048	256,3299
510	0,2428	-11842	1,3974	1,6402	0,1514	0,2483	1,0113	1,6588	-0,94166	-1,544	0,368864	0,605	3,76379	181,4147
520	0,1428	-11742	1,3856	1,5284	0,1029	0,1573	1,0053	1,5365	-0,97488	-1,49	0,24529	0,374901	2,332309	112,4173
530	0,1328	-11628	1,3721	1,5049	0,0521	0,0783	1,0014	1,5069	-0,99385	-1,496	0,122382	0,184171	1,145752	55,22525

540	0,0328	-11580	1,3664	1,3992	1E-16	2E-16	1	1,3992	-1	-1,399	3,68E-16	5,14E-16	3,2E-15	1,54E-13
550	0,0228	-11627	1,3719	1,3947	-0,052	-0,073	1,0014	1,3966	-0,99385	-1,386	-0,12238	-0,17069	-1,06189	-51,1832
560	0,0128	-11740	1,3853	1,3981	-0,103	-0,144	1,0053	1,4055	-0,97488	-1,363	-0,24529	-0,34294	-2,13349	-102,834
570	0,0128	-11838	1,3969	1,4097	-0,151	-0,213	1,0113	1,4257	-0,94166	-1,327	-0,36886	-0,52	-3,23499	-155,927
580	0,0128	-11800	1,3924	1,4052	-0,196	-0,276	1,0189	1,4317	-0,89194	-1,253	-0,49248	-0,69203	-4,30522	-207,511
590	0,0128	-11480	1,3546	1,3674	-0,236	-0,322	1,027	1,4043	-0,82298	-1,125	-0,61437	-0,84009	-5,22635	-251,91
600	0,0128	-10732	1,2664	1,2792	-0,268	-0,343	1,0348	1,3236	-0,73204	-0,936	-0,73136	-0,93552	-5,82	-280,524
610	0,0128	-9433	1,1131	1,1259	-0,293	-0,33	1,0412	1,1723	-0,61698	-0,695	-0,83871	-0,94428	-5,87449	-283,15
620	0,0128	-7503	0,8854	0,8981	-0,308	-0,277	1,0454	0,939	-0,47701	-0,428	-0,93027	-0,83552	-5,19788	-250,538
630	0,0128	-4923	0,5809	0,5937	-0,313	-0,186	1,0469	0,6216	-0,31342	-0,186	-0,9989	-0,59309	-3,68967	-177,842
640	0,0128	-1745	0,2059	0,2187	-0,308	-0,067	1,0454	0,2286	-0,13008	-0,028	-1,03731	-0,22686	-1,41134	-68,0266
650	0,0128	1908	-0,225	-0,2124	-0,293	0,0622	1,0412	-0,221	0,066479	-0,014	-1,03908	0,220686	1,372916	66,17453
660	0,0128	5848	-0,69	-0,6773	-0,268	0,1817	1,0348	-0,701	0,267354	-0,181	-0,99964	0,677011	4,211783	203,0079
670	0,0128	9835	-1,161	-1,1477	-0,236	0,2703	1,027	-1,179	0,462126	-0,53	-0,91716	1,052642	6,548632	315,644
680	0,0128	13602	-1,605	-1,5922	-0,196	0,3122	1,0189	-1,622	0,639878	-1,019	-0,79287	1,262442	7,853829	378,5546
690	0,0128	16879	-1,992	-1,979	-0,151	0,2996	1,0113	-2,001	0,790277	-1,564	-0,63107	1,248878	7,769447	374,4873
700	0,0128	19421	-2,292	-2,2789	-0,103	0,2346	1,0053	-2,291	0,904474	-2,061	-0,43874	0,999861	6,220277	299,8174
710	0,0128	21032	-2,482	-2,4689	-0,052	0,1285	1,0014	-2,472	0,975767	-2,409	-0,22491	0,555298	3,454586	166,5111
720	0,0128	21583	-2,547	-2,534	-1E-16	4E-16	1	-2,534	1	-2,534	-4,9E-16	1,24E-15	7,73E-15	3,72E-13

Таблица В2 – Суммирование значений крутящих моментов всех четырех цилиндров.

φ°	Цилиндры								$M_{кр},$ Нм
	1-й		2-й		3-й		4-й		
	φ° кривошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	φ° кривошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	φ° кривошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	φ° кривошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	
0	0	0	180	2E-14	360	5,5E-14	540	-2E-14	0
10	10	-56,71	190	-17,61	370	-18,331	550	53,207	-39,45
20	20	-102,8	200	-35,58	380	-36,646	560	122,81	-52,23
30	30	-129	210	-53,78	390	-55,279	570	123,56	-114,5
40	40	-131,5	220	-71,23	400	-73,107	580	92,97	-182,9
50	50	-111,3	230	-85,69	410	-88,143	590	77,828	-207,3
60	60	-74,07	240	-95,25	420	-97,459	600	81,499	-185,3
70	70	-28,22	250	-96,23	430	-97,65	610	98,382	-123,7
80	80	17,408	260	-85,84	440	-85,703	620	119,74	-34,4
90	90	55,524	270	-62,88	450	-60,157	630	137,64	70,128
100	100	80,387	280	-28,84	460	-22,208	640	146,9	176,24
110	110	92,846	290	11,459	470	23,6824	650	145,64	273,63
120	120	93,261	300	50,251	480	70,1018	660	134,71	348,32
130	130	84,609	310	78,294	490	108,031	670	116,6	387,53
140	140	70,334	320	87,447	500	128,972	680	94,261	381,01
150	150	53,247	330	74,266	510	127,234	690	66,34	321,09
160	160	35,325	340	44,027	520	101,694	700	40,808	221,85
170	170	17,544	350	9,8802	530	56,4266	710	20,09	103,94
180	180	2E-14	360	-2E-14	540	1,3E-13	720	5E-14	2E-13

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	-9,2699373	-16,7152	16,7152	-28,6962	28,69619
10	-2,02549	-8,8628217	-16,3081	16,4334	-28,2891	28,3615
20	-3,671936	-7,6413562	-15,0867	15,5271	-27,0676	27,31554
30	-4,607413	-5,8343151	-13,2796	14,0562	-25,2606	25,67732
40	-4,696609	-3,8450849	-11,2904	12,2283	-23,2713	23,74054
50	-3,975604	-2,0453594	-9,49066	10,2897	-21,4716	21,83657
60	-2,645415	-0,734796	-8,1801	8,5972	-20,1611	20,33387
70	-1,007703	-0,0750842	-7,52039	7,5876	-19,5013	19,52736
80	0,621697	-0,0710036	-7,51631	7,5420	-19,4973	19,50717
90	1,983002	-0,597863	-8,04317	8,2840	-20,0241	20,12207
100	2,870949	-1,4323712	-8,87768	9,3304	-20,8586	21,05528
110	3,31593	-2,38614	-9,83145	10,3756	-21,8124	22,063
120	3,330762	-3,2704718	-10,7158	11,2215	-22,6967	22,93982
130	3,021762	-3,9774469	-11,4228	11,8157	-23,4037	23,59797
140	2,511913	-4,4748999	-11,9202	12,1820	-23,9012	24,03279
150	1,901682	-4,7783464	-12,2237	12,3707	-24,2046	24,27919
160	1,261609	-4,9372089	-12,3825	12,4466	-24,3635	24,39611
170	0,626562	-5,0112077	-12,4565	12,4723	-24,4375	24,44549
180	6,17E-16	-5,0370272	-12,4823	12,4823	-24,4633	24,46328
190	-0,628846	-5,0294726	-12,4748	12,4906	-24,4557	24,46381
200	-1,270756	-4,9730071	-12,4183	12,4832	-24,3993	24,43233
210	-1,920574	-4,8258161	-12,2711	12,4205	-24,2521	24,328
220	-2,543966	-4,532	-11,9773	12,2445	-23,9583	24,09294
230	-3,060339	-4,0282243	-11,4735	11,8747	-23,4545	23,65329
240	-3,401784	-3,3402088	-10,7855	11,3093	-22,7665	23,01921
250	-3,436956	-2,4732297	-9,91853	10,4971	-21,8995	22,16755
260	-3,065871	-1,5296212	-8,97493	9,4841	-20,9559	21,17896
270	-2,245623	-0,6770417	-8,12235	8,4271	-20,1033	20,22833
280	-1,029997	-0,1176353	-7,56294	7,6328	-19,5439	19,57101
290	0,409253	-0,0304936	-7,4758	7,4870	-19,4567	19,46105
300	1,794686	-0,4984957	-7,9438	8,1440	-19,9248	20,00542
310	2,796212	-1,4385885	-8,88389	9,3136	-20,8648	21,05138
320	3,123111	-2,5568723	-10,0022	10,4784	-21,9831	22,20387
330	2,65236	-3,3586539	-10,804	11,1248	-22,7849	22,93877
340	1,572402	-3,2721922	-10,7175	10,8322	-22,6984	22,75285
350	0,352864	-1,5440059	-8,98931	8,9962	-20,9703	20,97323
360	-7,13E-16	2,91157048	-4,53373	4,5337	-16,5147	16,51469
363	1,900237	8,31476095	0,869456	2,0897	-11,1115	11,27281
370	4,386138	9,12762195	1,682317	4,6977	-10,2986	11,19375
380	4,412768	5,5878387	-1,85747	4,7878	-13,8384	14,52496
390	3,320355	2,71835406	-4,72695	5,7766	-16,7079	17,03463
400	2,779562	1,43002286	-6,01528	6,6264	-17,9962	18,20962
410	2,910675	0,80847497	-6,63683	7,2470	-18,6178	18,84393
420	3,513629	0,26180141	-7,1835	7,9968	-19,1645	19,48389
430	4,276522	-0,4884187	-7,93372	9,0129	-19,9147	20,36867
440	4,915647	-1,4820373	-8,92734	10,1912	-20,9083	21,47837
450	5,246361	-2,6175094	-10,0628	11,3483	-22,0438	22,65948
460	5,201359	-3,7428928	-11,1882	12,3381	-23,1691	23,74581

470	4,811055	-4,723971	-12,1693	13,0858	-24,1502	24,62478
480	4,164218	-5,4812241	-12,9265	13,5807	-24,9075	25,25318
490	3,36648	-5,9972844	-13,4426	13,8577	-25,4235	25,64546
500	2,369281	-5,9532807	-13,3986	13,6065	-25,3795	25,48989
510	1,457439	-5,7035752	-13,1489	13,2294	-25,1298	25,17206
520	0,71749	-5,7384413	-13,1837	13,2033	-25,1647	25,17492
530	1,95E-15	-5,3002099	-12,7455	12,7455	-24,7265	24,72647
540	-0,654688	-5,2361558	-12,6815	12,6983	-24,6624	24,6711
550	-1,308791	-5,1218536	-12,5672	12,6351	-24,5481	24,58297
560	-1,974267	-4,9607313	-12,406	12,5621	-24,387	24,46677
570	-2,610963	-4,6513532	-12,0967	12,3752	-24,0776	24,21876
580	-3,147952	-4,1435472	-11,5889	12,0088	-23,5698	23,77909
590	-3,480679	-3,4176759	-10,863	11,4070	-22,8439	23,10758
600	-3,487488	-2,5095926	-9,9549	10,5481	-21,9358	22,21135
610	-3,060819	-1,5271008	-8,97241	9,4801	-20,9534	21,17574
620	-2,148458	-0,647747	-8,09305	8,3734	-20,074	20,18865
630	-0,793159	-0,0905861	-7,53589	7,5775	-19,5168	19,53295
640	0,845801	-0,0630209	-7,50833	7,5558	-19,4893	19,50762
650	2,503635	-0,6954148	-8,14072	8,5170	-20,1217	20,27683
660	3,858267	-1,9849925	-9,4303	10,1891	-21,4112	21,7561
670	4,606132	-3,7710124	-11,2163	12,1253	-23,1973	23,65015
680	4,544085	-5,7541235	-13,1994	13,9597	-25,1804	25,58711
690	3,631928	-7,5580987	-15,0034	15,4367	-26,9844	27,22768
700	2,015237	-8,8179605	-16,2633	16,3876	-28,2442	28,31602
710	4,54E-15	-9,2699373	-16,7152	16,7152	-28,6962	28,69619
720	0	0	-7,44531	7,4453	-19,4263	19,42626

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}	16179,9	16179,9	16179,9	0	0	0	0	0	0	0	16179,9	16179,9
R _{ш.ш 10}	15902,3	15902,3	15902,3	0	0	0	0	0	0	0	15902,3	15902,3
R _{ш.ш 20}	15007,5	15007,5	15007,5	0	0	0	0	0	0	0	15007,5	15007,5
R _{ш.ш 30}	13551,6	13551,6	13551,6	0	0	0	0	0	0	0	0	13551,6
R _{ш.ш 40}	11735,8	11735,8	11735,8	0	0	0	0	0	0	0	0	11735,8
R _{ш.ш 50}	9798,11	9798,11	9798,11	0	0	0	0	0	0	0	0	9798,11
R _{ш.ш 60}	8089,52	8089,52	8089,52	0	0	0	0	0	0	0	0	8089,52
R _{ш.ш 70}	7057,35	7057,35	7057,35	0	0	0	0	0	0	0	7057,35	7057,35
R _{ш.ш 80}	7008,58	7008,58	7008,58	0	0	0	0	0	0	0	7008,58	7008,58
R _{ш.ш 90}	7765,28	7765,28	0	0	0	0	0	0	0	0	7765,28	7765,28
R _{ш.ш 100}	8822,51	8822,51	0	0	0	0	0	0	0	0	8822,51	8822,51
R _{ш.ш 110}	9869,79	9869,79	0	0	0	0	0	0	0	0	9869,79	9869,79
R _{ш.ш 120}	10711,4	10711,4	0	0	0	0	0	0	0	0	10711,4	10711,4
R _{ш.ш 130}	11299	11299	0	0	0	0	0	0	0	0	11299	11299
R _{ш.ш 140}	11658,7	11658,7	0	0	0	0	0	0	0	0	11658,7	11658,7
R _{ш.ш 150}	11842	11842	0	0	0	0	0	0	0	0	11842	11842
R _{ш.ш 160}	11914,1	11914,1	11914,1	0	0	0	0	0	0	0	11914,1	11914,1
R _{ш.ш 170}	11937,6	11937,6	11937,6	0	0	0	0	0	0	0	11937,6	11937,6
R _{ш.ш 180}	11947	11947	11947	0	0	0	0	0	0	0	11947	11947
R _{ш.ш 190}	11956	11956	11956	0	0	0	0	0	0	0	11956	11956
R _{ш.ш 200}	11950,7	11950,7	11950,7	0	0	0	0	0	0	0	11950,7	11950,7
R _{ш.ш 210}	11891,9	11891,9	11891,9	0	0	0	0	0	0	0	0	11891,9
R _{ш.ш 220}	11721,3	11721,3	11721,3	0	0	0	0	0	0	0	0	11721,3
R _{ш.ш 230}	11358,2	11358,2	11358,2	0	0	0	0	0	0	0	0	11358,2
R _{ш.ш 240}	10799,9	10799,9	10799,9	0	0	0	0	0	0	0	0	10799,9
R _{ш.ш 250}	9992,83	9992,83	9992,83	0	0	0	0	0	0	0	0	9992,83
R _{ш.ш 260}	8979,2	8979,2	8979,2	0	0	0	0	0	0	0	0	8979,2
R _{ш.ш 270}	7912,35	7912,35	7912,35	0	0	0	0	0	0	0	0	7912,35
R _{ш.ш 280}	7102,67	7102,67	7102,67	0	0	0	0	0	0	0	7102,67	7102,67

R _{III.III} 290	6952,5	6952,5	6952,5	0	0	0	0	0	0	0	6952,5	6952,5
R _{III.III} 300	7622,73	7622,73	0	0	0	0	0	0	0	0	7622,73	7622,73
R _{III.III} 310	8804,37	8804,37	0	0	0	0	0	0	0	0	8804,37	8804,37
R _{III.III} 320	9968,68	9968,68	0	0	0	0	0	0	0	0	9968,68	9968,68
R _{III.III} 330	10605,6	10605,6	0	0	0	0	0	0	0	0	10605,6	10605,6
R _{III.III} 340	10302,8	10302,8	10302,8	0	0	0	0	0	0	0	10302,8	10302,8
R _{III.III} 350	8461,32	8461,32	8461,32	0	0	0	0	0	0	0	8461,32	8461,32
R _{III.III} 360	3998,38	3998,38	3998,38	0	0	0	0	0	0	0	3998,38	3998,38
R _{III.III} 370	2363,13	2363,13	2363,13	0	0	0	0	0	0	0	2363,13	2363,13
R _{III.III} 380	4914,9	4914,9	4914,9	0	0	4914,903	4914,9	4914,9	0	0	4914,9	4914,9
R _{III.III} 390	0	0	0	0	0	0	0	0	4606,57	4606,57	4606,57	4606,57
R _{III.III} 400	5347,36	5347,36	0	0	0	0	0	0	0	0	5347,36	5347,36
R _{III.III} 410	6144,56	6144,56	0	0	0	0	0	0	0	0	6144,56	6144,56
R _{III.III} 420	6760,18	6760,18	0	0	0	0	0	0	0	0	6760,18	6760,18
R _{III.III} 430	7519,54	7519,54	0	0	0	0	0	0	0	0	7519,54	7519,54
R _{III.III} 440	8545,44	8545,44	0	0	0	0	0	0	0	0	8545,44	8545,44
R _{III.III} 450	9725,69	0	0	0	0	0	0	0	0	9725,69	9725,69	9725,69
R _{III.III} 460	10876,4	10876,4	0	0	0	0	0	0	0	0	10876,4	10876,4
R _{III.III} 470	11854,8	11854,8	0	0	0	0	0	0	0	0	11854,8	11854,8
R _{III.III} 480	12589,5	12589,5	0	0	0	0	0	0	0	0	12589,5	12589,5
R _{III.III} 490	13072,2	13072,2	0	0	0	0	0	0	0	0	13072,2	13072,2
R _{III.III} 500	13339	13339	0	0	0	0	0	0	0	0	13339	13339
R _{III.III} 510	13079,6	13079,6	0	0	0	0	0	0	0	0	13079,6	13079,6
R _{III.III} 520	12697,4	12697,4	12697,4	0	0	0	0	0	0	0	12697,4	12697,4
R _{III.III} 530	12668,7	12668,7	12668,7	0	0	0	0	0	0	0	12668,7	12668,7
R _{III.III} 540	12210,2	12210,2	12210,2	0	0	0	0	0	0	0	12210,2	12210,2
R _{III.III} 550	12163,7	12163,7	12163,7	0	0	0	0	0	0	0	12163,7	12163,7
R _{III.III} 560	12102,8	12102,8	12102,8	0	0	0	0	0	0	0	12102,8	12102,8
R _{III.III} 570	12033,7	12033,7	12033,7	0	0	0	0	0	0	0	0	12033,7
R _{III.III} 580	11852,5	11852,5	11852,5	0	0	0	0	0	0	0	0	11852,5
R _{III.III} 590	11493	11493	11493	0	0	0	0	0	0	0	0	11493
R _{III.III} 600	10898,4	10898,4	10898,4	0	0	0	0	0	0	0	0	10898,4

R _{ш.ш 610}	10044,4	10044,4	10044,4	0	0	0	0	0	0	0	0	10044,4
R _{ш.ш 620}	8975,1	8975,1	8975,1	0	0	0	0	0	0	0	0	8975,1
R _{ш.ш 630}	7857,14	7857,14	7857,14	0	0	0	0	0	0	0	0	7857,14
R _{ш.ш 640}	7045,33	7045,33	7045,33	0	0	0	0	0	0	0	7045,33	7045,33
R _{ш.ш 650}	7024,08	7024,08	7024,08	0	0	0	0	0	0	0	7024,08	7024,08
R _{ш.ш 660}	8006,86	8006,86	0	0	0	0	0	0	0	0	8006,86	8006,86
R _{ш.ш 670}	9695,68	9695,68	0	0	0	0	0	0	0	0	9695,68	9695,68
R _{ш.ш 680}	11631,8	11631,8	0	0	0	0	0	0	0	0	11631,8	11631,8
R _{ш.ш 690}	13454,6	13454,6	0	0	0	0	0	0	0	0	13454,6	13454,6
R _{ш.ш 700}	14916,9	14916,9	0	0	0	0	0	0	0	0	14916,9	14916,9
R _{ш.ш 710}	15856,5	15856,5	0	0	0	0	0	0	0	0	15856,5	15856,5
ΣR _{ш.ш i}	16179,9	16179,9	0	0	0	0	0	0	0	0	16179,9	16179,9

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	K _{рк3} , Н
13734,8	0	27469,66	0	-27469,66	3,1E-13	2116,5	2116,46	180	6,2E-13	-23236,75	1,3E-12	-23368,34	23368,34	540	1,95E-12	-23499,94
13569,1	10	27138,24	-2025,49	-27062,55	698,322	1916,7	2039,93	190	-628,85	-23229,2	-641,767	-23332,54	23341,36	550	-654,688	-23435,88
13050,3	20	26100,66	-3671,94	-25841,08	1200,59	1334,2	1794,84	200	-1270,8	-23172,73	-1289,77	-23247,16	23282,91	560	-1308,79	-23321,58
12235,8	30	24471,69	-4607,41	-24034,04	1343,42	504,25	1434,94	210	-1920,6	-23025,54	-1947,42	-23093	23174,97	570	-1974,27	-23160,46
11269,8	40	22539,56	-4696,61	-22044,81	1076,32	-343,46	1129,79	220	-2544	-22731,73	-2577,46	-22791,4	22936,68	580	-2610,96	-22851,08
10315,9	50	20631,75	-3975,6	-20245,09	457,632	-991,43	1091,96	230	-3060,3	-22227,95	-3104,15	-22285,61	22500,76	590	-3147,95	-22343,27
9559,21	60	19118,43	-2645,42	-18934,52	-378,184	-1302,7	1356,49	240	-3401,8	-21539,93	-3441,23	-21578,67	21851,34	600	-3480,68	-21617,4
9151,29	70	18302,57	-1007,7	-18274,81	-1214,63	-1199,1	1706,78	250	-3437	-20672,96	-3462,22	-20691,14	20978,8	610	-3487,49	-20709,32
9140,65	80	18281,3	621,6973	-18270,73	-1843,78	-729,31	1982,78	260	-3065,9	-19729,35	-3063,34	-19728,09	19964,51	620	-3060,82	-19726,83
9450,95	90	18901,9	1983,002	-18797,59	-2114,31	-39,589	2114,68	270	-2245,6	-18876,77	-2197,04	-18862,12	18989,64	630	-2148,46	-18847,47
9920,45	100	19840,91	2870,949	-19632,1	-1950,47	657,37	2058,27	280	-1030	-18317,36	-911,578	-18303,84	18326,52	640	-793,159	-18290,31
10425,6	110	20851,22	3315,93	-20585,87	-1453,34	1177,8	1870,68	290	409,253	-18230,22	627,527	-18246,48	18257,27	650	845,8011	-18262,75

10863,5	120	21727,02	3330,762	-21470,2	-768,038	1386	1584,56	300	1794,69	-18698,22	2149,16	-18796,68	18919,15	660	2503,635	-18895,14
11191	130	22382,09	3021,762	-22177,17	-112,775	1269,4	1274,43	310	2796,21	-19638,31	3327,24	-19911,52	20187,6	670	3858,267	-20184,72
11406,7	140	22813,34	2511,913	-22674,63	305,599	959,01	1006,53	320	3123,11	-20756,6	3864,62	-21363,67	21710,4	680	4606,132	-21970,74
11528,3	150	23056,63	1901,682	-22978,07	375,339	709,85	802,97	330	2652,36	-21558,38	3598,22	-22756,11	23038,84	690	4544,085	-23953,85
11585,7	160	23171,31	1261,609	-23136,93	155,396	832,51	846,887	340	1572,4	-21471,92	2602,16	-23614,87	23757,81	700	3631,928	-25757,82
11609,7	170	23219,39	626,5621	-23210,93	-136,849	1733,6	1738,99	350	352,864	-19743,73	1184,05	-23380,71	23410,67	710	2015,237	-27017,69
11618,4	180	23236,75	6,17E-13	-23236,75	-6,7E-13	3974,3	3974,3	360	-7E-13	-15288,16	1,9E-12	-21378,91	21378,91	720	4,54E-12	-27469,66
11618,9	190	23237,71	-628,846	-23229,2	1264,54	6672,1	6790,89	370	1900,24	-9884,965	950,118	-18677,31	18701,46	0	0	-27469,66
11603,8	200	23207,55	-1270,76	-23172,73	2828,45	7050,3	7596,52	380	4386,14	-9072,104	1180,32	-18067,33	18105,84	10	-2025,49	-27062,55
11552,8	210	23105,5	-1920,57	-23025,54	3166,67	5206,8	6094,17	390	4412,77	-12611,89	370,416	-19226,48	19230,05	20	-3671,94	-25841,08
11436,8	220	22873,63	-2543,97	-22731,73	2932,16	3625,2	4662,56	400	3320,35	-15481,37	-643,529	-19757,71	19768,18	30	-4607,41	-24034,04
11218,8	230	22437,63	-3060,34	-22227,95	2919,95	2729,1	3996,78	410	2779,56	-16769,7	-958,523	-19407,26	19430,91	40	-4696,61	-22044,81
10903,5	240	21806,9	-3401,78	-21539,93	3156,23	2074,3	3776,86	420	2910,67	-17391,25	-532,464	-18818,17	18825,7	50	-3975,6	-20245,09
10478,4	250	20956,71	-3436,96	-20672,96	3475,29	1367,5	3734,67	430	3513,63	-17937,92	434,107	-18436,22	18441,33	60	-2645,42	-18934,52
9983,07	260	19966,14	-3065,87	-19729,35	3671,2	520,6	3707,93	440	4276,52	-18688,14	1634,41	-18481,48	18553,61	70	-1007,7	-18274,81
9504,94	270	19009,87	-2245,62	-18876,77	3580,63	-402,5	3603,19	450	4915,65	-19681,76	2768,67	-18976,25	19177,16	80	621,6973	-18270,73
9173,15	280	18346,3	-1030	-18317,36	3138,18	-1249,9	3377,94	460	5246,36	-20817,24	3614,68	-19807,41	20134,54	90	1983,002	-18797,59
9117,41	290	18234,81	409,2535	-18230,22	2396,05	-1856,2	3030,93	470	5201,36	-21942,62	4036,15	-20787,36	21175,57	100	2870,949	-19632,1
9392,08	300	18784,15	1794,686	-18698,22	1508,18	-2112,7	2595,82	480	4811,06	-22923,7	4063,49	-21754,78	22131,03	110	3315,93	-20585,87
9918,19	310	19836,39	2796,212	-19638,31	684,003	-2021,3	2133,91	490	4164,22	-23680,95	3747,49	-22575,57	22884,5	120	3330,762	-21470,2
10495,1	320	20990,24	3123,111	-20756,6	121,684	-1720,2	1724,5	500	3366,48	-24197,01	3194,12	-23187,09	23406,06	130	3021,762	-22177,17
10860,5	330	21720,93	2652,36	-21558,38	-141,539	-1297,3	1305,01	510	2369,28	-24153,01	2440,6	-23413,82	23540,67	140	2511,913	-22674,63
10764,7	340	21529,42	1572,402	-21471,92	-57,4813	-1215,7	1217,05	520	1457,44	-23903,3	1679,56	-23440,69	23500,78	150	1901,682	-22978,07
9873,44	350	19746,88	352,8637	-19743,73	182,313	-2097,2	2105,13	530	717,49	-23938,17	989,549	-23537,55	23558,34	160	1261,609	-23136,93
7644,08	360	15288,16	-7,1E-13	-15288,16	1,3E-12	-4105,9	4105,89	540	1,9E-12	-23499,94	313,281	-23355,43	23357,54	170	626,5621	-23210,93
5032,98	370	10065,95	1900,237	-9884,965	-1277,46	-6775,5	6894,83	550	-654,69	-23435,88	-327,344	-23336,32	23338,61	180	6,17E-13	-23236,75
5038,38	380	10076,77	4386,138	-9072,104	-2847,46	-7124,7	7672,68	560	-1308,8	-23321,58	-968,819	-23275,39	23295,54	190	-628,846	-23229,2
6680,8	390	13361,6	4412,768	-12611,89	-3193,52	-5274,3	6165,76	570	-1974,3	-23160,46	-1622,51	-23166,6	23223,34	200	-1270,76	-23172,73
7916,72	400	15833,43	3320,355	-15481,37	-2965,66	-3684,9	4730,04	580	-2611	-22851,08	-2265,77	-22938,31	23049,94	210	-1920,57	-23025,54

8499,25	410	16998,5	2779,562	-16769,7	-2963,76	-2786,8	4068,17	590	-3148	-22343,27	-2845,96	-22537,5	22716,48	220	-2543,97	-22731,73
8816,57	420	17633,14	2910,675	-17391,25	-3195,68	-2113,1	3831,11	600	-3480,7	-21617,4	-3270,51	-21922,68	22165,29	230	-3060,34	-22227,95
9139,4	430	18278,81	3513,629	-17937,92	-3500,56	-1385,7	3764,85	610	-3487,5	-20709,32	-3444,64	-21124,63	21403,63	240	-3401,78	-21539,93
9585,61	440	19171,21	4276,522	-18688,14	-3668,67	-519,34	3705,25	620	-3060,8	-19726,83	-3248,89	-20199,89	20459,49	250	-3436,96	-20672,96
10143,2	450	20286,33	4915,647	-19681,76	-3532,05	417,15	3556,6	630	-2148,5	-18847,47	-2607,16	-19288,41	19463,81	260	-3065,87	-19729,35
10734,1	460	21468,15	5246,361	-20817,24	-3019,76	1263,5	3273,42	640	-793,16	-18290,31	-1519,39	-18583,54	18645,55	270	-2245,62	-18876,77
11275,3	470	22550,67	5201,359	-21942,62	-2177,78	1839,9	2850,98	650	845,801	-18262,75	-92,098	-18290,05	18290,29	280	-1030	-18317,36
11711,6	480	23423,11	4811,055	-22923,7	-1153,71	2014,3	2321,28	660	2503,64	-18895,14	1456,44	-18562,68	18619,73	290	409,2535	-18230,22
12022,1	490	24044,29	4164,218	-23680,95	-152,975	1748,1	1754,8	670	3858,27	-20184,72	2826,48	-19441,47	19645,86	300	1794,686	-18698,22
12215	500	24430,07	3366,48	-24197,01	619,826	1113,1	1274,07	680	4606,13	-21970,74	3701,17	-20804,53	21131,19	310	2796,212	-19638,31
12134,5	510	24268,94	2369,281	-24153,01	1087,4	99,579	1091,95	690	4544,08	-23953,85	3833,6	-22355,22	22681,55	320	3123,111	-20756,6
11973,8	520	23947,69	1457,439	-23903,3	1087,24	-927,26	1428,96	700	3631,93	-25757,82	3142,14	-23658,1	23865,85	330	2652,36	-21558,38
11974,5	530	23948,92	717,4897	-23938,17	648,874	-1539,8	1670,9	710	2015,24	-27017,69	1793,82	-24244,8	24311,07	340	1572,402	-21471,92
11750	540	23499,94	1,95E-12	-23499,94	1,3E-12	-1984,9	1984,86	720	4,5E-12	-27469,66	176,432	-23606,7	23607,36	350	352,8637	-19743,73
11722,5	550	23445,02	-654,688	-23435,88	327,344	-2016,9	2043,28	0	0	-27469,66	-3,6E-13	-21378,91	21378,91	360	-7,1E-13	-15288,16
11679,1	560	23358,27	-1308,79	-23321,58	-358,349	-1870,5	1904,5	10	-2025,5	-27062,55	-62,6263	-18473,76	18473,86	370	1900,237	-9884,965
11622,2	570	23244,45	-1974,27	-23160,46	-848,834	-1340,3	1586,49	20	-3671,9	-25841,08	357,101	-17456,59	17460,25	380	4386,138	-9072,104
11499,9	580	22999,76	-2610,96	-22851,08	-998,225	-591,48	1160,3	30	-4607,4	-24034,04	-97,3224	-18322,96	18323,22	390	4412,768	-12611,89
11282	590	22563,94	-3147,95	-22343,27	-774,328	149,23	788,577	40	-4696,6	-22044,81	-688,127	-18763,09	18775,71	400	3320,355	-15481,37
10947,9	600	21895,83	-3480,68	-21617,4	-247,462	686,16	729,418	50	-3975,6	-20245,09	-598,021	-18507,39	18517,05	410	2779,562	-16769,7
10500,5	610	21000,92	-3487,49	-20709,32	421,036	887,4	982,215	60	-2645,4	-18934,52	132,63	-18162,89	18163,37	420	2910,675	-17391,25
9981,44	620	19962,87	-3060,82	-19726,83	1026,56	726,01	1257,34	70	-1007,7	-18274,81	1252,96	-18106,37	18149,67	430	3513,629	-17937,92
9484,77	630	18969,53	-2148,46	-18847,47	1385,08	288,37	1414,78	80	621,697	-18270,73	2449,11	-18479,44	18641,02	440	4276,522	-18688,14
9153,75	640	18307,5	-793,159	-18290,31	1388,08	-253,64	1411,06	90	1983	-18797,59	3449,32	-19239,68	19546,43	450	4915,647	-19681,76
9141,16	650	18282,32	845,8011	-18262,75	1012,57	-684,68	1222,33	100	2870,95	-19632,1	4058,66	-20224,67	20627,89	460	5246,361	-20817,24
9530,14	660	19060,29	2503,635	-18895,14	406,148	-845,36	937,867	110	3315,93	-20585,87	4258,64	-21264,24	21686,49	470	5201,359	-21942,62
10275,1	670	20550,16	3858,267	-20184,72	-263,753	-642,74	694,752	120	3330,76	-21470,2	4070,91	-22196,95	22567,16	480	4811,055	-22923,7
11224,2	680	22448,38	4606,132	-21970,74	-792,185	-103,22	798,881	130	3021,76	-22177,17	3592,99	-22929,06	23208,87	490	4164,218	-23680,95
12190,5	690	24381,05	4544,085	-23953,85	-1016,09	639,61	1200,64	140	2511,91	-22674,63	2939,2	-23435,82	23619,41	500	3366,48	-24197,01

13006,3	700	26012,62	3631,928	-25757,82	-865,123	1389,9	1637,13	150	1901,68	-22978,07	2135,48	-23565,54	23662,1	510	2369,281	-24153,01
13546,4	710	27092,74	2015,237	-27017,69	-376,814	1940,4	1976,63	160	1261,61	-23136,93	1359,52	-23520,12	23559,38	520	1457,439	-23903,3
13734,8	720	27469,66	4,54E-12	-27469,66	313,281	2129,4	2152,29	170	626,562	-23210,93	672,026	-23574,55	23584,13	530	717,4897	-23938,17

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

[illegible]

R _{к.ш} 310	22884,5	22884,5	0	0	0	0	0	0	0	0	22884,5	22884,5
R _{к.ш} 320	23406,06	23406,06	0	0	0	0	0	0	0	0	23406,1	23406,1
R _{к.ш} 330	23540,67	23540,67	0	0	0	0	0	0	0	0	23540,7	23540,7
R _{к.ш} 340	23500,78	23500,78	0	0	0	0	0	0	0	0	23500,8	23500,8
R _{к.ш} 350	23558,34	23558,34	0	0	0	0	0	0	0	0	23558,3	23558,3
R _{к.ш} 360	23357,54	23357,54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23357,5
R _{к.ш} 370	23338,61	23338,61	23338,6	23338,61325	0	0	0	0	0	0	0	0
R _{к.ш} 380	0	23295,54	23295,5	0	23295,54351	0	0	0	0	0	0	0
R _{к.ш} 390	0	0	0	0	0	0	0	0	23223,34336	23223,34336	23223,3	23223,3
R _{к.ш} 400	23049,94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23049,9	23049,9
R _{к.ш} 410	22716,48	22716,48	0	0	0	0	0	0	0	0	22716,5	22716,5
R _{к.ш} 420	22165,29	22165,29	0	0	0	0	0	0	0	0	22165,3	22165,3
R _{к.ш} 430	21403,63	21403,63	0	0	0	0	0	0	0	0	21403,6	21403,6
R _{к.ш} 440	20459,49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20459,5	20459,5
R _{к.ш} 450	19463,81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19463,8	19463,8
R _{к.ш} 460	18645,55	18645,55	0	0	0	0	0	0	0	0	18645,5	18645,5
R _{к.ш} 470	18290,29	18290,29	0	0	0	0	0	0	0	0	18290,3	18290,3
R _{к.ш} 480	18619,73	18619,73	0	0	0	0	0	0	0	0	18619,7	18619,7
R _{к.ш} 490	19645,86	19645,86	0	0	0	0	0	0	0	0	19645,9	19645,9
R _{к.ш} 500	21131,19	21131,19	0	0	0	0	0	0	0	0	21131,2	21131,2
R _{к.ш} 510	22681,55	22681,55	0	0	0	0	0	0	0	0	22681,5	22681,5
R _{к.ш} 520	23865,85	23865,85	0	0	0	0	0	0	0	0	23865,9	23865,9
R _{к.ш} 530	24311,07	24311,07	0	0	0	0	0	0	0	0	24311,1	24311,1
R _{к.ш} 540	23607,36	23607,36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23607,4
R _{к.ш} 550	21378,91	21378,91	21378,9	0	0	0	0	0	0	0	0	21378,9
R _{к.ш} 560	18473,86	18473,86	18473,9	0	0	0	0	0	0	0	0	18473,9
R _{к.ш} 570	17460,25	17460,25	17460,2	0	0	0	0	0	0	0	0	17460,2
R _{к.ш} 580	18323,22	18323,22	18323,2	0	0	0	0	0	0	0	0	18323,2
R _{к.ш} 590	18775,71	18775,71	18775,7	0	0	0	0	0	0	0	0	18775,7
R _{к.ш} 600	18517,05	18517,05	18517,1	0	0	0	0	0	0	0	0	18517,1
R _{к.ш} 610	18163,37	18163,37	18163,4	0	0	0	0	0	0	0	0	18163,4
R _{к.ш} 620	18149,67	18149,67	18149,7	0	0	0	0	0	0	0	0	18149,7
R _{к.ш} 630	18641,02	18641,02	18641	0	0	0	0	0	0	0	0	18641
R _{к.ш} 640	19546,43	19546,43	19546,4	0	0	0	0	0	0	0	0	19546,4
R _{к.ш} 650	20627,89	20627,89	0	0	0	0	0	0	0	0	20627,9	20627,9
R _{к.ш} 660	21686,49	21686,49	0	0	0	0	0	0	0	0	21686,5	21686,5

R _{к.ш 670}	22567,16	22567,16	0	0	0	0	0	0	0	0	22567,2	22567,2
R _{к.ш 680}	23208,87	23208,87	0	0	0	0	0	0	0	0	23208,9	23208,9
R _{к.ш 690}	23619,41	23619,41	0	0	0	0	0	0	0	0	23619,4	23619,4
R _{к.ш 700}	23662,1	23662,1	0	0	0	0	0	0	0	0	23662,1	23662,1
R _{к.ш 710}	23559,38	23559,38	0	0	0	0	0	0	0	0	23559,4	23559,4
ΣR _{к.ш i}	23584,13	23584,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23584,1

Таблица Г5 - 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}	13734,83163	13734,83163	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13734,83163
R _{к.ш 10}	13569,12023	13569,12023	13569,12023	0	0	0	0	0	0	0	0	13569,12023
R _{к.ш 20}	13050,33182	13050,33182	13050,33182	0	0	0	0	0	0	0	0	13050,33182
R _{к.ш 30}	12235,84267	12235,84267	12235,84267	0	0	0	0	0	0	0	0	12235,84267
R _{к.ш 40}	11269,78061	11269,78061	11269,78061	0	0	0	0	0	0	0	0	11269,78061
R _{к.ш 50}	10315,87257	10315,87257	10315,87257	0	0	0	0	0	0	0	0	10315,87257
R _{к.ш 60}	9559,214726	9559,214726	9559,214726	0	0	0	0	0	0	0	0	9559,214726
R _{к.ш 70}	9151,286154	9151,286154	9151,286154	0	0	0	0	0	0	0	0	9151,286154
R _{к.ш 80}	9140,651889	9140,651889	0	0	0	0	0	0	0	0	9140,651889	9140,651889
R _{к.ш 90}	9450,94772	9450,94772	0	0	0	0	0	0	0	0	9450,94772	9450,94772
R _{к.ш 100}	9920,453492	9920,453492	0	0	0	0	0	0	0	0	9920,453492	9920,453492
R _{к.ш 110}	10425,60875	10425,60875	0	0	0	0	0	0	0	0	10425,60875	10425,60875
R _{к.ш 120}	10863,50959	10863,50959	0	0	0	0	0	0	0	0	10863,50959	10863,50959
R _{к.ш 130}	11191,046	11191,046	0	0	0	0	0	0	0	0	11191,046	11191,046
R _{к.ш 140}	11406,66876	11406,66876	0	0	0	0	0	0	0	0	11406,66876	11406,66876
R _{к.ш 150}	11528,31518	11528,31518	0	0	0	0	0	0	0	0	11528,31518	11528,31518
R _{к.ш 160}	11585,65288	11585,65288	0	0	0	0	0	0	0	0	11585,65288	11585,65288
R _{к.ш 170}	11609,69447	11609,69447	0	0	0	0	0	0	0	0	11609,69447	11609,69447
R _{к.ш 180}	11618,37659	11618,37659	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11618,37659
R _{к.ш 190}	11618,85445	11618,85445	11618,85445	0	0	0	0	0	0	0	0	11618,85445
R _{к.ш 200}	11603,77504	11603,77504	11603,77504	0	0	0	0	0	0	0	0	11603,77504
R _{к.ш 210}	11552,75069	11552,75069	11552,75069	0	0	0	0	0	0	0	0	11552,75069
R _{к.ш 220}	11436,81696	11436,81696	11436,81696	0	0	0	0	0	0	0	0	11436,81696
R _{к.ш 230}	11218,81729	11218,81729	11218,81729	0	0	0	0	0	0	0	0	11218,81729
R _{к.ш 240}	10903,45044	10903,45044	10903,45044	0	0	0	0	0	0	0	0	10903,45044
R _{к.ш 250}	10478,3558	10478,3558	10478,3558	0	0	0	0	0	0	0	0	10478,3558
R _{к.ш 260}	9983,069435	9983,069435	9983,069435	0	0	0	0	0	0	0	0	9983,069435
R _{к.ш 270}	9504,935315	9504,935315	9504,935315	0	0	0	0	0	0	0	0	9504,935315
R _{к.ш 280}	9173,148543	9173,148543	9173,148543	0	0	0	0	0	0	0	0	9173,148543
R _{к.ш 290}	9117,406342	9117,406342	0	0	0	0	0	0	0	0	9117,406342	9117,406342

R _{K,III} 300	9392,076317	9392,076317	0	0	0	0	0	0	0	0	9392,076317	9392,076317
R _{K,III} 310	9918,192806	9918,192806	0	0	0	0	0	0	0	0	9918,192806	9918,192806
R _{K,III} 320	10495,12025	10495,12025	0	0	0	0	0	0	0	0	10495,12025	10495,12025
R _{K,III} 330	10860,46447	10860,46447	0	0	0	0	0	0	0	0	10860,46447	10860,46447
R _{K,III} 340	10764,70756	10764,70756	0	0	0	0	0	0	0	0	10764,70756	10764,70756
R _{K,III} 350	9873,44244	9873,44244	0	0	0	0	0	0	0	0	9873,44244	9873,44244
R _{K,III} 360	7644,077746	7644,077746	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7644,077746
R _{K,III} 370	5032,977103	5032,977103	5032,977103	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R _{K,III} 380	0	5038,384718	5038,384718	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R _{K,III} 390	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6680,797507	6680,797507
R _{K,III} 400	7916,716972	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7916,716972	7916,716972
R _{K,III} 410	8499,248644	8499,248644	0	0	0	0	0	0	0	0	8499,248644	8499,248644
R _{K,III} 420	8816,570184	8816,570184	0	0	0	0	0	0	0	0	8816,570184	8816,570184
R _{K,III} 430	9139,402688	9139,402688	0	0	0	0	0	0	0	0	9139,402688	9139,402688
R _{K,III} 440	9585,606292	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9585,606292	9585,606292
R _{K,III} 450	10143,16748	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10143,16748	10143,16748
R _{K,III} 460	10734,07654	10734,07654	0	0	0	0	0	0	0	0	10734,07654	10734,07654
R _{K,III} 470	11275,33435	11275,33435	0	0	0	0	0	0	0	0	11275,33435	11275,33435
R _{K,III} 480	11711,55559	11711,55559	0	0	0	0	0	0	0	0	11711,55559	11711,55559
R _{K,III} 490	12022,14732	12022,14732	0	0	0	0	0	0	0	0	12022,14732	12022,14732
R _{K,III} 500	12215,03677	12215,03677	0	0	0	0	0	0	0	0	12215,03677	12215,03677
R _{K,III} 510	12134,46771	12134,46771	0	0	0	0	0	0	0	0	12134,46771	12134,46771
R _{K,III} 520	11973,84582	11973,84582	0	0	0	0	0	0	0	0	11973,84582	11973,84582
R _{K,III} 530	11974,45868	11974,45868	0	0	0	0	0	0	0	0	11974,45868	11974,45868
R _{K,III} 540	11749,96792	11749,96792	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11749,96792
R _{K,III} 550	11722,51224	11722,51224	11722,51224	0	0	0	0	0	0	0	0	11722,51224
R _{K,III} 560	11679,13748	11679,13748	11679,13748	0	0	0	0	0	0	0	0	11679,13748
R _{K,III} 570	11622,22561	11622,22561	11622,22561	0	0	0	0	0	0	0	0	11622,22561
R _{K,III} 580	11499,87983	11499,87983	11499,87983	0	0	0	0	0	0	0	0	11499,87983
R _{K,III} 590	11281,97079	11281,97079	11281,97079	0	0	0	0	0	0	0	0	11281,97079
R _{K,III} 600	10947,91294	10947,91294	10947,91294	0	0	0	0	0	0	0	0	10947,91294
R _{K,III} 610	10500,45771	10500,45771	10500,45771	0	0	0	0	0	0	0	0	10500,45771
R _{K,III} 620	9981,436586	9981,436586	9981,436586	0	0	0	0	0	0	0	0	9981,436586
R _{K,III} 630	9484,765565	9484,765565	9484,765565	0	0	0	0	0	0	0	0	9484,765565
R _{K,III} 640	9153,750829	9153,750829	9153,750829	0	0	0	0	0	0	0	0	9153,750829
R _{K,III} 650	9141,161051	9141,161051	0	0	0	0	0	0	0	0	9141,161051	9141,161051
R _{K,III} 660	9530,143399	9530,143399	0	0	0	0	0	0	0	0	9530,143399	9530,143399
R _{K,III} 670	10275,08012	10275,08012	0	0	0	0	0	0	0	0	10275,08012	10275,08012
R _{K,III} 680	11224,19037	11224,19037	0	0	0	0	0	0	0	0	11224,19037	11224,19037
R _{K,III} 690	12190,52512	12190,52512	0	0	0	0	0	0	0	0	12190,52512	12190,52512
R _{K,III} 700	13006,31034	13006,31034	0	0	0	0	0	0	0	0	13006,31034	13006,31034
R _{K,III} 710	13546,37002	13546,37002	0	0	0	0	0	0	0	0	13546,37002	13546,37002
ΣR _{K,III} i	13734,83163	13734,83163	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13734,83163

Форм.	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
				<u>Документация</u>		
A4			16.БР.ЭМСУ.005.000.ПЗ	Пояснительная записка	1	
A1			16.БР.ЭМСУ.005.000.СБ	Сборочный чертеж	2	
				<u>Сборочные единицы</u>		
	5		16.БР.ЭМСУ.005.00.005	Насос водяной	1	
	9		16.БР.ЭМСУ.005.00.009	Форсунка	4	
	18		16.БР.ЭМСУ.005.00.018	Масляный насос	1	
	11		16.БР.ЭМСУ.005.00.011	Фильтр масляный	1	
	6		16.БР.ЭМСУ.005.00.006	Поршень в сборе	4	
				<u>Детали</u>		
	3		16.БР.ЭМСУ.005.00.003	Шкив привода генератора	1	
	8		16.БР.ЭМСУ.005.00.008	Коленчатый вал	1	
	4		16.БР.ЭМСУ.005.00.004	Маховик	1	
	7		16.БР.ЭМСУ.005.00.007	Шатун	4	
	1		16.БР.ЭМСУ.005.00.001	Блок цилиндров	1	
	10		16.БР.ЭМСУ.005.00.010	Поддон	1	
	15		16.БР.ЭМСУ.005.00.015	Головка блока	1	
	17		16.БР.ЭМСУ.005.00.017	Кожух ГРМ	1	
	14		16.БР.ЭМСУ.005.00.014	Коллектор впускной	1	
				16.БР.ЭМСУ.005.00.000		
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		
Разработ.		Иванов Н.Э.			Литера	Лист
Проверил		Смоленский В.В.			1	2
Н. контр.		Смоленский В.В.				
Утвердил		Павлов Д.А.				
					Продольный и поперечный разрез двигателя	
					ТГУ ЭМСбз-1131	

[illegible]