

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

Институт энергетики и электротехники

(институт, факультет)

Энергетические машины и системы управления

(кафедра)

13.03.03 (141100.62) «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

## **БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему Бензиновый двигатель с перспективным рабочим процессом

Студент(ка)

Кудашов Игорь Дмитриевич

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультант

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Нормоконтроль

А.Г. Егоров

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

**Допустить к защите**

Зав. кафедрой «ЭМСУ»

к.т.н., Д.А. Павлов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Тольятти 2016

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

Институт энергетики и электротехники

(институт, факультет)

Энергетические машины и системы управления

(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой «ЭМСУ» \_\_\_\_\_

(подпись)

Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_

2016 г.

## ЗАДАНИЕ

### на выполнение бакалаврской работы

Студент Кудашов Игорь Дмитриевич

1. Тема проекта Бензиновый двигатель с перспективным рабочим процессом

2. Срок сдачи студентом законченного проекта 16-18 июня 2016 года,  
согласно утвержденному графику защиты ВКР на 2015-2016 уч. год.

3. Исходные данные к проекту  $V_L = 1.5$  л;  $n_N = 5600$  мин<sup>-1</sup>;  $i = 4$ ;  $\tau = 4$ ;  $\varepsilon = 28$ ,  
для скоростных режимов работы -  $n_{\min} = 900$  мин<sup>-1</sup>,  $n = 2000$  мин<sup>-1</sup>,  
 $n_M = 3500$  мин<sup>-1</sup>,  $n_N = 5000$  мин<sup>-1</sup>,  $n_{\max} = 5600$  мин<sup>-1</sup>.

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

Введение;

Рабочие процессы в бензиновом ДВС со сверхвысокой степенью сжатия;

Тепловой расчет двигателя;

Расчет кинематики двигателя;

Динамический расчет двигателя;

Бензиновый двигатель с перспективным рабочим процессом.

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)

И.Д. Кудашов

(И.О. Фамилия)

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

УТВЕРЖДАЮ:

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

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН**  
**выполнения бакалаврской работы**

Студента Кудашов Игорь Дмитриевич  
 по теме Бензиновый двигатель с перспективным рабочим процессом

№ этапов работы	Содержание этапов работы	Форма представления материала	Плановый срок выполнения этапа и представления его на контроль	Планируемый объём выполнения, %	Фактический объём 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 двигателя <i>Чертеж диаграмм кинематического расчетов</i>	Таблицы, описания Демонстрационный лист	5 мая 2016 г.	90%		
3	Расчет динамики двигателя <i>Чертеж диаграмм динамического расчетов</i>	Таблицы, описания Демонстрационный лист	11 мая 2016 г.	90%		
4	Описание конструкции спроектированной установки	Раздел записки Графический лист	20 мая 2016 г.	80%		
5	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 \_\_\_\_\_ И.Д. Кудашов  
 (подпись) (И.О. Фамилия)  
 Руководитель \_\_\_\_\_ В.В. Смоленский  
 (подпись) (И.О. Фамилия)  
 « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

## АННОТАЦИЯ

Настоящая бакалаврская работа состоит из шести частей. В первой части проекта представлен обзор применяемых технологий непосредственного впрыска топлива в цилиндр, во второй части проведен тепловой расчет двигателя, в третьей кинематический, в четвертой динамический расчет, в пятой прочностной расчет основных деталей двигателя, в шестой дано описание конструкции двигателя спроектированного двигателя, проведен анализ его эффективности и токсичности.

Пояснительная записка к бакалаврской работе состоит из 100 стр.

Графическая часть проекта содержит 8 листов формата А1. Продольный и поперечный разрез двигателя и чертеж форсунки, лист описание конструкции исследуемых двигателей, три листа диаграмм, чертеж поршня.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	8
1 Рабочие процессы в бензиновом ДВС со сверхвысокой степенью сжатия .....	9
2 Тепловой расчет двигателя .....	16
2.1 Топливо.....	16
2.2 Параметры рабочего тела.....	16
2.3 Параметры окружающей среды и остаточные газы.....	17
2.4 Расчет процесса впуска.....	18
2.5 Расчет процесса сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси.....	19
2.6 Термодинамический расчёт процесса сгорания.....	21
2.7 Расчет процессов расширения и выпуска. ....	23
2.8 Индикаторные показатели рабочего цикла. ....	25
2.9 Эффективные показатели и параметры двигателя .....	26
2.10 Тепловой баланс двигателя.....	27
3 Расчет кинематики двигателя .....	29
4 Динамический расчет двигателя .....	30
4.1 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма.....	30
4.2 Силы инерции.....	30
4.3 Суммарные силы.....	31
4.4 Крутящие моменты .....	31
4.5 Расчет сил, действующих на шатунную шейку коленчатого вала..	32
4.6 Силы, действующие на колено вала .....	33
4.7 Силы, действующие на коренные шейки.....	33
4.8 Равномерность крутящего момента и равномерность хода двигателя.....	34
5 Бензиновый двигатель с перспективным рабочим процессом .....	36

Заключение .....	43
Список использованных источников.....	44
Приложение А - Результаты теплового расчета.....	47
Приложение Б - Результаты кинематического расчета.....	57
Приложение В - Результаты динамического расчета.....	59
Приложение Г - результаты расчетов сил действующих в КШМ.....	65
Приложение Д – Расчет основных деталей двигателя .....	81
Приложение Е – Спецификация сборочного чертежа.....	101

## ВВЕДЕНИЕ

Достаточно совершенной и сложной машиной. Трудно даже представить, что в столь привычных для многих двигателях автомобилей семейства ВАЗ каждый из  $4^x$  поршней способен совершать 200 ходов в секунду. В мире существуют двигатели с номинальной частотой в 2, а то даже в 3 раза большей, чем у ВАЗа, т.е. каждый из поршней этих двигателей способен совершать по 400-600 ходов за секунду. Какие же огромные должны быть при этом силы инерции деталей КШМ, какими напряжениями по времени являются процессы двигателя? Но с другой стороны в бензиновом двигателе всего не более 30% энергии заключенного в сгораемом топливе удастся преобразовать в полезную механическую работу и то на режимах полных нагрузок, а на частичных режимах, на которых в основном и работает автомобильный двигатель, эффективный КПД в разы меньше. С этой стороны считать автомобильный двигатель совершенной машиной не справедливо. Отсюда и понятны более столетние поиски ученых, исследователей, конструкторов путей повышения эффективного КПД двигателя.

Рассмотрим результаты теоретических исследований автора в области повышения эффективности работы двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены возможности повышения коэффициента полезного действия двигателей за счет увеличения степени сжатия рабочей смеси.

## 1 Рабочие процессы в бензиновом ДВС со сверхвысокой степенью сжатия

В работе «Размышления о движущей силе огня» С. Карно описывает принцип работы гипотетического теплового двигателя. Цикл Карно состоит из термодинамических процессов, обеспечивающих наиболее полное превращение теплоты в работу. Изотермные процессы расширения и сжатия протекают при постоянных температурах  $T_1$  и  $T_2$  и, соответственно, они константы. Адиабатные процессы расширения и сжатия протекают без ввода и отвода тепла. Причем, поскольку адиабатное расширение совершается в положительной зоне работы, а адиабатное сжатие в отрицательной зоне работы цикла, они в сумме уравнивают друг друга и влияния на результат работы и термический КПД цикла не оказывают (т.е не должны оказывать). Работа цикла есть разница между работой изотермного расширения и изотермного сжатия. Причем критерием оценки является количество введенного на расширении и отведенного на сжатии тепла. Цикл Карно имеет максимально возможный термический КПД в заданном интервале температур  $T_1$ - $T_2$  и любой другой цикл в этом же интервале температур и энтропий приведет к уменьшению площади цикла и, следовательно, к уменьшению теплоты преобразованной в работу.

Следует сразу отметить, что сравнение работы ДВС с циклом Карно может носить только условный характер. Для соблюдения в работе ДВС «принципа Карно» необходимо на такте изотермного расширения подавать в цилиндр не только топливо, но и дополнительные порции кислорода. А поскольку этого не делается, разница между величинами температур начала расширения, максимальной температурой цикла и на момент окончания тепловыделения в реальном ДВС столь велика, что о величинах  $T_1$  и  $T_2$  в работе ДВС можно говорить лишь, как о неких средних, условных величинах.

Вместе с тем, осмысление процессов происходящих в цикле Карно дает возможность установить основополагающие принципы работы ДВС.

Для оценки характера происходящих в конкретном ДВС рабочих процессов необходимо брать за основу его рабочий цикл. При рассмотрении конкретного рабочего цикла ДВС следует исходить из того, что цикл совершается за определенный промежуток времени, масса рабочего тела составляет конкретную величину и в это рабочее тело можно ввести только конкретное количество тепла.

Т.е. при рассмотрении рабочего цикла ДВС применительно к циклу Карно константами следует считать массу рабочего тела и количество вводимого тепла.

Современная теория ДВС проводит подробный анализ индикаторной работы ДВС по его внешней скоростной характеристике. Анализ индикаторной работы ДВС в режиме частичных нагрузочных характеристик практически отсутствует. Между тем, ответ на вопрос о том, как повысить КПД ДВС и что сделать, чтобы он работал, дает анализ его работы именно в указанных режимах.

По циклу Карно путем адиабатного сжатия температура рабочего тела доводится до величины  $T_1$ , после этого в рабочее тело вводится тепло и при сохранении температуры  $T_1$  совершается процесс расширения. Во второй части расширения ввод тепла прекращается, процесс становится адиабатным. Температура рабочего тела от величины  $T_1$  доходит до величины  $T_2$ .

При использовании в качестве источника тепла углеводородного топлива до выделения тепла оно должно пройти стадию предварительной подготовки, которая включает в себя период формирования очага пламени (период задержки воспламенения) и стадию распространения пламени по фронту, т.е. указанный процесс занимает определенный промежуток времени.

Для обеспечения нормального прохождения рабочего цикла современного ДВС часть тепла в количестве  $Q_2$  для доведения температуры (соответственно и давления) до величины  $T_1$  вводится при движении поршня к ВМТ. Угол начала ввода и количество необходимого тепла  $Q_2$  определяется массой участвующего в цикле рабочего тела. Остальная часть тепла (поскольку величины  $Q$

и  $Q_2$  для данного рабочего цикла становятся константами) в количестве  $Q-Q_2$  вводится на такте расширения.

На такте сжатия в бензиновом ДВС по достижении в цилиндре определенного давления подается искра, происходит формирование очага пламени, затем пламя начинает распространяться по фронту. Повышение температуры и давления топливно-воздушной смеси с момента формирования очага пламени происходит под воздействием 2-х факторов: сжатия и ввода тепла. Примерное соотношение воздействия этих факторов видно по данным, полученным с помощью программы расчетного моделирования для бензинового ДВС со степенью сжатия  $E=10$  (условно: ход поршня 90 мм, высота камеры сгорания 10 мм).

1. При угле начала тепловыделения в  $15^\circ$  до ВМТ температура смеси в конце такта всасывания  $65^\circ \text{C}$ , на момент начала тепловыделения температура  $355^\circ \text{C}$ , давление  $15.5 \text{ кг/см}^2$ , на момент ВМТ поршня температура  $834^\circ \text{C}$ , давление  $33.2 \text{ кг/см}^2$ .

2. При тех же вводных данных, но при угле начала тепловыделения в  $0$  градусов температура смеси в конце такта всасывания  $65^\circ \text{C}$ , на момент ВМТ поршня в конце такта сжатия температура смеси  $385^\circ \text{C}$ , давление  $19.5 \text{ кг/см}^2$ .

Т.е. увеличение температуры рабочего тела на  $449^\circ \text{C}$  и давления на  $13.7 \text{ кг/см}^2$  на такте сжатия получено за счет ввода тепла.

В виду этого такт сжатия в современном ДВС можно отнести к адиабатному лишь условно, поскольку увеличение температуры и давления рабочего тела совершается и путем сжатия и путем ввода тепла. А это приводит к нарушению следующих условий цикла Карно:

1. Условие равенства адиабатных циклов расширения и сжатия. Поскольку на завершающем отрезке такта сжатия в рабочее тело вводится тепло в количестве  $Q_2$ , цикл становится больше на количество отрицательной работы эквивалентной теплу  $Q_2$ .

2. Сокращается продолжительность и протяженность цикла изотермного расширения по углам ПКВ. Поскольку количество тепла  $Q$ , которое можно ввести в рабочее тело в ДВС является константой, то ввод части этого тепла в ко-

личестве  $Q_2$  на такте сжатия уменьшает его количество на цикле изотермного расширения до величины  $Q-Q_2$ . При этом для нейтрализации отрицательной работы, совершаемой теплом  $Q_2$  на такте сжатия, из оставшегося количества тепла  $Q-Q_2$  на такте расширения расходуется еще одно количество тепла  $Q_2$ , что существенным образом снижает КПД двигателя.

Применительно к работе современного ДВС в диаграмме цикла Карно отрезок такта адиабатного сжатия, на котором тепло в количестве  $Q_2$  вводится в рабочее тело, должен быть выделен в особый переходный сектор. Отрезок такта изотермного расширения по углам ПКВ должен быть уменьшен на величину  $Q_2$ . Соответственно этому либо величина  $T_1$  должна быть уменьшена, либо величина  $T_2$  должна быть увеличена на количество тепла  $2Q_2$  и величину потерянной температуры  $T$ . С учетом изложенного работа современного ДВС по циклу Карно может быть отображена в виде штриховой диаграммы на рисунке 1.

Признание массы  $m$  рабочего тела константой означает, что в него не возможно ввести тепла больше, чем  $Q$ . А это означает, что в рабочем цикле современного ДВС без изменения массы рабочего тела не возможно удлинить протяженность цикла изотермного расширения.

В виду не совершенства устройства и принципа работы современного ДВС простое уменьшение угла тепловыделения приводит к ухудшению эффективных характеристик двигателя. Происходит падение температуры и давления топливно-воздушной смеси на сжатии, что отрицательно влияет на формирование и подготовку смеси к горению. При переходе к фазе активного горения на линии расширения объем камеры сгорания и, соответственно, расстояние на которое пламя должно распространиться оказывается слишком большим и топливо не успевает сгореть.

Попытки уменьшить угол тепловыделения, совмещая это с увеличением степени сжатия при сохранении устройства и принципа работы современного ДВС, также приводят к отрицательным результатам. При работе под нагрузкой такой двигатель разрушается меньше чем за 1 минуту.

Но если найти правильное решение вопроса, исключив ввод тепла в рабочее тело на такте сжатия, можно увеличить степень сжатия ДВС и существенно повысить его эффективность.

Суть равенства циклов адиабатного сжатия и расширения заключается в том, чтобы отрицательную работу, затраченную на сжатие рабочего тела, получить в виде положительной работы адиабатного расширения. Если исключить ввод тепла на такте сжатия и получить требуемые температуру и давление рабочего тела путем сжатия, то тепловая протяженность циклов адиабатного сжатия и расширения становится, примерно, одинаковой и влияния на КПД двигателя не оказывают.

Если рассчитывать *линии расширения* бензиновых двигателей со степенями сжатия 10 и 25, сравнение происходящих в них процессов на такте расширения дает следующую картину.

Двигатель № 1 с  $E=10$  ( $D_1$ ): ход поршня 90 мм, высота камеры сгорания 10 мм, угол начала тепловыделения  $15^\circ$  до ВМТ, величина  $P_z$  достигается при  $15^\circ$  ПКВ после ВМТ.

Двигатель № 2 с  $E=25$  ( $D_2$ ): ход поршня 90 мм, высота камеры сгорания 3.75 мм, угол начала тепловыделения  $0^\circ$  по углу ПКВ, величина  $P_z$  достигается при  $0^\circ$  ПКВ.

В обоих двигателях продолжительность тепловыделения  $50^\circ$  по углу ПКВ.

В  $D_1$  при нахождении поршня в  $15^\circ$  после ВМТ (высота камеры сгорания при этом 11.53 мм) значительная часть тепла уже введена, но интенсивный процесс ввода тепла еще продолжается. При дальнейшем движении поршня от ВМТ температура газов растет, но давление из-за быстрого увеличения объема камеры сгорания падает. Примерно к  $35^\circ$  ПКВ (отрезок  $a-b_1$  рис. 1) процесс ввода тепла завершен, объем камеры сгорания в этой точке равен 18.14 мм. Далее происходит процесс адиабатного расширения.

В  $D_2$  увеличение степени сжатия рабочего тела (соответственно, создание благоприятных условий для сгорания смеси) позволяет начать ввод в него

тепла при нахождении поршня в ВМТ. При указанном положении поршня давление  $P_c = P_z$ , но температура (примерно на  $300^{\circ}\text{C}$ ) меньше, чем в  $D_1$ . Начало распространения пламени по фронту совпадает с началом движения поршня от ВМТ. Увеличение фронта пламени сопровождается увеличением количества выделяемого тепла, ростом температуры и объема газов. Вместе с тем, увеличивается и объем камеры сгорания. Взаимодействие указанных факторов поддерживает величину давления на одном уровне.

При этом двигатель работает без детонаций. Детонация, это пристеночное (взрывное) сгорание части топливно-воздушной смеси в результате самовоспламенения из-за местного повышения температуры и давления. При нормальном протекании процесса сгорания (т.е. без детонаций) скорость распространения пламени величина постоянная. Переменными могут быть расстояние, на которое пламени необходимо распространиться и время, за которое оно должно пройти это расстояние. Если расстояние короткое, то уменьшится время, за которое пламя его пройдет и, будут детонации, если расстояние большое, пламя не успеет его пройти и смесь не успеет сгореть. Как видно из приведенных цифр, в  $D_1$  на начало тепловыделения объем камеры сгорания составляет ( $15^{\circ}$  до ВМТ) 11.53 мм. На момент полного распространения пламени по фронту ( $15^{\circ}$  после ВМТ) объем камеры сгорания такой же. Т.е. для данного режима работы  $D_1$  это оптимальное соотношение между скоростью распространения пламени, временем и расстоянием.

В  $D_2$  эта зависимость выглядит следующим образом: на начало тепловыделения ( $0^{\circ}$  ПКВ) объем камеры сгорания 3.75 мм. В  $30^{\circ}$  ПКВ, когда пламенем охвачена вся смесь, объем камеры сгорания и температура газов меньше, чем в  $D_1$  при положении поршня в  $15^{\circ}$  после ВМТ. До объема камеры сгорания в 11.53 мм ( $34.5^{\circ}$  ПКВ) интенсивный ввод тепла позволяет поддерживать величину давления газов равным  $P_z$ .

Но только в  $D_1$  при  $35^{\circ}$  ПКВ объем камеры сгорания (18.14 мм) больше, а давление газов в 1.57 раз меньше чем в  $D_2$  (11.53 мм). Помимо этого, при

нахождении поршней в точках  $P_z$  ( $15^*$  и  $35^*$ ) расширение в  $D_1$  составляет 1.153, а в  $D_2$ -3.17, крутящий момент в  $D_2$  будет в 2.127 раз больше.

К  $48^*$ ПКВ, когда в  $D_2$  объем камеры сгорания становится 18.14 мм, т.е. столько же, сколько в  $D_1$  в  $35^*$  ПКВ, процесс ввода тепла идет к завершению. При указанном положении поршня объем камеры сгорания в  $D_1$  (24.4 мм против 18.14 мм) больше, а давление газов меньше в 1.35 раз. На момент завершения тепловыделения (соответственно  $35^*$  и  $50^*$  ПКВ) расширение в  $D_1$  составляет 1.81, а в  $D_2$ - 4.84, крутящий момент в  $D_2$  в 1.27 раз больше.

Таким образом, в  $D_2$  максимальная величина давления  $P_z$  достигается к  $0^*$  ПКВ (когда объем камеры сгорания равен 3.75 мм) и не меняется до  $35^*$  ПКВ, тепловыделение продолжается до  $50^*$  ПКВ. В виду этого среднее индикаторное давление цикла существенно выше.

Т.е. чем выше степень сжатия ДВС, тем выше его среднее индикаторное давление.

Таким образом, повышение степени сжатия бензинового ДВС с 10 до 25 исключает потери тепла в количестве  $2Q_2$  и удлиняет протяженность цикла изотермного расширения, примерно, на 20 градусов по углам ПКВ.

## 2 Тепловой расчет двигателя

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

Исходные данные для теплового расчета:  $V_L = 1.5$  л;  $n_N = 5600$  мин<sup>-1</sup>;  $i = 4$ ;  $\tau = 4$ ;  $\varepsilon = 28$ , для скоростных режимов работы -  $n_{\min} = 900$  мин<sup>-1</sup>,  $n = 2000$  мин<sup>-1</sup>,  $n_M = 3500$  мин<sup>-1</sup>,  $n_N = 5000$  мин<sup>-1</sup>,  $n_{\max} = 5600$  мин<sup>-1</sup>.

### 2.1 Топливо

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

Низшая теплота сгорания топлива:

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

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

### 2.2 Параметры рабочего тела

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания топлива:

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

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

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

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

Количество горючей смеси:

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

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

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

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

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

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

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

Общее количество продуктов сгорания:

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

Коэффициент молекулярного изменения свежей смеси

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

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

Таблица 2.1 - Параметры рабочего тела

$n, \text{ мин}^{-1}$	$\alpha$	$M_1, \text{ кмоль гор.см./кг топл.}$	$M_{CO_2}, \text{ кмоль } CO_2/\text{кг топл.}$	$M_{CO}, \text{ кмоль } CO/\text{кг топл.}$	$M_{H_2O}, \text{ кмоль } H_2O/\text{кг топл.}$	$M_{H_2}, \text{ кмоль } H_2/\text{кг топл.}$	$M_{N_2}, \text{ кмоль } N_2/\text{кг топл.}$	$M_2, \text{ кмоль пр.сг./кг топл.}$	$\mu_0$
900	1	0,525523	0,07125	0	0,0725	0	0,409327	0,553077	1,052432

### 2.3 Параметры окружающей среды и остаточные газы

Атмосферные условия:  $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$  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

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

#### 2.4 Расчет процесса впуска

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

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

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

Потери давления на впуске.

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

Давление в конце впуска:

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

Коэффициент остаточных газов:

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

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

Температура в конце впуска:

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

Коэффициент наполнения:

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

Удельный объем рабочего тела в конце процесса наполнения

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

Результаты расчета процесса впуска приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Расчет процесса впуска

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

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

Коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси

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

Значение показателя политропы сжатия находится методом последовательных приближений

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

Давление, температура и удельный объём в конце сжатия:

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

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

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

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

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

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:

н, мин <sup>-1</sup>	μ	n <sub>l</sub>	P <sub>c</sub> , МПа	T <sub>c</sub> , К	Θ°ПКВ	V <sub>y</sub> , м <sup>3</sup> /кг	P <sub>y</sub> , МПа	T <sub>y</sub> , К
900	1,050601	1,3702	2,337381	828,9211	12	0,11026	1,967552	791,23
2000	1,03894	1,374725	2,273893	824,503	14	0,117763	1,80708	774,445
3500	1,039063	1,37283	2,194925	805,3634	16	0,124724	1,639063	743,95
5000	1,038972	1,37496	2,086875	806,2679	19	0,141498	1,405866	723,92
5600	1,050855	1,37538	2,045133	804,9556	24	0,164719	1,143217	686,809
Двигатель ВАЗ-2112								
900	1,060488	1,37058	2,364652	823,3493	15	0,115161	1,823871	767,52
2600	1,050596	1,372	2,259369	811,433	20	0,134725	1,469604	722,15
3700	1,050718	1,3728	2,180028	808,4022	23	0,150917	1,267603	697,78
5000	1,050909	1,37378	2,122703	795,8551	26	0,166039	1,098591	665,27
5600	1,050917	1,3753	2,044748	797,5824	28	0,182916	0,977444	652,08

## 2.6 Термодинамический расчёт процесса сгорания

Коэффициент выделения теплоты  $\delta$ , учитывающий неполное сгорание топлива;

$$\delta = \frac{H_u - 119950(\alpha - 1)}{H_u}, \quad (2.26)$$

Коэффициент эффективности сгорания топлива  $\xi$ :

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

Удельная теплота сгорания рабочей смеси

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

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

Давление газов в процессе сгорания

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

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

Доля топлива, сгоревшего на рассматриваемом участке:

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

Среднее значение доли топлива сгоревшего на участке 1-2;

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

Отношение средних теплоёмкостей рабочего тела на участке 1-2.

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

Фактор теплоёмкостей  $K_{1-2}$

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

Средняя температура  $T_{1-2}$  на участке 1-2. Здесь температура  $T_2$  определяется методом пробных подстановок.

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

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

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

где:

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

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

средний на рассматриваемом участке коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси,

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

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

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

Основные коэффициенты термодинамического расчета приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Коэффициенты термодинамического расчета

n, мин <sup>-1</sup>	$\delta$	$\psi$	$\xi$	q <sub>z</sub> , Дж/кг	E <sub>2</sub> , МПа	$\varphi_z$ , град, ПКВ.	m
900	1	0,87	0,87	2311,506	47,544497	28	2
2000	1	0,9	0,9	2291,177	45,990604	36	2.2
3500	1	0,93	0,93	2375,011	47,11143	42	2.4
5000	1	0,95	0,95	2420,459	45,59819	50	2.6
5600	1	0,99	0,99	2643,545	48,99202	54	2.8
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<sup>0</sup> ПКВ и приведен в Приложении А и на плакате теплового расчета.

## 2.7 Расчет процессов расширения и выпуска

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

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

Средний показатель политропы расширения находится методом последовательных приближений из уравнения:

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

Параметры в конце процесса расширения как политропного процесса

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

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

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

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

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

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

Для оценки правильности выбора значения температуры отработавших газов, произведём проверку

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

погрешность расчёта  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{100 (T_r - T'_r)}{T_r} \% \quad (2.52)$$

Результаты расчета процесса расширения и выпуска приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Расчет процесса расширения и выпуска

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$V_z$ , м <sup>3</sup>	$T_z$ , К	$P_z$ , МПа	$\delta$	$n_2$	$P_b$ , МПа	$T_b$ , К	$T_r$ , К	$\Delta$ , %
900	0,120284	3019,243	7,230007	8,48804	1,177	0,58329	2067,555	1163,224	0,2779
2000	0,143871	2907,209	5,768566	7,27169	1,1796	0,55548	2035,725	1169,602	-0,034
3500	0,162852	2889,058	5,06501	6,50078	1,1795	0,55682	2064,706	1199,442	0,3717
5000	0,197929	2831,083	4,08341	5,63196	1,1804	0,53085	2072,834	1245,126	0,8199
5600	0,195495	3009,4	4,435073	5,79622	1,17476	0,56284	2213,654	1315,048	1,157
Двигатель ВАЗ-2112									
900	0,1494	2639,83	5,121	6,688	1,188	0,5354	1846,58	1086,178	0,572
2600	0,1684	2756,27	4,714	6,139	1,1835	0,5504	1975,7	1162,08	0,093
3700	0,1951	2913,76	4,303	5,474	1,1775	0,5815	2155,05	1244,545	-0,036
5000	0,1972	2929,05	4,279	5,474	1,1767	0,5789	2168,77	1265,439	0,0347
5600	0,2052	2976,31	4,179	5,474	1,175	0,5669	2209,79	1309,556	0,349

## 2.8 Индикаторные показатели рабочего цикла

Теоретическая индикаторная работа цикла определяется по методу трапеций:

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

Расчётное среднее индикаторное давление

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

Индикаторный коэффициент полезного действия

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

Удельный индикаторный расход топлива

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

Результаты расчета индикаторных показателей рабочего цикла приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Индикаторные показатели рабочего цикла

n, мин <sup>-1</sup>	L <sub>i</sub> , кДж	P <sub>i</sub> , Мпа	N <sub>i</sub> , кВт	η <sub>i</sub>	g <sub>i</sub> , г/кВт*ч
900	1,1718807	1,26863	14,27209	0,489426	167,4399
2000	1,1166917	1,17975	29,49376	0,456318	179,5886
3500	1,1498939	1,200507	52,5222	0,440856	185,8873
5000	1,1350542	1,125416	70,33848	0,458662	178,6709
5600	1,2659878	1,234851	86,43956	0,498398	164,4257
Двигатель ВА3-2112					
900	1,0012	1,1060343	12,442886	0,4289854	191,03093
2600	1,09	1,1651984	37,868947	0,4405874	186,00051
3700	1,1957	1,2379594	57,255621	0,4484105	182,75552
5000	1,224	1,2533459	78,334121	0,4813589	170,24613
5600	1,2406	1,2210353	85,47247	0,4929888	166,22992

## 2.9 Эффективные показатели и параметры двигателя

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

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

Среднее давление механических потерь

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

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. Графически они представлены на плакате ВСХ.

Таблица 2.8 - Эффективные показатели двигателя

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

## 2.10 Тепловой баланс двигателя

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

$$Q_o = \frac{H_u G_T}{3.6} = \frac{43930 G_T}{3.6} = 12203 G_T \quad (2.65)$$

Теплота, эквивалентная эффективной работе за 1 с:

$$Q_e = 1000 N_e \text{ и } q_e = Q_e * 100 / Q_o \quad (2.66)$$

Теплота, передаваемая охлаждающей среде:

$$Q_B = \frac{c_i D^{1+2m} n^m (H_u - \Delta H_u)}{\alpha H_u}, \quad (2.67)$$

$$q_B = Q_B * 100 / Q_o; \quad (2.68)$$

Теплота, унесенная с отработанными газами:

$$Q_r = \left( \frac{G_T}{3.6} \right) \left[ M_2 \left[ \kappa_{nc} \frac{H_u}{V} \tau_0 + 8.315 \bar{t}_r \right] - M_1 \left[ \kappa_{nc} \frac{H_u}{V} \tau_0 + 8.315 \bar{t}_o \right] \right], \quad (2.69)$$

$$q_r = Q_r * 100 / Q_o \quad (2.70)$$

где  $(mc_V)_{t_0}^{20} = 20.775$  кДж/(кмоль\*град) – теплоемкость свежего заряда (воздуха) (определяется по таблице 6 – [1]) при 20°C.

$(mc_V)_{t_0}^{t_r}$  - теплоемкость остаточных газов, определяется по (таблице 7 – [1]) методом интерполяции при соответствующих  $\alpha$  и  $t_r$ .

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

$$Q_{н.с} = \Delta H_U * G_T / 3,6 \quad (2.71)$$

$$q_{н.с.} = Q_{н.с.} * 100 / Q_0 \quad (2.72)$$

Неучтенные потери теплоты:

$$Q_{ост} = Q_0 - (Q_e + Q_s + Q_r + Q_{н.с}) , \quad (2.73)$$

$$q_{ост} = Q_{ост} * 100 / Q_0 \quad (2.74)$$

Результаты расчетов тепловой баланс двигателя сводим в таблицу 2.9.

Таблица 2.9 - Тепловой баланс разрабатываемого двигателя

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

### 3 Расчет кинематики двигателя

Премещение поршня

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

Скорость поршня

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

Ускорения поршня

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

Расчет  $S_x$ ,  $v_{\Pi}$  и  $j_n$  производится аналитически через каждые  $10^0$  угла поворота коленчатого вала. Расчитанные значения ускорения поршня представлены в таблице 3.1, и на плакате кинематики КШМ.

Таблица 3.1 - Перемещение, скорость и ускорение поршня

$\varphi^{\circ}$	$S_x$ , мм	$V_{\Pi}$ , м/с	$J$ , м/с <sup>2</sup>	$\varphi^{\circ}$	$S_x$ , мм	$V_{\Pi}$ , м/с	$J$ , м/с <sup>2</sup>
0	0,0	0,0	15767	180	71,0	0,0	-8614
10	0,7	4,1	15366	190	70,6	-3,1	-8644
20	2,8	8,1	14195	200	69,5	-6,1	-8716
30	6,1	11,7	12346	210	67,5	-9,1	-8769
40	10,5	14,9	9960	220	64,8	-11,9	-8717
50	15,7	17,4	7215	230	61,4	-14,4	-8457
60	21,7	19,3	4307	240	57,2	-16,7	-7884
70	28,0	20,5	1430	250	52,2	-18,6	-6909
80	34,4	21,0	-1244	260	46,7	-20,0	-5478
90	40,7	20,8	-3577	270	40,7	-20,8	-3577
100	46,7	20,0	-5478	280	34,4	-21,0	-1244
110	52,2	18,6	-6909	290	28,0	-20,5	1430
120	57,2	16,7	-7884	300	21,7	-19,3	4307
130	61,4	14,4	-8457	310	15,7	-17,4	7215
140	64,8	11,9	-8717	320	10,5	-14,9	9960
150	67,5	9,1	-8769	330	6,1	-11,7	12346
160	69,5	6,1	-8716	340	2,8	-8,1	14195
170	70,6	3,1	-8644	350	0,7	-4,1	15366
180	71,0	0,0	-8614	360	0,0	0,0	15767

## 4 Динамический расчет двигателя

### 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:

- масса поршневой группы (для поршня из алюминиевого сплава  $m_n=100$  кг/м<sup>2</sup>)

$$m_n = m_n \cdot F_n = 100 \cdot 0,005282 = 0,528 \text{ кг}; \quad (4.1)$$

- масса шатуна (для стального кованного шатуна  $m_{ш}=150$  кг/м<sup>2</sup>)

$$m_{ш} = m_{ш} \cdot F_n = 150 \cdot 0,0052783 = 0,792 \text{ кг}; \quad (4.2)$$

- масса неуравновешенных частей одного колена вала без противовесов

$$m_k = m_k \cdot F_n = 140 \cdot 0,0052783 = 0,739 \text{ кг}. \quad (4.3)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца

$$m_{ш.п.} = 0,275 \cdot m_{ш} = 0,275 \cdot 0,792 = 0,218 \text{ кг} \quad (4.4)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа

$$m_{ш.к.} = 0,725 \cdot m_{ш} = 0,725 \cdot 0,792 = 0,574 \text{ кг} \quad (4.5)$$

Массы, совершающие возвратно-поступательное движение

$$m_j = m_n + m_{ш.п.} = 0,528 + 0,218 = 0,746 \text{ кг}. \quad (4.6)$$

Массы, совершающие вращательное движение

$$m_R = m_k + m_{ш.к.} = 0,739 + 0,574 = 1,313 \text{ кг}. \quad (4.7)$$

### 4.2 Силы инерции

Определяем значения силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс

$$P_j = -m_j j = 0,746 * j \quad (4.8)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна одного цилиндра

$$K_{Ru} = -m_{ш.к.} \cdot R \cdot \omega^2 \cdot 10^{-3} = -0,574 \cdot 0,0355 \cdot 586^2 \cdot 10^{-3} = -6,9974 \text{ кН.} \quad (4.9)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа

$$K_{Rk} = -m_{к.} \cdot R \cdot \omega^2 \cdot 10^{-3} = -0,739 \cdot 0,0355 \cdot 586^2 \cdot 10^{-3} = -9,0088 \text{ кН.} \quad (4.10)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа:

$$K_R = -m_R \cdot R \cdot \omega^2 = -1,0313 \cdot 0,0355 \cdot 586^2 \cdot 10^{-3} = -16,0062 \text{ кН.} \quad (4.11)$$

### 4.3 Суммарные силы

Сила, сосредоточенная на оси поршневого пальца

$$P = \Delta P_r + P_j \quad (4.12)$$

Нормальная сила

$$N = P \operatorname{tg} \beta \quad (4.13)$$

Сила (кН), действующая вдоль шатуна

$$S = P^* / \cos \beta \quad (4.14)$$

Сила (кН), действующая по радиусу кривошипа

$$K = P^* \cos(\varphi + \beta) / \cos \beta \quad (4.15)$$

Полная тангенциальная сила (кН)

$$T = \frac{p \sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta} \quad (4.16)$$

Результаты динамического расчета графически представлены на плакате.

### 4.4 Крутящие моменты

Крутящий момент одного цилиндра

$$M_{кр.ц} = T \cdot R \quad (4.17)$$

Средний крутящий момент двигателя:

- по данным теплового расчета

$$M_{кр.ц.} = M_i = \frac{M_e}{\eta_M} = \frac{145}{0,86} = 168 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (4.18)$$

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

$$M_{кр.ср.} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{M_{кр.i} + M_{кр.i+1}}{2} \right) \cdot 10^\circ}{360^\circ} = 155 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4.19)$$

Ошибка

$$\Delta = (168-155) \cdot 100/168 = 7,8\% \quad (4.20)$$

Максимальный и минимальный крутящие моменты:

$$M_{кр.маx} = 409,5 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (4.21)$$

$$M_{кр.миn} = - 57,0 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (4.22)$$

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

Суммарная сила, действующая на шатунную шейку по радиусу кривошипа

$$P_k = K + K_{Rш} = (K - 5108) \text{ Н}. \quad (4.23)$$

Значения  $R_{ш.ш.}$  для различных  $\varphi$  занесены в таблицу 4.3. Диаграмма  $R_{ш.ш.}$  в прямоугольных координатах приведена на плакате.

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

$$R_{ш.ш.ср} = \sum_{i=1}^n ((R_{ш.ш.i} + R_{ш.ш.i+1}) / 2) \cdot 10^\circ / 720^\circ = 9342 \text{ Н} \quad (4.24)$$

По полярной диаграмме строится диаграмма износа шатунной шейки. Сумма сил  $R_{ш.ш.}$ , действующих по каждому лучу диаграммы износа (от 1 до 12), определяется с помощью таблицы 4.4.

По данным таблицы 4.4 по каждому лучу откладываем величины суммарных сил  $\Sigma R_{ш.ш.i}$  от окружности к центру. По лучам 4 и 5 силы  $\Sigma R_{ш.ш.i}$  действуют только в интервале  $350^\circ < \varphi < 360^\circ$ .

#### 4.6 Силы, действующие на колено вала

Суммарная сила, действующая на колено вала по радиусу кривошипа

$$K_{P_k} = P_k + K_{Rk} = (P_k - 15324), H \quad (4.28)$$

Результирующая сила, действующая на колено вала

$$R_k = \sqrt{R_{ш.ш}^2 + K_{Rk}^2} \quad (4.29)$$

#### 4.7 Силы, действующие на коренные шейки

Сила, действующая на первую коренную шейку

$$R_{к.ш.1} = -0,5 * R_{k1} \text{ (таблица 26, графы 1 - 4)}. \quad (4.30)$$

Сила, действующая на вторую коренную шейку

$$R_{к.ш.2} = \sqrt{T_{k2}^2 + K_{k2}^2}, \quad (4.31)$$

где:

$$T_{k2} = -0,5 * (T_1 + T_2 * \cos \gamma_{k(1-2)} - K_{pk2} * \sin \gamma_{k(1-2)}) = -0,5 * (T_1 + T_2 * \cos 180^\circ - K_{pk2} * \sin 180^\circ) = -0,5 * (T_1 - T_2); \quad (4.32)$$

$$K_{k2} = -0,5 * (K_{pk1} + T_2 * \sin \gamma_{k(1-2)} - K_{pk2} * \cos \gamma_{k(1-2)}) = -0,5 * (T_1 + T_2 * \sin 180^\circ - K_{pk2} * \cos 180^\circ) = -0,5 * (K_{pk1} - K_{pk2}). \quad (4.33)$$

Сила, действующая на третью коренную шейку

$$R_{к.ш.3} = \sqrt{T_{k3}^2 + K_{k3}^2}, \quad (4.34)$$

где:

$$T_{k3} = -0,5 * (T_2 + T_3 * \cos \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} * \sin \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0,5 * (T_2 + T_3 * \cos 0^\circ - K_{pk3} * \sin 0^\circ) * \cos 180^\circ = 0,5 * (T_2 + T_3); \quad (4.35)$$

$$K_{k2} = -0.5 * (K_{pk2} + T_3 * \sin \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} * \cos \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0.5 * (K_{pk2} + T_3 * \sin 0^\circ - K_{pk3} * \cos 0^\circ) * \cos 180^\circ = 0.5 * (K_{pk2} - K_{pk3}). \quad (4.36)$$

Диаграммы  $R_{к.ш1}$ ,  $R_{к.ш2}$ ,  $R_{к.ш3}$ , перестроены в прямоугольные координаты.

По этим диаграммам определяем:

- для 1 (5)-й коренной шейки:

$$R_{к.ш1cp} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш1i} + R_{к.ш1i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 9325 H, \quad (4.36)$$

- для 2 (4)-й коренной шейки:

$$R_{к.ш2cp} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш2i} + R_{к.ш2i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 3350 H, \quad (4.37)$$

- для 3-й коренной шейки:

$$R_{к.ш3cp} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш3i} + R_{к.ш3i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 18058 H, \quad (4.38)$$

Строим диаграмму износа наиболее нагруженной 3-й шейки. Сумма сил  $\sum R_{к.ш3i}$ , действующих по каждому лучу диаграммы износа, определяется с помощью таблице 4.6. По данным этой таблицы в масштабе строим кривую износа.

#### 4.8 Равномерность крутящего момента и равномерность хода двигателя

Равномерность крутящего момента

$$\mu = \frac{M_{кр.маx} - M_{кр.мин}}{M_{кр.ср.}} = \frac{199,87 - (201,57 - 147,93)}{147,93} = 4,74. \quad (4.49)$$

Избыточная работа крутящего момента

$$L_{изб} = A * 4 * \pi / (4 * 90) = 16961 * 4 * \pi / 360 = 592,05 Дж, \quad (4.50)$$

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

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

Момент инерции движущихся масс двигателя, приведенных к оси коленчатого вала

$$I_0 = L_{изб} / (\delta * \omega^2) = 592,02 / (0,015 * 586^2) = 0,115 \text{ кг} * \text{м}^2 \quad (4.51)$$

## 5 Бензиновый двигатель с перспективным рабочим процессом

Для бензинового ДВС с внешним смесеобразованием наиболее эффективная степень сжатия составляет примерно 25-30.

Согласно циклу Карно на всем протяжении цикла изотермного расширения температура рабочего тела составляет величину  $T_1$ , что должно обеспечить наиболее высокий термический КПД теплового двигателя.

Однако в современных ДВС, даже дизельных, если исключить ввод тепла на такте сжатия, температура начала расширения на порядок (кратно) ниже той температуры, которую условно можно принять за среднюю температуру ( $T_1$ ) цикла изотермного расширения.

Положение теории о том, что мере повышения степени сжатия ДВС, потери тепла на сжатие рабочего тела будут расти, снижая его термический КПД, противоречат закону термодинамики об эквивалентности теплоты и механической работы.

Противоречит и принципу цикла Карно. Как бы велика не была степень сжатия рабочего тела, тепло, затраченное на совершение отрицательной работы адиабатного сжатия, будет получено за минусом индикаторных и механических потерь в виде положительной работы цикла адиабатного расширения.

Одной из ошибок Р.Дизеля при расчете своего двигателя было то, что он не соотнес величину индикаторных и механических потерь с удельной мощностью двигателя. При очень низкой удельной мощности повышение степени сжатия до определенной величины действительно приводит к тому, что потери тепла на сжатии и расширении могут превысить положительную работу расширения.

Использование рециркуляции отработавших газов для повышения КПД двигателя фактически представляет собой скрытую форму повышения его степени сжатия. При рециркуляции к свежему заряду для повышения его температуры добавляются отработавшие газы. При этом из-за увеличения температуры увеличивается и объем рабочего тела. Коэффициент увеличения объема рабоче-

го тела вследствие рециркуляции фактически является коэффициентом увеличения степени сжатия.

Однако рециркуляция не может дать существенного повышения КПД т.к. при этом уменьшается масса рабочего тела и количество тепла, которое в него можно ввести.

Аналогично, скрытой формой повышения степени сжатия является использование наддува.

Если работа ДВС будет соответствовать законам термодинамики, в конкретных условиях потери тепла на сжатие в ДВС со степенью сжатия 51 в значительном диапазоне нагрузок будут кратно меньше, а при нагрузках близких к максимальным будут, примерно, вдвое меньше, чем в современном дизельном ДВС со степенью сжатия 17.

Изложенное можно подытожить следующим образом:

Современная теория ДВС дает такую трактовку степени сжатия, которая не отражает реального характера рабочих процессов, которые происходят в ДВС. Для устранения этого недостатка степень сжатия должна подразделяться на следующие категории: 1. Степень сжатия двигателя-это отношение полного объема цилиндра к объему камеры сгорания при положении поршня в ВМТ. 2. Геометрическая степень сжатия двигателя-это отношение объема цилиндра в момент закрытия впускного клапана к объему камеры сгорания при положении поршня в ВМТ. 3. Действительная или текущая степень сжатия-это отношение находящегося в замкнутом цилиндре двигателя объема рабочего тела в состоянии атмосферного давления к объему камеры сгорания. Объем рабочего тела должен определяться при давлении равном давлению окружающей среды. Действительная степень сжатия в рабочем процессе двигателя величина переменная, регулируемая. Но при рассмотрении отдельного рабочего цикла эта величина должна рассматриваться, как константа. Например: степень сжатия двигателя 20, геометрическая степень сжатия 18. Действительная степень сжатия при расходе 50% воздуха составит приблизительно 9, при расходе воздуха, допу-

стим, в 80%- приблизительно 14.4. При расходе 100% воздуха действительная сжатия может быть больше, меньше или равна геометрической степени сжатия.

Также необходимо ввести понятие степени наполнения цилиндра, которая определяется, как отношение давления в цилиндре в момент закрытия впускного клапана к давлению окружающей среды. Давление окружающей среды независимо от его величины, должно приниматься за единицу.

Рассмотрение индикаторной работы конкретного рабочего цикла бензинового двигателя с точки зрения действительной степени сжатия рабочего тела показывает следующую картину:

1. Двигатель со степенью сжатия 10.

При расходе воздуха в 40% от максимального его расхода на данных оборотах в цилиндре оказывается в 2.5 раза меньше рабочего тела, чем при максимальном наполнении. В момент закрытия впускного клапана в цилиндре имеется разрежение, величина которого составит 0.4 от атмосферного (степень максимального наполнения цилиндра на данных оборотах равна 1). Т.е. величина 0.4 составит степень наполнения цилиндра для данного рабочего цикла. Такт сжатия при этих условиях состоит из 2-х этапов: первый- это доведение давления в цилиндре до давления окружающей среды. Для этого поршень должен совершить 0.54 длины своего хода от НМТ в сторону ВМТ. Второй этап- это непосредственно сам процесс сжатия. Он будет совершаться в оставшиеся 0.36 величины хода поршня. Действительная степень сжатия рабочего тела при этом составит 4.6.

2. Для двигателя со степенью сжатия 25 действительная степень сжатия рабочего тела при тех же условиях составит 10.6. Т.е. рабочий процесс в нем будет иметь такой же характер, как в двигателе со степенью сжатия 10, но только при степени наполнения последнего в 1.04.

В двигателе со степенью сжатия 10 при степени наполнения 1 и угле опережения зажигания  $25^\circ$  максимальное давление цикла  $P_z$  при 3500 оборотах в минуту достигается при  $15^\circ$  ПКВ после ВМТ.

В двигателе со степенью сжатия 25 при том же угле опережения зажигания и оборотах максимальное давление цикла  $P_z$  достигается в  $15^\circ$  ПКВ после ВМТ при степени наполнения в 0.385. При дальнейшем увеличении наполнения снижается угол опережения зажигания. При этом точка, в которой достигается максимальное давление цикла  $P_z$  преобразуется в линию, начало которой по мере увеличения действительной степени сжатия будет смещаться в сторону ВМТ, а конец в сторону НМТ. Так, при степени наполнения в 0.385, действительной степени сжатия в 10,6, угле опережения зажигания  $25^\circ$ ,  $P_z$  достигается при  $15^\circ$  ПКВ и является в координатах диаграммы цикла точкой. При степени наполнения в 1, действительной степени сжатия 25, угле начала тепловыделения  $0^\circ$ ,  $P_z$  будет достигнут в  $0^\circ$  ПКВ и в координатах диаграммы цикла преобразуется в линию от 0 до  $35^\circ$  ПКВ после ВМТ.

В двигателе, в котором  $P_c = P_z$ , первая фаза тепловыделения должна протекать с ограничением количества вводимого в рабочее тело тепла. В виду этого по мере повышения степени сжатия длина линии изотермного расширения будет увеличиваться до  $65-70^\circ$  ПКВ.

Действительная степень сжатия в предложенном варианте будет реально отражать характер рабочего процесса, происходящего в цилиндре при каждом рабочем цикле.

Для получения представления о том, как изменяются потери тепла в зависимости от степени сжатия двигателя, в июне 2004 года в Подольском районе Московской области неоднократно проводился такой эксперимент:

В серийном двигателе ВАЗ-2111 со степенью сжатия 9.9 и в моем со степенью сжатия 19.5 убирались термостаты для свободной циркуляции охлаждающей жидкости. Автомшины двигались на скоростях от 120 до 150 км/час. Если эксперимент проводился утром в прохладное время, температура охлаждающей жидкости в моем двигателе составляла  $55^\circ\text{C}$ , в обеденное, теплое время  $65^\circ\text{C}$ . В серийном двигателе температура составляла соответственно 95 и  $100^\circ\text{C}$ . Т.е. при увеличении степени сжатия отвод тепла в систему охлаждения уменьшается.

Особенность ДВС такова, что без предварительного, до ввода тепла, сжатия рабочее тело не будет совершать работу. При строительстве современного ДВС исходят из того, что необходимо получить максимальную величину давления  $P_z$ , как можно ближе к ВМТ. Но крутящий момент, т.е. величина работы, которую совершает двигатель, зависит не столько от давления над поршнем, сколько от длины плеча кривошипа на момент этого давления. Длина плеча кривошипа зависит от угла его поворота. Т.е. для повышения КПД конструкция и принцип работы ДВС должны быть таковы, чтобы величина  $P_z$  при работе двигателя сохраняла бы свое значение, как можно дольше по углу поворота кривошипа, и была бы не точкой, а линией. В виду этого при оценке работы ДВС имеет значение не столько величина максимального давления цикла, сколько положение кривой давления расширения в координатах диаграммы цикла, т.е. величина среднего индикаторного давления.

Чем выше по давлению и дальше по углам ПКВ кривая расширения будет располагаться от ВМТ, тем больше крутящий момент.

Для получения указанного эффекта, т.е. повышения КПД ДВС, по циклу Карно необходимо путем повышения степени сжатия уменьшать разницу между величиной  $T_1$  и температурой начала цикла изотермного расширения.

Т.е. чем меньше разница между  $T_1$  и температурой начала цикла изотермного расширения, тем КПД ДВС выше.

Для ДВС с внутренним смесеобразованием не зависимо от вида используемого топлива наиболее эффективная степень сжатия составляет, примерно 51.

Практике двигателестроения известны следующие способы увеличения мощности двигателя:

1. Увеличение литрового объема двигателя.
2. При сохранении объема двигателя увеличение расхода воздуха путем наддува.
3. При сохранении объема увеличение расхода воздуха путем увеличения оборотов двигателя.

4. При сохранении объема двигателя увеличение расхода воздуха путем изменения длины впускного коллектора (резонансный наддув), фаз газораспределения и установки дополнительного количества клапанов.

В традиционной теории ДВС все эти способы сведены к одной аксиоме: для увеличения мощности необходимо увеличить расход воздуха и топлива двигателем. Т.е. установлена прямая пропорциональная количественная зависимость между мощностью двигателя и расходом воздуха и топлива, согласно которой чем больше мощность двигателя, тем больше воздуха и топлива он расходует.

В моем двигателе зависимость обратно пропорциональная, качественная, согласно которой для увеличения мощности двигателя необходимо увеличить степень сжатия. При этом для получения искомой мощности необходимо уменьшить расход воздуха и топлива во столько же раз, во сколько была увеличена степень сжатия.

С учетом свойств бензина, в бензиновом ДВС со сверхвысокой степенью сжатия (при внутреннем смесеобразовании) тепло должно вводиться частями на такте расширения.

В дизельном ДВС ввод части тепла должно происходить при положении поршня в ВМТ с последующей подачей остальной части тепла на такте расширения. Расчеты показывают, что в дизельном двигателе степень сжатия 51, в котором тепло вводится в 0\*ПКВ, максимальные температуры и сжатия и расширения, примерно, соответствуют аналогичным показателям современного дизельного двигателя со степенью сжатия 17, но при этом термический КПД первого будет значительно выше.

Специалисты и теоретики, которым демонстрировался мой двигатель, убедившись в том, что это не фокус, а действительно работающий двигатель, заявляли, что «запредельная» степень сжатия должна создать в нем якобы сверхкритические давления и температуры. Следовательно, по их мнению, двигатель не будет иметь ресурс и быстро разрушится.

Однако и расчеты и работа двигателя показывают, что они заблуждаются.

1. Работа двигателя и расчеты показывают, что величины максимальных температур и давлений сжатия и расширения в нем такие же, что и в стандартном двигателе. Природу бензина изменить нельзя и, соответственно, при превышении допустимых пределов температур и давлений детонации неизбежны. А детонаций в моем двигателе нет.

2. Приведенные выше цифры говорят о том, что протяженность отрезка линии изотермного расширения, на котором действуют температуры и давления близкие к максимальным, в моем двигателе существенно больше. С этой точки зрения фактор их отрицательного воздействия на ресурс двигателя имеет место.

3. С другой стороны увеличение количества тепла, преобразуемого в механическую работу, приводит к существенному снижению температуры рабочего тела в конце расширения (примерно на  $400^{\circ}\text{C}$  меньше по сравнению со стандартным ДВС), что приводит к значительному снижению тепловой нагрузки на детали двигателя.

4. При суммировании приведенных факторов складывается положительный баланс, т.е. ресурс двигателя со сверхвысокой степенью сжатия будет больше, чем у стандартного.

Риск возникновения детонаций в двигателе с повышенной (до 25) или сверхвысокой степенью сжатия (51 и выше) по сравнению со стандартным двигателем меньше, т.к. в нем скорость нарастания объема камеры сгорания на расширении больше. Так, при одинаковых углах ПКВ прирост объема камеры сгорания от ВМТ поршня до точки  $P_z$  в двигателе со степенью сжатия 20 в 2.3 раз больше, чем у стандартного двигателя со степенью сжатия 10.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе спроектирован новый бензиновый двигатель реализовавший перспективный рабочий процесс со сверхвысокой степенью сжатия. Показаны преимущества и основные недостатки рассматриваемой концепции.

Проведены основные расчеты двигателя, а именно, тепловой, кинематический, динамический, основных деталей и систем двигателя, проведена оценка влияния сверхвысокой степени сжатия на эффективность процесса сгорания.

Получено в двигателе со сверхвысокой степенью сжатия:

- минимальный удельный эффективный расход топлива  $242 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ , в среднем его снижение по сравнению с базовым составило 6-8%;
- максимальную мощность при номинальных оборотах  $n=5600 \text{ мин}^{-1}$   $72 \text{ кВт}$ , по сравнению с базовым увеличение составило 1-1,5%.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Колчин А. И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей : учеб. пособие для вузов / А. И. Колчин, В. П. Демидов. - Изд. 4-е, стер. ; Гриф МО. - Москва : Высш. шк., 2008. - 496 с. : ил. - Библиогр.: с. 493.
2. Двигатели внутреннего сгорания : учеб. для вузов. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов / В. Н. Луканин [и др.] ; под ред. В. Н. Луканина [и др.]. - Изд. 3-е, перераб. и испр. - Москва : Высш. шк., 2007. - 479 с. : ил. - Библиогр.: с. 476
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. Расчет тепловых, газодинамических и механических параметров автотракторных двигателей : учеб.-метод. пособие / М. Н. Ложкин; ТГУ ; Ин-т энергетики и электротехники ; каф. "Энергетические машины и системы управления". - ТГУ. - Тольятти : ТГУ, 2012. - 30 с. : ил. - Библиогр.: с. 19. - Прил.: с. 20-29. - 10-99
5. 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.
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  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
$\theta$	$\phi$	$\alpha$	$\varepsilon$	$\mu$	$P_y$	$T_y$	$V_a$	$\zeta$	$E_2$	$\gamma$	$\lambda$	$\mu$					
8	48	1	28	1,052432282	6,998259	1044,623	0,979656	0,86	133,6575	0,012599	0,2933884	3					
Расчёт процесса сгорания																	
$\phi$	$\phi_1$	$V_{ст}$	$\sigma$	$\psi(\phi_1)$	$X_{1-2}$	$T_{пред}$	$T_1$	$T_2$	$T_{истина}$	$T_{1-2}$	$k_{1-2}$	$K_{1-2}$	$\Delta X_{1-2}$	$P$	$\mu$	$\mu_{1-2}$	$x$
0	-8	0,04093	0,01257	1,16976	0,00000	1044,623	1044,623	1056,727	1044,623	1050,675			0,00000	6,99826	1	1	0,000
1	-7	0,03954	0,00963	1,13005	0,00001	1056,727	1056,727	1067,86	1056,727	1062,294	1,33200	7,02409	0,00002	7,32810	1	1	0,000
2	-6	0,03833	0,00708	1,09560	0,00004	1067,86	1067,86	1078,071	1067,862	1072,966	1,33120	7,03864	0,00008	7,63818	1	1	0,000
3	-5	0,03731	0,00492	1,06642	0,00011	1078,071	1078,071	1087,504	1078,074	1082,788	1,33048	7,05181	0,00023	7,92225	1	1	0,000
4	-4	0,03648	0,00315	1,04252	0,00024	1087,504	1087,504	1096,401	1087,51	1091,953	1,32983	7,06381	0,00048	8,17482	1	1	0,000
5	-3	0,03582	0,00177	1,02393	0,00044	1096,401	1096,401	1105,106	1096,409	1100,753	1,32922	7,07491	0,00087	8,39156	1	1	0,001
6	-2	0,03536	0,00079	1,01064	0,00072	1105,106	1105,106	1114,065	1105,118	1109,585	1,32865	7,08550	0,00143	8,56974	1,0001	1,0001	0,002
7	-1	0,03508	0,00020	1,00266	0,00110	1114,065	1114,065	1123,823	1114,081	1118,944	1,32808	7,09609	0,00220	8,70849	1,0002	1,0001	0,003
8	0	0,03499	0,00000	1,00000	0,00159	1123,823	1123,823	1135,015	1123,844	1129,419	1,32748	7,10723	0,00319	8,80899	1,0003	1,0002	0,005
9	1	0,03508	0,00020	1,00266	0,00221	1135,015	1135,015	1148,35	1135,042	1141,682	1,32682	7,11959	0,00443	8,87441	1,0004	1,0004	0,009
10	2	0,03536	0,00079	1,01064	0,00297	1148,35	1148,35	1164,594	1148,386	1156,472	1,32606	7,13387	0,00594	8,90962	1,0007	1,0006	0,013
11	3	0,03582	0,00177	1,02393	0,00388	1164,594	1164,594	1184,54	1164,641	1174,567	1,32516	7,15079	0,00775	8,92085	1,001	1,0008	0,019
12	4	0,03648	0,00315	1,04252	0,00493	1184,54	1184,54	1208,974	1184,601	1196,757	1,32410	7,17101	0,00986	8,91504	1,0014	1,0012	0,027
13	5	0,03731	0,00492	1,06642	0,00614	1208,974	1208,974	1238,643	1209,055	1223,809	1,32284	7,19511	0,01228	8,89925	1,0019	1,0016	0,036
14	6	0,03833	0,00708	1,09560	0,00750	1238,643	1238,643	1274,212	1238,749	1256,428	1,32136	7,22351	0,01499	8,88005	1,0025	1,0022	0,049
15	7	0,03954	0,00963	1,13005	0,00900	1274,212	1274,212	1316,228	1274,351	1295,22	1,31967	7,25640	0,01799	8,86300	1,0033	1,0029	0,064
16	8	0,04093	0,01257	1,16976	0,01062	1316,228	1316,228	1365,078	1316,406	1340,653	1,31778	7,29373	0,02124	8,85225	1,0042	1,0038	0,082
17	9	0,04250	0,01590	1,21470	0,01235	1365,078	1365,078	1420,96	1365,303	1393,019	1,31570	7,33517	0,02470	8,85032	1,0053	1,0048	0,103
18	10	0,04425	0,01962	1,26485	0,01415	1420,96	1420,96	1483,851	1421,238	1452,406	1,31347	7,38015	0,02830	8,85808	1,0066	1,006	0,128
19	11	0,04619	0,02372	1,32019	0,01599	1483,851	1483,851	1553,489	1484,188	1518,67	1,31114	7,42789	0,03198	8,87474	1,0081	1,0073	0,156
20	12	0,04831	0,02820	1,38069	0,01782	1553,489	1553,489	1629,358	1553,888	1591,424	1,30876	7,47745	0,03563	8,89812	1,0097	1,0089	0,188
21	13	0,05060	0,03306	1,44633	0,01958	1629,358	1629,358	1710,682	1629,82	1670,02	1,30638	7,52782	0,03916	8,92487	1,0116	1,0107	0,224
22	14	0,05308	0,03830	1,51706	0,02123	1710,682	1710,682	1796,442	1711,208	1753,562	1,30404	7,57801	0,04246	8,95078	1,0136	1,0126	0,263
23	15	0,05573	0,04392	1,59285	0,02270	1796,442	1796,442	1885,387	1797,028	1840,915	1,30179	7,62704	0,04540	8,97108	1,0158	1,0147	0,305

24	16	0,05856	0,04990	1,67367	0,02394	1885,387	1885,387	1976,072	1886,029	1930,729	1,29967	7,67409	0,04787	8,98081	1,0182	1,017	0,351
25	17	0,06156	0,05626	1,75948	0,02488	1976,072	1976,072	2066,904	1976,765	2021,488	1,29769	7,71843	0,04976	8,97507	1,0206	1,0194	0,399
26	18	0,06474	0,06298	1,85024	0,02548	2066,904	2066,904	2156,201	2067,642	2111,552	1,29588	7,75950	0,05096	8,94936	1,0232	1,0219	0,448
27	19	0,06808	0,07007	1,94589	0,02570	2156,201	2156,201	2242,26	2156,977	2199,23	1,29425	7,79690	0,05140	8,89975	1,0258	1,0245	0,499
28	20	0,07160	0,07751	2,04640	0,02551	2242,26	2242,26	2323,43	2243,067	2282,845	1,29281	7,83034	0,05103	8,82317	1,0285	1,0272	0,551
29	21	0,07528	0,08531	2,15171	0,02492	2323,43	2323,43	2398,194	2324,262	2360,812	1,29156	7,85969	0,04984	8,71754	1,0312	1,0298	0,602
30	22	0,07913	0,09346	2,26177	0,02393	2398,194	2398,194	2465,236	2399,044	2431,715	1,29049	7,88492	0,04786	8,58187	1,0337	1,0324	0,651
31	23	0,08315	0,10197	2,37653	0,02258	2465,236	2465,236	2523,509	2466,1	2494,372	1,28960	7,90610	0,04515	8,41632	1,0362	1,035	0,699
32	24	0,08733	0,11081	2,49593	0,02091	2523,509	2523,509	2572,281	2524,38	2547,895	1,28888	7,92338	0,04182	8,22216	1,0386	1,0374	0,745
33	25	0,09167	0,11999	2,61992	0,01899	2572,281	2572,281	2611,168	2573,156	2591,724	1,28831	7,93698	0,03799	8,00172	1,0407	1,0396	0,786
34	26	0,09616	0,12951	2,74843	0,01691	2611,168	2611,168	2640,136	2612,042	2625,652	1,28789	7,94715	0,03382	7,75823	1,0427	1,0417	0,824
35	27	0,10081	0,13936	2,88141	0,01474	2640,136	2640,136	2659,489	2641,006	2649,812	1,28760	7,95420	0,02948	7,49561	1,0444	1,0436	0,858
36	28	0,10562	0,14954	3,01878	0,01257	2659,489	2659,489	2669,831	2660,354	2664,66	1,28742	7,95845	0,02514	7,21825	1,046	1,0452	0,888
37	29	0,11058	0,16004	3,16048	0,01047	2669,831	2669,831	2672,005	2670,686	2670,918	1,28735	7,96024	0,02095	6,93076	1,0473	1,0466	0,913
38	30	0,11568	0,17085	3,30644	0,00852	2672,005	2672,005	2667,029	2672,85	2669,517	1,28736	7,95989	0,01704	6,63772	1,0483	1,0478	0,934
39	31	0,12094	0,18197	3,45660	0,00676	2667,029	2667,029	2656,018	2667,862	2661,523	1,28745	7,95775	0,01352	6,34348	1,0492	1,0488	0,951
40	32	0,12634	0,19340	3,61087	0,00523	2656,018	2656,018	2640,113	2656,838	2648,065	1,28760	7,95411	0,01045	6,05193	1,0499	1,0496	0,964
41	33	0,13188	0,20512	3,76919	0,00393	2640,113	2640,113	2620,412	2640,918	2630,262	1,2878	7,94926	0,00786	5,76640	1,0505	1,0502	0,975
42	34	0,13755	0,21715	3,93147	0,00287	2620,412	2620,412	2597,922	2621,202	2609,167	1,288041	7,94346	0,00574	5,48958	1,0509	1,0507	0,983
43	35	0,14337	0,22946	4,09765	0,00204	2597,922	2597,922	2573,52	2598,697	2585,721	1,288311	7,93695	0,00407	5,22348	1,0512	1,051	0,988
44	36	0,14931	0,24205	4,26764	0,00140	2573,52	2573,52	2547,937	2574,28	2560,728	1,288604	7,92990	0,00280	4,96950	1,0514	1,0513	0,992
45	37	0,15539	0,25492	4,44135	0,00093	2547,937	2547,937	2521,751	2548,681	2534,844	1,288913	7,92249	0,00187	4,72844	1,0515	1,0515	0,995
46	38	0,16160	0,26805	4,61872	0,00060	2521,751	2521,751	2495,402	2522,479	2508,577	1,289233	7,91484	0,00120	4,50063	1,0516	1,0516	0,997
47	39	0,16793	0,28146	4,79965	0,00037	2495,402	2495,402	2469,205	2496,115	2482,303	1,28956	7,90704	0,00075	4,28603	1,0517	1,0517	0,998
48	40	0,17438	0,29511	4,98405	0,00022	2469,205	2469,205	2443,373	2469,902	2456,289	1,289889	7,89918	0,00045	4,08431	1,0517	1,0517	0,999

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

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

$\theta$	$\phi$	$\alpha$	$\varepsilon$	$\mu$	$P_y$	$T_y$	$V_a$	$\zeta$	$E_2$	$\gamma$	$\lambda$	$\mu$					
4	40	1	28	1,0524	8,567	1097,024	0,943	0,8100	130,4922	0,0148	0,2934	3,2					
Расчёт процесса сгорания																	
f	f1	Vcr	s	y(f1)	X1-2	Tпред	T1	T2	T2истина	T1-2	k1-2	K1-2	DX1-2	P	m	m1-2	X

0	-4	0,03511	0,0031	1,0425	6,5E-07	1097,024	1097,024	1103,593	1097,024	1100,308			1,3E-06	8,56651	1	1	0
1	-3	0,03449	0,0018	1,0239	1,1E-05	1103,593	1103,593	1108,617	1103,593	1106,105	1,3287	7,0844	2,2E-05	8,77433	1	1	1,29E-06
2	-2	0,03404	0,0008	1,0106	5,3E-05	1108,617	1108,617	1112,304	1108,618	1110,46	1,3283	7,0912	0,00011	8,93019	1	1	2,37E-05
3	-1	0,03377	0,0002	1,0027	0,00015	1112,304	1112,304	1115,038	1112,304	1113,671	1,3281	7,0964	0,00031	9,0312	1	1	0,00013
4	0	0,03368	0	1	0,00034	1115,038	1115,038	1117,395	1115,039	1116,216	1,3279	7,1002	0,00068	9,07757	1	1	0,000436
5	1	0,03377	0,0002	1,0027	0,00064	1117,395	1117,395	1120,134	1117,396	1118,764	1,3277	7,1034	0,00128	9,07286	1,0001	1	0,001112
6	2	0,03404	0,0008	1,0106	0,00109	1120,134	1120,134	1124,197	1120,135	1122,166	1,3275	7,1066	0,00217	9,02378	1,0001	1,0001	0,00239
7	3	0,03449	0,0018	1,0239	0,00171	1124,197	1124,197	1130,688	1124,199	1127,442	1,3273	7,111	0,00342	8,93977	1,0002	1,0002	0,004562
8	4	0,03511	0,0031	1,0425	0,00254	1130,688	1130,688	1140,838	1130,691	1135,763	1,3269	7,1176	0,00507	8,83227	1,0004	1,0003	0,007979
9	5	0,03592	0,0049	1,0664	0,0036	1140,838	1140,838	1155,967	1140,843	1148,402	1,3264	7,1278	0,00719	8,71381	1,0007	1,0005	0,013052
10	6	0,0369	0,0071	1,0956	0,00491	1155,967	1155,967	1177,421	1155,976	1166,694	1,3256	7,1428	0,00981	8,59695	1,001	1,0009	0,020243
11	7	0,03806	0,0096	1,13	0,00649	1177,421	1177,421	1206,502	1177,438	1191,962	1,3245	7,1639	0,01297	8,49333	1,0016	1,0013	0,030057
12	8	0,0394	0,0126	1,1698	0,00834	1206,502	1206,502	1244,38	1206,53	1225,441	1,323	7,1919	0,01667	8,41271	1,0022	1,0019	0,043028
13	9	0,04091	0,0159	1,2147	0,01045	1244,38	1244,38	1292,01	1244,426	1268,195	1,3212	7,2275	0,0209	8,3623	1,0031	1,0027	0,059699
14	10	0,0426	0,0196	1,2648	0,0128	1292,01	1292,01	1350,037	1292,082	1321,023	1,3189	7,2706	0,0256	8,34633	1,0042	1,0036	0,080597
15	11	0,04446	0,0237	1,3202	0,01535	1350,037	1350,037	1418,717	1350,144	1384,377	1,3164	7,3206	0,03071	8,3658	1,0055	1,0048	0,106202
16	12	0,0465	0,0282	1,3807	0,01804	1418,717	1418,717	1497,844	1418,867	1458,281	1,3137	7,3764	0,03607	8,41854	1,0071	1,0063	0,136907
17	13	0,04871	0,0331	1,4463	0,02077	1497,844	1497,844	1586,696	1498,044	1542,27	1,3107	7,4364	0,04154	8,49952	1,0089	1,008	0,17298
18	14	0,05109	0,0383	1,5171	0,02345	1586,696	1586,696	1684,01	1586,951	1635,353	1,3078	7,4986	0,04689	8,60123	1,0111	1,01	0,21452
19	15	0,05365	0,0439	1,5929	0,02594	1684,01	1684,01	1787,987	1684,323	1735,999	1,3048	7,5612	0,05189	8,71425	1,0135	1,0123	0,261413
20	16	0,05637	0,0499	1,6737	0,02813	1787,987	1787,987	1896,338	1788,359	1842,163	1,302	7,6223	0,05626	8,8279	1,0162	1,0148	0,313302
21	17	0,05926	0,0563	1,7595	0,02987	1896,338	1896,338	2006,363	1896,764	1951,35	1,2994	7,6802	0,05974	8,93092	1,0191	1,0176	0,369562
22	18	0,06232	0,063	1,8502	0,03103	2006,363	2006,363	2115,093	2006,841	2060,728	1,297	7,7337	0,06206	9,0122	1,0222	1,0206	0,429298
23	19	0,06554	0,0701	1,9459	0,03152	2115,093	2115,093	2219,452	2115,616	2167,273	1,2949	7,7818	0,06304	9,06151	1,0254	1,0238	0,491361
24	20	0,06892	0,0775	2,0464	0,03126	2219,452	2219,452	2316,464	2220,014	2267,958	1,2931	7,8239	0,06252	9,0702	1,0286	1,027	0,554397
25	21	0,07247	0,0853	2,1517	0,03024	2316,464	2316,464	2403,456	2317,057	2359,96	1,2916	7,8597	0,06048	9,03179	1,0319	1,0303	0,616919
26	22	0,07618	0,0935	2,2618	0,02849	2403,456	2403,456	2478,262	2404,074	2440,859	1,2903	7,8892	0,05697	8,94246	1,035	1,0334	0,677395
27	23	0,08004	0,102	2,3765	0,0261	2478,262	2478,262	2539,379	2478,898	2508,821	1,2893	7,9124	0,05219	8,80128	1,0379	1,0365	0,734369
28	24	0,08406	0,1108	2,4959	0,02321	2539,379	2539,379	2586,069	2540,026	2562,724	1,2886	7,9299	0,04642	8,61025	1,0406	1,0393	0,786563
29	25	0,08824	0,12	2,6199	0,02001	2586,069	2586,069	2618,385	2586,722	2602,227	1,2881	7,9422	0,04001	8,37405	1,043	1,0418	0,832984
30	26	0,09257	0,1295	2,7484	0,01668	2618,385	2618,385	2637,112	2619,039	2627,749	1,2878	7,9498	0,03336	8,09954	1,0451	1,0441	0,872994
31	27	0,09704	0,1394	2,8814	0,01342	2637,112	2637,112	2643,641	2637,763	2640,377	1,2876	7,9534	0,02685	7,79511	1,0468	1,046	0,906351
32	28	0,10167	0,1495	3,0188	0,01041	2643,641	2643,641	2639,782	2644,285	2641,712	1,2876	7,9538	0,02081	7,46988	1,0482	1,0475	0,933198

33	29	0,10644	0,16	3,1605	0,00775	2639,782	2639,782	2627,555	2640,416	2633,669	1,2877	7,9514	0,01551	7,1329	1,0493	1,0488	0,954011
34	30	0,11136	0,1708	3,3064	0,00554	2627,555	2627,555	2608,989	2628,178	2618,272	1,2879	7,9471	0,01108	6,79249	1,0501	1,0497	0,96952
35	31	0,11642	0,182	3,4566	0,00379	2608,989	2608,989	2585,949	2609,599	2597,469	1,2881	7,9412	0,00758	6,45572	1,0507	1,0504	0,980603
36	32	0,12161	0,1934	3,6109	0,00247	2585,949	2585,949	2560,024	2586,545	2572,987	1,2884	7,9342	0,00494	6,12812	1,0511	1,0509	0,988178
37	33	0,12694	0,2051	3,7692	0,00153	2560,024	2560,024	2532,471	2560,606	2546,248	1,2887	7,9265	0,00307	5,81363	1,0513	1,0512	0,993119
38	34	0,13241	0,2171	3,9315	0,0009	2532,471	2532,471	2504,211	2533,038	2518,341	1,2891	7,9184	0,00181	5,51473	1,0515	1,0514	0,996186
39	35	0,13801	0,2295	4,0976	0,0005	2504,211	2504,211	2475,875	2504,763	2490,043	1,2894	7,91	0,00101	5,23265	1,0516	1,0515	0,997993
40	36	0,14373	0,242	4,2676	0,00026	2475,875	2475,875	2447,859	2476,413	2461,867	1,2898	7,9015	0,00053	4,9677	1,0516	1,0516	0,999

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

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
$\theta$	$\phi$	$\alpha$	$\varepsilon$	$\mu$	$P_u$	$T_u$	$V_a$	$\zeta$	$E_2$	$\gamma$	$\lambda$	$\mu$					
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 <sub>1</sub>	V <sub>ст</sub>	s	$\gamma(f_1)$	X1-2	T <sub>пред</sub>	T1	T2	T2истина	T1-2	k1-2	K1-2	DX1-2	P	m	m <sub>1-2</sub>	X
0	-12	0,0497	0,0282	1,3807	7,6E-08	976,1432	976,1432	991,0119	976,1432	983,5776			1,52E-07	5,38154	1	1	0
1	-11	0,0476	0,0237	1,3202	1,5E-06	991,0119	991,0119	1005,423	991,0124	998,2176	1,33698	6,93506	3,06E-06	5,7139	1	1	1,52E-07
2	-10	0,0456	0,0196	1,2648	7,9E-06	1005,423	1005,423	1019,292	1005,426	1012,358	1,33584	6,95528	1,59E-05	6,05064	1	1	3,21E-06
3	-9	0,0438	0,0159	1,2147	2,4E-05	1019,292	1019,292	1032,558	1019,298	1025,925	1,33476	6,97438	4,86E-05	6,3874	1	1	1,91E-05
4	-8	0,0421	0,0126	1,1698	5,7E-05	1032,558	1032,558	1045,197	1032,569	1038,877	1,33376	6,99234	0,000113	6,71916	1	1	6,77E-05
5	-7	0,0407	0,0096	1,13	0,00011	1045,197	1045,197	1057,225	1045,214	1051,211	1,33283	7,00916	0,000222	7,04046	1,00001	1,00001	0,000181
6	-6	0,0395	0,0071	1,0956	0,0002	1057,225	1057,225	1068,707	1057,249	1062,966	1,33196	7,02491	0,000391	7,34553	1,00002	1,00002	0,000403
7	-5	0,0384	0,0049	1,0664	0,00032	1068,707	1068,707	1079,764	1068,739	1074,235	1,33114	7,03968	0,000635	7,62866	1,00004	1,00003	0,000794
8	-4	0,0376	0,0031	1,0425	0,00048	1079,764	1079,764	1090,583	1079,805	1085,174	1,33038	7,05364	0,000969	7,88452	1,00007	1,00006	0,001429
9	-3	0,0369	0,0018	1,0239	0,00071	1090,583	1090,583	1101,418	1090,633	1096,001	1,32965	7,06703	0,001412	8,10856	1,00012	1,0001	0,002398
10	-2	0,0364	0,0008	1,0106	0,00099	1101,418	1101,418	1112,597	1101,479	1107,008	1,32894	7,08012	0,001979	8,29739	1,0002	1,00016	0,00381
11	-1	0,0361	0,0002	1,0027	0,00134	1112,597	1112,597	1124,52	1112,668	1118,559	1,32823	7,09329	0,002689	8,4491	1,0003	1,00025	0,005789
12	0	0,036	0	1	0,00178	1124,52	1124,52	1137,658	1124,604	1131,089	1,3275	7,10693	0,003558	8,56348	1,00044	1,00037	0,008478
13	1	0,0361	0,0002	1,0027	0,0023	1137,658	1137,658	1152,544	1137,756	1145,101	1,32672	7,12154	0,004601	8,64205	1,00062	1,00053	0,012036
14	2	0,0364	0,0008	1,0106	0,00292	1152,544	1152,544	1169,763	1152,659	1161,154	1,32586	7,13761	0,005834	8,68798	1,00086	1,00074	0,016637
15	3	0,0369	0,0018	1,0239	0,00363	1169,763	1169,763	1189,931	1169,897	1179,847	1,3249	7,15566	0,007269	8,70581	1,00116	1,00101	0,022472
16	4	0,0376	0,0031	1,0425	0,00446	1189,931	1189,931	1213,681	1190,09	1201,806	1,32382	7,1762	0,008914	8,70105	1,00154	1,00135	0,02974

17	5	0,0384	0,0049	1,0664	0,00539	1213,681	1213,681	1241,635	1213,87	1227,658	1,3226	7,19969	0,010776	8,67969	1,002	1,00177	0,038654
18	6	0,0395	0,0071	1,0956	0,00643	1241,635	1241,635	1274,377	1241,858	1258,006	1,32121	7,22646	0,012854	8,64771	1,00256	1,00228	0,04943
19	7	0,0407	0,0096	1,13	0,00757	1274,377	1274,377	1312,432	1274,642	1293,404	1,31966	7,25674	0,015145	8,61066	1,00323	1,00289	0,062285
20	8	0,0421	0,0126	1,1698	0,00882	1312,432	1312,432	1356,233	1312,745	1334,332	1,31793	7,2906	0,017634	8,57324	1,00401	1,00362	0,077429
21	9	0,0438	0,0159	1,2147	0,01015	1356,233	1356,233	1406,1	1356,601	1381,166	1,31606	7,32791	0,020301	8,53909	1,00493	1,00447	0,095063
22	10	0,0456	0,0196	1,2648	0,01156	1406,1	1406,1	1462,212	1406,529	1434,156	1,31405	7,36837	0,023118	8,51063	1,00598	1,00545	0,115364
23	11	0,0476	0,0237	1,3202	0,01302	1462,212	1462,212	1524,591	1462,707	1493,402	1,31194	7,4115	0,026045	8,48903	1,00718	1,00658	0,138482
24	12	0,0497	0,0282	1,3807	0,01452	1524,591	1524,591	1593,082	1525,156	1558,837	1,30976	7,45671	0,029033	8,4743	1,00853	1,00785	0,164527
25	13	0,0521	0,0331	1,4463	0,01601	1593,082	1593,082	1667,341	1593,717	1630,211	1,30754	7,50328	0,032024	8,46538	1,01003	1,00928	0,19356
26	14	0,0546	0,0383	1,5171	0,01747	1667,341	1667,341	1746,828	1668,047	1707,085	1,30532	7,55047	0,034949	8,46034	1,01169	1,01086	0,225584
27	15	0,0574	0,0439	1,5929	0,01887	1746,828	1746,828	1830,809	1747,603	1788,819	1,30314	7,59751	0,037734	8,45656	1,0135	1,0126	0,260533
28	16	0,0603	0,0499	1,6737	0,02015	1830,809	1830,809	1918,359	1831,649	1874,584	1,30104	7,64368	0,040296	8,45094	1,01546	1,01448	0,298267
29	17	0,0634	0,0563	1,7595	0,02128	1918,359	1918,359	2008,38	1919,259	1963,37	1,29903	7,68831	0,04255	8,44009	1,01755	1,0165	0,338563
30	18	0,0666	0,063	1,8502	0,02221	2008,38	2008,38	2099,625	2009,334	2054,002	1,29714	7,73084	0,044415	8,42053	1,01975	1,01865	0,381113
31	19	0,0701	0,0701	1,9459	0,02291	2099,625	2099,625	2190,73	2100,627	2145,177	1,29539	7,77079	0,04581	8,3889	1,02205	1,0209	0,425528
32	20	0,0737	0,0775	2,0464	0,02333	2190,73	2190,73	2280,26	2191,773	2235,495	1,29378	7,80779	0,046668	8,34207	1,02443	1,02324	0,471338
33	21	0,0775	0,0853	2,1517	0,02347	2280,26	2280,26	2366,755	2281,337	2323,508	1,29233	7,84156	0,046933	8,27733	1,02685	1,02564	0,518006
34	22	0,0815	0,0935	2,2618	0,02329	2366,755	2366,755	2448,788	2367,859	2407,772	1,29104	7,87194	0,046571	8,19251	1,02928	1,02806	0,564939
35	23	0,0856	0,102	2,3765	0,02278	2448,788	2448,788	2525,022	2449,913	2486,905	1,2899	7,89884	0,045569	8,0861	1,03169	1,03048	0,61151
36	24	0,0899	0,1108	2,4959	0,02197	2525,022	2525,022	2594,268	2526,163	2559,645	1,28892	7,92223	0,043941	7,95729	1,03405	1,03287	0,657079
37	25	0,0944	0,12	2,6199	0,02086	2594,268	2594,268	2655,536	2595,418	2624,902	1,28809	7,94219	0,041728	7,80603	1,03633	1,03519	0,701021
38	26	0,099	0,1295	2,7484	0,0195	2655,536	2655,536	2708,081	2656,691	2681,808	1,28741	7,9588	0,038996	7,63303	1,03849	1,03741	0,742749
39	27	0,1038	0,1394	2,8814	0,01792	2708,081	2708,081	2751,431	2709,237	2729,756	1,28685	7,97225	0,035837	7,43975	1,04051	1,0395	0,781745
40	28	0,1087	0,1495	3,0188	0,01618	2751,431	2751,431	2785,405	2752,584	2768,418	1,28642	7,98271	0,032359	7,22828	1,04237	1,04144	0,817582
41	29	0,1138	0,16	3,1605	0,01434	2785,405	2785,405	2810,115	2786,553	2797,76	1,28611	7,99041	0,028686	7,00126	1,04405	1,04321	0,849941
42	30	0,1191	0,1708	3,3064	0,01247	2810,115	2810,115	2825,939	2811,254	2818,027	1,28589	7,99561	0,024942	6,76175	1,04553	1,04479	0,878627
43	31	0,1245	0,182	3,4566	0,01063	2825,939	2825,939	2833,496	2827,067	2829,717	1,28577	7,99855	0,021253	6,51305	1,04683	1,04618	0,903569
44	32	0,1301	0,1934	3,6109	0,00886	2833,496	2833,496	2833,592	2834,612	2833,544	1,28573	7,9995	0,01773	6,25857	1,04793	1,04738	0,924823
45	33	0,1358	0,2051	3,7692	0,00723	2833,592	2833,592	2827,167	2834,694	2830,38	1,28577	7,99872	0,014465	6,00165	1,04885	1,04839	0,942552
46	34	0,1416	0,2171	3,9315	0,00577	2827,167	2827,167	2815,234	2828,254	2821,201	1,28586	7,99648	0,011531	5,74541	1,0496	1,04922	0,957017
47	35	0,1476	0,2295	4,0976	0,00449	2815,234	2815,234	2798,819	2816,305	2807,026	1,286	7,99302	0,00897	5,49264	1,0502	1,0499	0,968548
48	36	0,1537	0,242	4,2676	0,0034	2798,819	2798,819	2778,908	2799,873	2788,863	1,28618	7,98856	0,006803	5,24574	1,05066	1,05043	0,977518
49	37	0,16	0,2549	4,4414	0,00251	2778,908	2778,908	2756,408	2779,945	2767,658	1,2864	7,98331	0,005024	5,00664	1,05101	1,05084	0,984321

50	38	0,1664	0,2681	4,6187	0,0018	2756,408	2756,408	2732,113	2757,427	2744,26	1,28664	7,97745	0,003608	4,77677	1,05127	1,05114	0,989345
51	39	0,1729	0,2815	4,7996	0,00126	2732,113	2732,113	2706,691	2733,115	2719,402	1,2869	7,97115	0,002517	4,55715	1,05146	1,05137	0,992954
52	40	0,1795	0,2951	4,984	0,00085	2706,691	2706,691	2680,679	2707,675	2693,685	1,28717	7,96454	0,001704	4,34835	1,05159	1,05153	0,995471
53	41	0,1863	0,309	5,1718	0,00056	2680,679	2680,679	2654,49	2681,646	2667,585	1,28745	7,95772	0,001117	4,1506	1,05168	1,05163	0,997175
54	42	0,1932	0,3232	5,3629	0,00035	2654,49	2654,49	2628,426	2655,44	2641,458	1,28774	7,95077	0,000709	3,96386	1,05174	1,05171	0,998292
55	43	0,2002	0,3376	5,5572	0,00022	2628,426	2628,426	2602,697	2629,359	2615,561	1,28803	7,94377	0,000434	3,78787	1,05177	1,05175	0,999

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

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
$\theta$	$\phi$	$\alpha$	$\varepsilon$	$\mu$	$P_u$	$T_u$	$V_a$	$\zeta$	$E_2$	$\gamma$	$\lambda$	$\mu$	$\theta$				
14	58	1	28	1,052	4,607	924,401	1,015	0,97	145,769	0,010	0,293	3,4	14				
Расчёт процесса сгорания																	
f	f1	Vст	s	y(f1)	X1-2	Tпред	T1	T2	T2истина	T1-2	k1-2	K1-2	DX1-2	P	m	m <sub>1-2</sub>	X
0	-14	0,055	0,0383	1,5171	6E-08	924,401	924,4014	939,6	924,401	932,003			1,2E-07	4,60701	1	1	0
1	-13	0,0525	0,0331	1,4463	1,2E-06	939,605	939,6049	954,61	939,606	947,105	1,3413	6,860019	2,42E-06	4,9118	1	1	1,2E-07
2	-12	0,0501	0,0282	1,3807	6,3E-06	954,606	954,6056	969,33	954,609	961,97	1,33998	6,882641	1,26E-05	5,22744	1	1	2,54E-06
3	-11	0,0479	0,0237	1,3202	1,9E-05	969,334	969,3341	983,74	969,343	976,536	1,33873	6,904383	3,85E-05	5,55139	1	1	1,51E-05
4	-10	0,0459	0,0196	1,2648	4,5E-05	983,739	983,7386	997,79	983,755	990,763	1,33754	6,925205	8,95E-05	5,88044	1	1,000002	5,36E-05
5	-9	0,0441	0,0159	1,2147	8,8E-05	997,788	997,7878	1011,5	997,814	1004,63	1,33641	6,945101	0,000176	6,21076	1,00001	1,000005	0,000143
6	-8	0,0424	0,0126	1,1698	0,00015	1011,48	1011,476	1024,8	1011,51	1018,15	1,33534	6,964097	0,00031	6,53797	1,00002	1,000012	0,000319
7	-7	0,041	0,0096	1,13	0,00025	1024,83	1024,829	1037,9	1024,88	1031,37	1,33432	6,982254	0,000503	6,85721	1,00003	1,000025	0,000629
8	-6	0,0397	0,0071	1,0956	0,00038	1037,91	1037,907	1050,8	1037,97	1044,36	1,33335	6,999675	0,000768	7,16334	1,00006	1,000046	0,001131
9	-5	0,0387	0,0049	1,0664	0,00056	1050,81	1050,814	1063,7	1050,9	1057,26	1,33242	7,016505	0,001118	7,45122	1,0001	1,000079	0,001899
10	-4	0,0378	0,0031	1,0425	0,00078	1063,7	1063,701	1076,8	1063,8	1070,24	1,33151	7,032933	0,001568	7,71598	1,00016	1,000128	0,003017
11	-3	0,0371	0,0018	1,0239	0,00107	1076,77	1076,771	1090,3	1076,89	1083,53	1,33062	7,049199	0,002132	7,95333	1,00024	1,000197	0,004586
12	-2	0,0367	0,0008	1,0106	0,00141	1090,28	1090,284	1104,6	1090,42	1097,42	1,32973	7,06559	0,002822	8,15997	1,00035	1,000293	0,006717
13	-1	0,0364	0,0002	1,0027	0,00183	1104,56	1104,556	1120	1104,72	1112,26	1,32882	7,082439	0,003653	8,33378	1,0005	1,000422	0,00954
14	0	0,0363	0	1	0,00232	1119,96	1119,962	1136,9	1120,15	1128,45	1,32786	7,100116	0,004638	8,47409	1,00068	1,00059	0,013193
15	1	0,0364	0,0002	1,0027	0,00289	1136,93	1136,928	1155,9	1137,14	1146,43	1,32685	7,119021	0,005786	8,58168	1,00093	1,000805	0,017831
16	2	0,0367	0,0008	1,0106	0,00355	1155,93	1155,925	1177,5	1156,17	1166,69	1,32576	7,139562	0,007108	8,65877	1,00123	1,001075	0,023617
17	3	0,0371	0,0018	1,0239	0,00431	1177,46	1177,457	1202	1177,74	1189,75	1,32456	7,162134	0,008611	8,70874	1,00159	1,00141	0,030725

18	4	0,0378	0,0031	1,0425	0,00515	1202,04	1202,044	1230,2	1202,38	1216,12	1,32325	7,187092	0,010298	8,73583	1,00204	1,001818	0,039335
19	5	0,0387	0,0049	1,0664	0,00609	1230,21	1230,206	1262,4	1230,59	1246,32	1,32182	7,21472	0,012171	8,74476	1,00258	1,002309	0,049634
20	6	0,0397	0,0071	1,0956	0,00711	1262,44	1262,443	1299,2	1262,88	1280,83	1,32025	7,245206	0,014224	8,74031	1,00321	1,002892	0,061805
21	7	0,041	0,0096	1,13	0,00822	1299,21	1299,211	1340,9	1299,71	1320,05	1,31854	7,278614	0,016447	8,72694	1,00395	1,003576	0,076029
22	8	0,0424	0,0126	1,1698	0,00941	1340,9	1340,899	1387,8	1341,47	1364,36	1,31671	7,314874	0,018826	8,70849	1,0048	1,004372	0,092476
23	9	0,0441	0,0159	1,2147	0,01067	1387,81	1387,813	1440,1	1388,46	1413,98	1,31477	7,353772	0,021336	8,68797	1,00578	1,005287	0,111301
24	10	0,0459	0,0196	1,2648	0,01197	1440,15	1440,15	1498	1440,88	1469,07	1,31275	7,394962	0,023948	8,66744	1,00688	1,00633	0,132637
25	11	0,0479	0,0237	1,3202	0,01331	1497,98	1497,984	1561,2	1498,8	1529,62	1,31066	7,437982	0,026624	8,64798	1,00813	1,007505	0,156585
26	12	0,0501	0,0282	1,3807	0,01466	1561,25	1561,25	1629,7	1562,15	1595,49	1,30853	7,482282	0,02932	8,62976	1,00951	1,008817	0,18321
27	13	0,0525	0,0331	1,4463	0,01599	1629,73	1629,731	1703,1	1630,72	1666,39	1,30641	7,527258	0,031982	8,61211	1,01103	1,010268	0,21253
28	14	0,055	0,0383	1,5171	0,01728	1703,06	1703,055	1780,7	1704,12	1741,87	1,30431	7,572285	0,034552	8,59368	1,01269	1,011859	0,244512
29	15	0,0578	0,0439	1,5929	0,01848	1780,68	1780,685	1861,9	1781,83	1821,31	1,30226	7,61675	0,036966	8,57256	1,01448	1,013585	0,279064
30	16	0,0607	0,0499	1,6737	0,01958	1861,93	1861,927	1945,9	1863,14	1903,93	1,3003	7,660077	0,039156	8,54652	1,0164	1,015441	0,31603
31	17	0,0638	0,0563	1,7595	0,02053	1945,94	1945,935	2031,7	1947,21	1988,83	1,29843	7,701752	0,041054	8,51308	1,01843	1,017416	0,355186
32	18	0,0671	0,063	1,8502	0,0213	2031,73	2031,729	2118,2	2033,06	2074,97	1,29668	7,741331	0,042593	8,46973	1,02056	1,019498	0,39624
33	19	0,0706	0,0701	1,9459	0,02186	2118,21	2118,214	2204,2	2119,59	2161,21	1,29505	7,77845	0,043713	8,41403	1,02277	1,021668	0,438833
34	20	0,0742	0,0775	2,0464	0,02218	2204,21	2204,208	2288,5	2205,62	2246,34	1,29356	7,812825	0,044359	8,34378	1,02504	1,023907	0,482546
35	21	0,078	0,0853	2,1517	0,02225	2288,48	2288,479	2369,8	2289,92	2329,13	1,29222	7,844253	0,044493	8,2571	1,02734	1,026193	0,526905
36	22	0,082	0,0935	2,2618	0,02204	2369,78	2369,782	2446,9	2371,25	2408,34	1,29101	7,872603	0,044088	8,15255	1,02965	1,028498	0,571399
37	23	0,0862	0,102	2,3765	0,02157	2446,91	2446,906	2518,7	2448,39	2482,81	1,28995	7,89781	0,043138	8,02918	1,03194	1,030797	0,615487
38	24	0,0905	0,1108	2,4959	0,02083	2518,71	2518,713	2584,2	2520,21	2551,45	1,28902	7,919872	0,041655	7,8866	1,03418	1,03306	0,658625
39	25	0,095	0,12	2,6199	0,01984	2584,19	2584,191	2642,5	2585,69	2613,34	1,28823	7,938835	0,039673	7,725	1,03634	1,03526	0,70028
40	26	0,0997	0,1295	2,7484	0,01862	2642,49	2642,487	2692,9	2643,99	2667,72	1,28757	7,954791	0,037246	7,54516	1,0384	1,03737	0,739953
41	27	0,1045	0,1394	2,8814	0,01722	2692,94	2692,943	2735,1	2694,44	2714,03	1,28703	7,967871	0,034445	7,34841	1,04033	1,039366	0,777199
42	28	0,1095	0,1495	3,0188	0,01568	2735,13	2735,125	2768,8	2736,61	2751,98	1,28661	7,978235	0,031359	7,13655	1,04212	1,041226	0,811644
43	29	0,1146	0,16	3,1605	0,01404	2768,83	2768,833	2794,1	2770,31	2781,47	1,28628	7,986066	0,028084	6,91183	1,04375	1,042934	0,843003
44	30	0,1199	0,1708	3,3064	0,01236	2794,1	2794,103	2811,2	2795,57	2802,65	1,28606	7,991568	0,024723	6,67681	1,0452	1,044476	0,871087
45	31	0,1254	0,182	3,4566	0,01069	2811,2	2811,2	2820,6	2812,65	2815,9	1,28592	7,994956	0,021377	6,43422	1,04649	1,045846	0,89581
46	32	0,1309	0,1934	3,6109	0,00907	2820,59	2820,591	2822,9	2822,03	2821,75	1,28586	7,996451	0,01814	6,18692	1,0476	1,047043	0,917187
47	33	0,1367	0,2051	3,7692	0,00755	2822,91	2822,913	2818,9	2824,33	2820,92	1,28587	7,996277	0,015095	5,9377	1,04854	1,048068	0,935327
48	34	0,1426	0,2171	3,9315	0,00615	2818,93	2818,931	2809,5	2820,33	2814,21	1,28593	7,994656	0,012306	5,68922	1,04932	1,04893	0,950422
49	35	0,1486	0,2295	4,0976	0,00491	2809,5	2809,496	2795,5	2810,88	2802,49	1,28605	7,991801	0,00982	5,44388	1,04996	1,049641	0,962728
50	36	0,1548	0,242	4,2676	0,00383	2795,49	2795,491	2777,8	2796,85	2786,64	1,28621	7,987916	0,007663	5,20381	1,05047	1,050215	0,972548

51	37	0,1611	0,2549	4,4414	0,00292	2777,79	2777,794	2757,2	2779,13	2767,51	1,2864	7,983189	0,005842	4,97074	1,05087	1,050669	0,980211
52	38	0,1675	0,2681	4,6187	0,00217	2757,23	2757,234	2734,6	2758,55	2745,9	1,28662	7,977793	0,004347	4,74604	1,05117	1,051019	0,986053
53	39	0,1741	0,2815	4,7996	0,00158	2734,57	2734,569	2710,5	2735,87	2722,51	1,28687	7,97188	0,003154	4,53072	1,0514	1,051284	0,9904
54	40	0,1807	0,2951	4,984	0,00111	2710,46	2710,457	2685,5	2711,73	2697,96	1,28713	7,965584	0,002228	4,3254	1,05156	1,051478	0,993554
55	41	0,1876	0,309	5,1718	0,00077	2685,45	2685,454	2660	2686,71	2672,73	1,2874	7,959016	0,001532	4,13042	1,05168	1,051618	0,995782
56	42	0,1945	0,3232	5,3629	0,00051	2660	2660,005	2634,5	2661,24	2647,23	1,28768	7,952268	0,001023	3,94585	1,05176	1,051716	0,997314
57	43	0,2015	0,3376	5,5572	0,00033	2634,46	2634,458	2609,1	2635,67	2621,76	1,28796	7,945414	0,000663	3,77154	1,05181	1,051782	0,998337
58	44	0,2087	0,3522	5,7547	0,00021	2609,07	2609,068	2584	2610,26	2596,54	1,28825	7,938508	0,000417	3,60718	1,05184	1,051826	0,999

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

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
$\theta$	$\phi$	$\alpha$	$\varepsilon$	$\mu$	$P_y$	$T_y$	$V_a$	$\zeta$	$E_2$	$\gamma$	$\lambda$	$\mu$					
16	60	1	28	1,0524	3,8803	895,9785	1,0592	0,8	92,2061	0,0103	0,285	3					
Расчёт процесса сгорания																	
$f$	$f_1$	$V_{ст}$	$s$	$y(f_1)$	X1-2	$T_{пред}$	$T_1$	$T_2$	$T_{истина}$	$T_{1-2}$	$k_{1-2}$	$K_{1-2}$	$D_{X1-2}$	$P$	$m$	$m_{1-2}$	$X$
0	-16	0,0633	0,0499	1,6737	2,67E-07	895,98	895,98	911,39	895,98	903,68			5,33E-07	3,880252	1	1	0
1	-15	0,0603	0,04392	1,5929	4E-06	911,39	911,39	926,81	911,39	919,10	1,344	6,82	8E-06	4,147249	1	1	5,33E-07
2	-14	0,0574	0,0383	1,5171	1,73E-05	926,81	926,81	942,23	926,82	934,52	1,342	6,84	3,46E-05	4,428175	1	1	8,53E-06
3	-13	0,0547	0,03306	1,4463	4,66E-05	942,23	942,23	957,64	942,24	949,94	1,341	6,86	9,33E-05	4,722058	1,000002	1,000001	4,32E-05
4	-12	0,0522	0,0282	1,3807	9,83E-05	957,64	957,64	973,04	957,66	965,34	1,340	6,89	0,000197	5,027485	1,000007	1,000005	0,000136
5	-11	0,0499	0,02372	1,3202	0,000179	973,04	973,04	988,44	973,07	980,74	1,338	6,91	0,000357	5,342533	1,000017	1,000012	0,000333
6	-10	0,0478	0,01962	1,2648	0,000294	988,44	988,44	1003,87	988,49	996,15	1,337	6,93	0,000588	5,664716	1,000036	1,000027	0,000691
7	-9	0,0459	0,0159	1,2147	0,000451	1003,87	1003,87	1019,37	1003,94	1011,62	1,336	6,95	0,000902	5,990952	1,000066	1,000051	0,001279
8	-8	0,0442	0,01257	1,1698	0,000655	1019,37	1019,37	1035,00	1019,47	1027,18	1,335	6,97	0,00131	6,317565	1,000113	1,00009	0,002181
9	-7	0,0427	0,00963	1,13	0,000912	1035,00	1035,00	1050,82	1035,12	1042,91	1,334	6,99	0,001825	6,640334	1,000181	1,000147	0,003491
10	-6	0,0414	0,00708	1,0956	0,001229	1050,82	1050,82	1066,93	1050,97	1058,87	1,332	7,02	0,002458	6,954599	1,000276	1,000229	0,005316
11	-5	0,0403	0,00492	1,0664	0,001609	1066,93	1066,93	1083,43	1067,11	1075,18	1,331	7,04	0,003218	7,255423	1,000403	1,00034	0,007774
12	-4	0,0394	0,00315	1,0425	0,002058	1083,43	1083,43	1100,45	1083,64	1091,94	1,330	7,06	0,004116	7,537823	1,00057	1,000487	0,010992
13	-3	0,0387	0,00177	1,0239	0,00258	1100,45	1100,45	1118,14	1100,70	1109,30	1,329	7,08	0,00516	7,797031	1,000784	1,000677	0,015108
14	-2	0,0382	0,00079	1,0106	0,003178	1118,14	1118,14	1136,69	1118,44	1127,42	1,328	7,10	0,006355	8,028787	1,001052	1,000918	0,020268
15	-1	0,0379	0,0002	1,0027	0,003853	1136,69	1136,69	1156,27	1137,03	1146,48	1,327	7,12	0,007706	8,229614	1,001382	1,001217	0,026624

16	0	0,0378	0	1	0,004607	1156,27	1156,27	1177,11	1156,66	1166,69	1,326	7,14	0,009213	8,397046	1,001782	1,001582	0,034329
17	1	0,0379	0,0002	1,0027	0,005438	1177,11	1177,11	1199,43	1177,55	1188,27	1,325	7,16	0,010876	8,529773	1,00226	1,002021	0,043542
18	2	0,0382	0,00079	1,0106	0,006344	1199,43	1199,43	1223,43	1199,92	1211,43	1,323	7,19	0,012688	8,627684	1,002824	1,002542	0,054418
19	3	0,0387	0,00177	1,0239	0,007321	1223,43	1223,43	1249,35	1223,99	1236,39	1,322	7,21	0,014642	8,691797	1,003483	1,003153	0,067107
20	4	0,0394	0,00315	1,0425	0,008361	1249,35	1249,35	1277,36	1249,97	1263,35	1,321	7,24	0,016723	8,724091	1,004242	1,003863	0,081748
21	5	0,0403	0,00492	1,0664	0,009456	1277,36	1277,36	1307,62	1278,04	1292,49	1,319	7,26	0,018912	8,727263	1,00511	1,004676	0,098471
22	6	0,0414	0,00708	1,0956	0,010594	1307,62	1307,62	1340,25	1308,38	1323,94	1,318	7,29	0,021187	8,704454	1,006092	1,005601	0,117383
23	7	0,0427	0,00963	1,13	0,01176	1340,25	1340,25	1375,30	1341,08	1357,78	1,316	7,32	0,02352	8,658967	1,007191	1,006642	0,138571
24	8	0,0442	0,01257	1,1698	0,012938	1375,30	1375,30	1412,75	1376,20	1394,03	1,315	7,35	0,025876	8,59402	1,008412	1,007802	0,16209
25	9	0,0459	0,0159	1,2147	0,014109	1412,75	1412,75	1452,52	1413,73	1432,63	1,313	7,38	0,028217	8,51255	1,009755	1,009083	0,187966
26	10	0,0478	0,01962	1,2648	0,015251	1452,52	1452,52	1494,43	1453,57	1473,47	1,312	7,41	0,030502	8,417088	1,011219	1,010487	0,216183
27	11	0,0499	0,02372	1,3202	0,016342	1494,43	1494,43	1538,23	1495,56	1516,33	1,310	7,44	0,032684	8,309685	1,012802	1,012011	0,246685
28	12	0,0522	0,0282	1,3807	0,017357	1538,23	1538,23	1583,60	1539,43	1560,91	1,309	7,48	0,034715	8,191905	1,014498	1,01365	0,279368
29	13	0,0547	0,03306	1,4463	0,018273	1583,60	1583,60	1630,12	1584,87	1606,86	1,307	7,51	0,036546	8,064857	1,0163	1,015399	0,314083
30	14	0,0574	0,0383	1,5171	0,019064	1630,12	1630,12	1677,33	1631,45	1653,72	1,306	7,54	0,038128	7,92926	1,018196	1,017248	0,350628
31	15	0,0603	0,04392	1,5929	0,019708	1677,33	1677,33	1724,69	1678,72	1701,01	1,305	7,57	0,039416	7,78553	1,020175	1,019186	0,388756
32	16	0,0633	0,0499	1,6737	0,020183	1724,69	1724,69	1771,63	1726,12	1748,16	1,303	7,60	0,040367	7,633865	1,022221	1,021198	0,428172
33	17	0,0666	0,05626	1,7595	0,020473	1771,63	1771,63	1817,55	1773,11	1794,59	1,302	7,62	0,040946	7,474342	1,024316	1,023268	0,468539
34	18	0,07	0,06298	1,8502	0,020564	1817,55	1817,55	1861,85	1819,07	1839,70	1,301	7,65	0,041127	7,306998	1,02644	1,025378	0,509485
35	19	0,0736	0,07007	1,9459	0,020446	1861,85	1861,85	1903,93	1863,40	1882,89	1,300	7,67	0,040893	7,131905	1,028575	1,027508	0,550613
36	20	0,0774	0,07751	2,0464	0,020119	1903,93	1903,93	1943,22	1905,50	1923,57	1,299	7,69	0,040237	6,949226	1,030697	1,029636	0,591505
37	21	0,0814	0,08531	2,1517	0,019584	1943,22	1943,22	1979,22	1944,81	1961,22	1,298	7,71	0,039169	6,759266	1,032785	1,031741	0,631743
38	22	0,0856	0,09346	2,2618	0,018853	1979,22	1979,22	2011,48	1980,83	1995,35	1,297	7,73	0,037707	6,562494	1,034818	1,033802	0,670912
39	23	0,0899	0,10197	2,3765	0,017942	2011,48	2011,48	2039,63	2013,09	2025,55	1,297	7,74	0,035884	6,359564	1,036775	1,035796	0,708618
40	24	0,0944	0,11081	2,4959	0,016873	2039,63	2039,63	2063,39	2041,23	2051,51	1,296	7,75	0,033746	6,151307	1,038637	1,037706	0,744503
41	25	0,0991	0,11999	2,6199	0,015674	2063,39	2063,39	2082,60	2064,99	2072,99	1,296	7,76	0,031348	5,938726	1,040388	1,039513	0,778249
42	26	0,104	0,12951	2,7484	0,014375	2082,60	2082,60	2097,19	2084,19	2089,89	1,295	7,77	0,028751	5,722966	1,042015	1,041202	0,809597
43	27	0,109	0,13936	2,8814	0,013012	2097,19	2097,19	2107,21	2098,78	2102,20	1,295	7,78	0,026023	5,505282	1,043507	1,042761	0,838347
44	28	0,1142	0,14954	3,0188	0,011617	2107,21	2107,21	2112,79	2108,78	2110,00	1,295	7,78	0,023234	5,287001	1,044858	1,044183	0,86437
45	29	0,1196	0,16004	3,1605	0,010226	2112,79	2112,79	2114,16	2114,34	2113,48	1,295	7,78	0,020453	5,069476	1,046064	1,045461	0,887605
46	30	0,1251	0,17085	3,3064	0,008871	2114,16	2114,16	2111,64	2115,69	2112,90	1,295	7,78	0,017742	4,854045	1,047125	1,046594	0,908058
47	31	0,1308	0,18197	3,4566	0,007579	2111,64	2111,64	2105,58	2113,15	2108,61	1,295	7,78	0,015159	4,641985	1,048046	1,047585	0,9258
48	32	0,1366	0,1934	3,6109	0,006375	2105,58	2105,58	2096,39	2107,06	2100,98	1,295	7,78	0,012749	4,434476	1,048832	1,048439	0,940959

49	33	0,1426	0,20512	3,7692	0,005275	2096,39	2096,39	2084,52	2097,85	2090,45	1,295	7,77	0,010549	4,232568	1,049494	1,049163	0,953708
50	34	0,1487	0,21715	3,9315	0,004292	2084,52	2084,52	2070,39	2085,95	2077,45	1,296	7,77	0,008583	4,037159	1,050042	1,049768	0,964257
51	35	0,155	0,22946	4,0976	0,003431	2070,39	2070,39	2054,45	2071,80	2062,42	1,296	7,76	0,006863	3,848976	1,050487	1,050264	0,97284
52	36	0,1614	0,24205	4,2676	0,002694	2054,45	2054,45	2037,09	2055,83	2045,77	1,296	7,76	0,005389	3,668572	1,050843	1,050665	0,979703
53	37	0,168	0,25492	4,4414	0,002077	2037,09	2037,09	2018,69	2038,44	2027,89	1,296	7,75	0,004153	3,496327	1,051123	1,050983	0,985091
54	38	0,1747	0,26805	4,6187	0,00157	2018,69	2018,69	1999,57	2020,01	2009,13	1,297	7,74	0,00314	3,332453	1,051338	1,051231	0,989245
55	39	0,1816	0,28146	4,7996	0,001163	1999,57	1999,57	1980,03	2000,87	1989,80	1,297	7,73	0,002326	3,177018	1,051501	1,05142	0,992384
56	40	0,1885	0,29511	4,984	0,000844	1980,03	1980,03	1960,30	1981,30	1970,17	1,298	7,72	0,001689	3,029958	1,051622	1,051562	0,99471
57	41	0,1956	0,30903	5,1718	0,0006	1960,30	1960,30	1940,56	1961,54	1950,43	1,298	7,71	0,0012	2,891099	1,05171	1,051666	0,996399
58	42	0,2029	0,32318	5,3629	0,000417	1940,56	1940,56	1920,97	1941,78	1930,77	1,298	7,70	0,000834	2,760185	1,051772	1,051741	0,997599
59	43	0,2102	0,33757	5,5572	0,000283	1920,97	1920,97	1901,64	1922,16	1911,30	1,299	7,70	0,000567	2,636896	1,051815	1,051794	0,998433
60	44	0,2177	0,3522	5,7547	0,000188	1901,64	1901,64	1882,64	1902,80	1892,14	1,299	7,69	0,000376	2,520868	1,051845	1,05183	0,999

ПРИЛОЖЕНИЕ Б  
(обязательное)

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

$\varphi_{кв}$ , град	$\varphi_{кв}$ , рад	$S_x$ , мм	$V_x$ , м/с	$W_{x1}$ , м/с <sup>2</sup>	$W_{x2}$ , м/с <sup>2</sup>	$W_x$ , м/с <sup>2</sup>
0	0	0	0	14804,41	4094,139	18898,5
10	0,1745	0,7261	5,206	14579,49	3847,2322	18426,7
20	0,3491	2,8681	10,15	13911,59	3136,2924	17047,9
30	0,5236	6,3204	14,6	12820,99	2047,0695	14868,1
40	0,6981	10,916	18,35	11340,83	710,93978	12051,8
50	0,8727	16,438	21,26	9516,089	-710,9398	8805,15
60	1,0472	22,639	23,23	7402,203	-2047,069	5355,13
70	1,2217	29,253	24,24	5063,405	-3136,292	1927,11
80	1,3963	36,017	24,32	2570,758	-3847,232	-1276,47
90	1,5708	42,685	23,56	9,07E-13	-4094,139	-4094,14
100	1,7453	49,041	22,09	-2570,76	-3847,232	-6417,99
110	1,9199	54,904	20,05	-5063,41	-3136,292	-8199,7
120	2,0944	60,139	17,58	-7402,2	-2047,069	-9449,27
130	2,2689	64,647	14,84	-9516,09	-710,9398	-10227
140	2,4435	68,369	11,94	-11340,8	710,93978	-10629,9
150	2,618	71,272	8,959	-12821	2047,0695	-10773,9
160	2,7925	73,345	5,964	-13911,6	3136,2924	-10775,3
170	2,9671	74,587	2,977	-14579,5	3847,2322	-10732,3
180	3,1416	75	2E-15	-14804,4	4094,139	-10710,3
190	3,3161	74,587	-2,977	-14579,5	3847,2322	-10732,3
200	3,4907	73,345	-5,964	-13911,6	3136,2924	-10775,3
210	3,6652	71,272	-8,959	-12821	2047,0695	-10773,9
220	3,8397	68,369	-11,94	-11340,8	710,93978	-10629,9
230	4,0143	64,647	-14,84	-9516,09	-710,9398	-10227
240	4,1888	60,139	-17,58	-7402,2	-2047,069	-9449,27
250	4,3633	54,904	-20,05	-5063,41	-3136,292	-8199,7
260	4,5379	49,041	-22,09	-2570,76	-3847,232	-6417,99
270	4,7124	42,685	-23,56	-2,7E-12	-4094,139	-4094,14
280	4,8869	36,017	-24,32	2570,758	-3847,232	-1276,47
290	5,0615	29,253	-24,24	5063,405	-3136,292	1927,11
300	5,236	22,639	-23,23	7402,203	-2047,069	5355,13
310	5,4105	16,438	-21,26	9516,089	-710,9398	8805,15
320	5,5851	10,916	-18,35	11340,83	710,93978	12051,8
330	5,7596	6,3204	-14,6	12820,99	2047,0695	14868,1
340	5,9341	2,8681	-10,15	13911,59	3136,2924	17047,9
350	6,1087	0,7261	-5,206	14579,49	3847,2322	18426,7
360	6,2832	3E-31	-7E-15	14804,41	4094,139	18898,5
370	6,4577	0,7261	5,206	14579,49	3847,2322	18426,7
380	6,6323	2,8681	10,15	13911,59	3136,2924	17047,9
390	6,8068	6,3204	14,6	12820,99	2047,0695	14868,1
400	6,9813	10,916	18,35	11340,83	710,93978	12051,8
410	7,1558	16,438	21,26	9516,089	-710,9398	8805,15
420	7,3304	22,639	23,23	7402,203	-2047,069	5355,13
430	7,5049	29,253	24,24	5063,405	-3136,292	1927,11
440	7,6794	36,017	24,32	2570,758	-3847,232	-1276,47
450	7,854	42,685	23,56	4,53E-12	-4094,139	-4094,14

460	8,0285	49,041	22,09	-2570,76	-3847,232	-6417,99
470	8,203	54,904	20,05	-5063,41	-3136,292	-8199,7
480	8,3776	60,139	17,58	-7402,2	-2047,069	-9449,27
490	8,5521	64,647	14,84	-9516,09	-710,9398	-10227
500	8,7266	68,369	11,94	-11340,8	710,93978	-10629,9
510	8,9012	71,272	8,959	-12821	2047,0695	-10773,9
520	9,0757	73,345	5,964	-13911,6	3136,2924	-10775,3
530	9,2502	74,587	2,977	-14579,5	3847,2322	-10732,3
540	9,4248	75	6E-15	-14804,4	4094,139	-10710,3
550	9,5993	74,587	-2,977	-14579,5	3847,2322	-10732,3
560	9,7738	73,345	-5,964	-13911,6	3136,2924	-10775,3
570	9,9484	71,272	-8,959	-12821	2047,0695	-10773,9
580	10,123	68,369	-11,94	-11340,8	710,93978	-10629,9
590	10,297	64,647	-14,84	-9516,09	-710,9398	-10227
600	10,472	60,139	-17,58	-7402,2	-2047,069	-9449,27
610	10,647	54,904	-20,05	-5063,41	-3136,292	-8199,7
620	10,821	49,041	-22,09	-2570,76	-3847,232	-6417,99
630	10,996	42,685	-23,56	-6,3E-12	-4094,139	-4094,14
640	11,17	36,017	-24,32	2570,758	-3847,232	-1276,47
650	11,345	29,253	-24,24	5063,405	-3136,292	1927,11
660	11,519	22,639	-23,23	7402,203	-2047,069	5355,13
670	11,694	16,438	-21,26	9516,089	-710,9398	8805,15
680	11,868	10,916	-18,35	11340,83	710,93978	12051,8
690	12,043	6,3204	-14,6	12820,99	2047,0695	14868,1
700	12,217	2,8681	-10,15	13911,59	3136,2924	17047,9
710	12,392	0,7261	-5,206	14579,49	3847,2322	18426,7
720	12,566	1E-30	-1E-14	14804,41	4094,139	18898,5

ПРИЛОЖЕНИЕ В  
(обязательное)

Таблица В1 - Сводная таблица динамического расчета двигателя.

$\varphi^\circ$	$\Delta p_r$ , МПа	$W$ , м/с <sup>2</sup>	$P_j$ , МПа	$p$ , МПа	$\text{tg}\beta$	$P_N$ , МПа	$1/\cos\beta$	$P_s$ , МПа	$\cos(\beta+\varphi)/\cos\beta$	$P_k$ , МПа	$\sin(\beta+\varphi)/\cos\beta$	$p_T$ , МПа	$T$ , кН	$M_{\text{кр.ц}}$ , Нм
0	0,0128	21539	-2,542	-2,5288	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	-0,5564	-3,46144	-166,842
20	-0,0072	19379	-2,287	-2,294	0,1029	-0,236	1,0053	-2,306	0,904474	-2,075	0,438741	-1,00646	-6,26135	-301,797
30	-0,0092	16838	-1,987	-1,9962	0,1514	-0,302	1,0113	-2,019	0,790277	-1,578	0,631072	-1,25973	-7,83695	-377,741
40	-0,0122	13562	-1,6	-1,6126	0,1961	-0,316	1,0189	-1,643	0,639878	-1,032	0,79287	-1,27857	-7,95415	-383,39
50	-0,0152	9796	-1,156	-1,1712	0,2355	-0,276	1,027	-1,203	0,462126	-0,541	0,917162	-1,07418	-6,68264	-322,103
60	-0,0182	5811	-0,686	-0,7039	0,2683	-0,189	1,0348	-0,728	0,267354	-0,188	0,999645	-0,70363	-4,37741	-210,991
70	-0,0212	1872	-0,221	-0,2422	0,2929	-0,071	1,0412	-0,252	0,066479	-0,016	1,039078	-0,25163	-1,56541	-75,453
80	-0,0232	-1780	0,21	0,1868	0,3082	0,0576	1,0454	0,1953	-0,13008	-0,024	1,037314	0,193745	1,205316	58,09622
90	-0,0232	-4957	0,5849	0,5617	0,3134	0,176	1,0469	0,588	-0,31342	-0,176	0,998899	0,561049	3,490363	168,2355
100	-0,0194	-7535	0,8892	0,8697	0,3082	0,2681	1,0454	0,9093	-0,47701	-0,415	0,930268	0,809097	5,033509	242,6151
110	-0,0194	-9464	1,1167	1,0973	0,2929	0,3214	1,0412	1,1425	-0,61698	-0,677	0,838712	0,920335	5,725531	275,9706
120	-0,0194	-10762	1,2699	1,2505	0,2683	0,3355	1,0348	1,294	-0,73204	-0,915	0,731358	0,914534	5,689444	274,2312
130	-0,0194	-11508	1,358	1,3386	0,2355	0,3153	1,027	1,3747	-0,82298	-1,102	0,614368	0,822375	5,116112	246,5966
140	-0,0184	-11827	1,3956	1,3772	0,1961	0,27	1,0189	1,4032	-0,89194	-1,228	0,492477	0,678246	4,219466	203,3783
150	-0,0174	-11865	1,4	1,3826	0,1514	0,2093	1,0113	1,3983	-0,94166	-1,302	0,368864	0,509991	3,172723	152,9252
160	-0,0164	-11765	1,3882	1,3718	0,1029	0,1412	1,0053	1,3791	-0,97488	-1,337	0,24529	0,336495	2,09338	100,9009
170	-0,0144	-11650	1,3747	1,3603	0,0521	0,0708	1,0014	1,3622	-0,99385	-1,352	0,122382	0,166477	1,035679	49,91974
180	-0,0124	-11602	1,3691	1,3566	4E-17	5E-17	1	1,3566	-1	-1,357	1,23E-16	1,66E-16	1,03E-15	4,98E-14
190	-0,0104	-11649	1,3746	1,3642	-0,052	-0,071	1,0014	1,366	-0,99385	-1,356	-0,12238	-0,16695	-1,03861	-50,0611
200	-0,0084	-11762	1,388	1,3795	-0,103	-0,142	1,0053	1,3868	-0,97488	-1,345	-0,24529	-0,33838	-2,10514	-101,468
210	-0,0064	-11861	1,3996	1,3932	-0,151	-0,211	1,0113	1,4089	-0,94166	-1,312	-0,36886	-0,51388	-3,19695	-154,093
220	-0,0044	-11822	1,395	1,3906	-0,196	-0,273	1,0189	1,4169	-0,89194	-1,24	-0,49248	-0,68485	-4,26055	-205,358
230	-0,0024	-11502	1,3573	1,3549	-0,236	-0,319	1,027	1,3915	-0,82298	-1,115	-0,61437	-0,83239	-5,17841	-249,599

240	0,0071	-10754	1,269	1,2761	-0,268	-0,342	1,0348	1,3205	-0,73204	-0,934	-0,73136	-0,93331	-5,80628	-279,863
250	0,0205	-9455	1,1157	1,1362	-0,293	-0,333	1,0412	1,183	-0,61698	-0,701	-0,83871	-0,95292	-5,92827	-285,743
260	0,0393	-7525	0,888	0,9273	-0,308	-0,286	1,0454	0,9694	-0,47701	-0,442	-0,93027	-0,86262	-5,36645	-258,663
270	0,0664	-4946	0,5836	0,65	-0,313	-0,204	1,0469	0,6805	-0,31342	-0,204	-0,9989	-0,64927	-4,0392	-194,689
280	0,1066	-1767	0,2085	0,3152	-0,308	-0,097	1,0454	0,3295	-0,13008	-0,041	-1,03731	-0,32693	-2,03385	-98,0314
290	0,1686	1886	-0,223	-0,0539	-0,293	0,0158	1,0412	-0,056	0,066479	-0,004	-1,03908	0,056036	0,348606	16,8028
300	0,2691	5826	-0,687	-0,4184	-0,268	0,1122	1,0348	-0,433	0,267354	-0,112	-0,99964	0,418211	2,60175	125,4044
310	0,4423	9813	-1,158	-0,7156	-0,236	0,1685	1,027	-0,735	0,462126	-0,331	-0,91716	0,656292	4,082884	196,795
320	0,7651	13580	-1,602	-0,8373	-0,196	0,1642	1,0189	-0,853	0,639878	-0,536	-0,79287	0,66384	4,129843	199,0584
330	1,4212	16857	-1,989	-0,5679	-0,151	0,086	1,0113	-0,574	0,790277	-0,449	-0,63107	0,35839	2,229596	107,4665
331	1,5187	17148	-2,023	-0,5048	-0,147	0,074	1,0106	-0,51	0,803455	-0,406	-0,61308	0,309476	1,925296	92,79928
332	1,6241	17432	-2,057	-0,4328	-0,142	0,0614	1,01	-0,437	0,816261	-0,353	-0,59478	0,257436	1,601542	77,19434
333	1,7381	17707	-2,089	-0,3513	-0,137	0,0482	1,0093	-0,355	0,828688	-0,291	-0,5762	0,202413	1,25924	60,69536
334	1,8616	17975	-2,121	-0,2594	-0,132	0,0343	1,0087	-0,262	0,840729	-0,218	-0,55734	0,144597	0,89956	43,35879
335	1,9951	18234	-2,152	-0,1565	-0,128	0,02	1,0081	-0,158	0,852376	-0,133	-0,5382	0,084227	0,523986	25,2561
336	3,7803	18485	-2,181	1,5991	-0,123	-0,196	1,0075	1,611	0,863622	1,381	-0,5188	-0,8296	-5,16103	-248,762
337	4,0472	18727	-2,21	1,8375	-0,118	-0,216	1,0069	1,8502	0,874462	1,607	-0,49914	-0,91717	-5,70587	-275,023
338	4,3282	18960	-2,237	2,0909	-0,113	-0,236	1,0063	2,1041	0,884888	1,85	-0,47924	-1,00205	-6,23387	-300,472
339	4,6221	19184	-2,264	2,3583	-0,108	-0,254	1,0058	2,372	0,894894	2,11	-0,4591	-1,08272	-6,73574	-324,663
340	4,9275	19399	-2,289	2,6384	-0,103	-0,272	1,0053	2,6523	0,904474	2,386	-0,43874	-1,15757	-7,20139	-347,107
341	5,2425	19605	-2,313	2,9292	-0,098	-0,287	1,0048	2,9431	0,913624	2,676	-0,41816	-1,22487	-7,62007	-367,287
342	5,5647	19801	-2,337	3,2282	-0,093	-0,3	1,0043	3,2421	0,922337	2,977	-0,39738	-1,28282	-7,98059	-384,664
343	5,8910	19987	-2,359	3,5324	-0,088	-0,31	1,0038	3,546	0,930608	3,287	-0,3764	-1,3296	-8,27164	-398,693
344	6,2176	20164	-2,379	3,8382	-0,083	-0,318	1,0034	3,8513	0,938433	3,602	-0,35523	-1,36345	-8,48224	-408,844
345	6,5403	20330	-2,399	4,1413	-0,078	-0,322	1,003	4,1538	0,945806	3,917	-0,33389	-1,38274	-8,60224	-414,628
346	6,8546	20487	-2,417	4,4371	-0,073	-0,322	1,0026	4,4488	0,952725	4,227	-0,31238	-1,38608	-8,62298	-415,628
347	7,1554	20633	-2,435	4,7207	-0,067	-0,319	1,0023	4,7314	0,959184	4,528	-0,29072	-1,3724	-8,53789	-411,526
348	7,4378	20769	-2,451	4,9871	-0,062	-0,311	1,0019	4,9968	0,965179	4,813	-0,26891	-1,34109	-8,34312	-402,138
349	7,6970	20894	-2,466	5,2315	-0,057	-0,299	1,0016	5,24	0,970708	5,078	-0,24698	-1,29205	-8,038	-387,431
350	7,9288	21009	-2,479	5,4497	-0,052	-0,284	1,0014	5,4571	0,975767	5,318	-0,22491	-1,22571	-7,62532	-367,54
351	8,1296	21114	-2,491	5,6382	-0,047	-0,264	1,0011	5,6444	0,980353	5,527	-0,20274	-1,1431	-7,11139	-342,769

352	8,2970	21207	-2,502	5,7946	-0,042	-0,242	1,0009	5,7997	0,984464	5,705	-0,18047	-1,04575	-6,50575	-313,577
353	8,4298	21290	-2,512	5,9176	-0,037	-0,216	1,0007	5,9215	0,988097	5,847	-0,15811	-0,93561	-5,82056	-280,551
354	8,5277	21361	-2,521	6,007	-0,031	-0,188	1,0005	6,01	0,991249	5,954	-0,13567	-0,81495	-5,06991	-244,37
355	8,5918	21422	-2,528	6,064	-0,026	-0,158	1,0003	6,066	0,99392	6,027	-0,11316	-0,68619	-4,26886	-205,759
356	8,6241	21472	-2,534	6,0904	-0,021	-0,127	1,0002	6,0917	0,996107	6,067	-0,09059	-0,55175	-3,43252	-165,447
357	8,6273	21511	-2,538	6,089	-0,016	-0,095	1,0001	6,0897	0,997809	6,076	-0,06798	-0,41396	-2,57528	-124,129
358	8,6045	21539	-2,542	6,0629	-0,01	-0,063	1,0001	6,0632	0,999026	6,057	-0,04534	-0,2749	-1,71021	-82,4319
359	8,5590	21555	-2,544	6,0154	-0,005	-0,031	1	6,0155	0,999757	6,014	-0,02268	-0,13641	-0,84862	-40,9035
360	8,4940	21561	-2,544	5,9498	-7E-17	-4E-16	1	5,9498	1	5,95	-2,5E-16	-1,5E-15	-9,1E-15	-4,4E-13
361	8,4126	21556	-2,544	5,869	0,0052	0,0307	1	5,8691	0,999757	5,868	0,022677	0,133089	0,827963	39,90779
362	8,3171	21539	-2,542	5,7755	0,0104	0,0603	1,0001	5,7758	0,999026	5,77	0,045342	0,261871	1,629138	78,52446
363	8,2097	21511	-2,538	5,6713	0,0157	0,0889	1,0001	5,672	0,997809	5,659	0,067985	0,385565	2,398651	115,615
364	8,0919	21473	-2,534	5,5581	0,0209	0,1161	1,0002	5,5593	0,996107	5,536	0,090594	0,503532	3,132544	150,9886
365	7,9649	21423	-2,528	5,437	0,0261	0,1419	1,0003	5,4388	0,99392	5,404	0,113158	0,615234	3,827457	184,4835
366	7,8293	21362	-2,521	5,3085	0,0313	0,1662	1,0005	5,3111	0,991249	5,262	0,135666	0,720185	4,480373	215,954
367	7,6855	21291	-2,512	5,1732	0,0365	0,1889	1,0007	5,1767	0,988097	5,112	0,158107	0,817924	5,088421	245,2619
368	7,5339	21208	-2,503	5,0313	0,0417	0,2098	1,0009	5,0357	0,984464	4,953	0,180469	0,907997	5,648775	272,2709
369	7,3743	21115	-2,492	4,8828	0,0469	0,2289	1,0011	4,8882	0,980353	4,787	0,202742	0,98995	6,158615	296,8452
370	7,2070	21011	-2,479	4,7277	0,0521	0,2461	1,0014	4,7341	0,975767	4,613	0,224914	1,063337	6,61517	318,8512
371	7,0319	20896	-2,466	4,5662	0,0572	0,2613	1,0016	4,5737	0,970708	4,432	0,246975	1,127736	7,015802	338,1617
372	6,8492	20771	-2,451	4,3983	0,0624	0,2743	1,0019	4,4068	0,965179	4,245	0,268914	1,182763	7,358134	354,6621
373	6,6593	20635	-2,435	4,2244	0,0675	0,2851	1,0023	4,234	0,959184	4,052	0,290719	1,228102	7,640195	368,2574
374	6,4625	20489	-2,418	4,0448	0,0726	0,2937	1,0026	4,0555	0,952725	3,854	0,312381	1,263527	7,860578	378,8799
375	6,2596	20332	-2,399	3,8603	0,0777	0,3	1,003	3,872	0,945806	3,651	0,333888	1,288924	8,018574	386,4953
376	6,0513	20166	-2,38	3,6717	0,0828	0,304	1,0034	3,6843	0,938433	3,446	0,35523	1,30431	8,114297	391,1091
377	5,8387	19989	-2,359	3,48	0,0879	0,3058	1,0038	3,4934	0,930608	3,238	0,376397	1,30985	8,148763	392,7704
378	5,6230	19803	-2,337	3,2862	0,0929	0,3053	1,0043	3,3003	0,922337	3,031	0,397378	1,30586	8,123937	391,5738
379	5,4053	19607	-2,314	3,0916	0,0979	0,3028	1,0048	3,1064	0,913624	2,825	0,418162	1,292806	8,042725	387,6594
380	5,1870	19402	-2,289	2,8976	0,1029	0,2983	1,0053	2,9129	0,904474	2,621	0,438741	1,271298	7,908925	381,2102
381	4,9695	19187	-2,264	2,7054	0,1079	0,2919	1,0058	2,7211	0,894894	2,421	0,459104	1,242076	7,727132	372,4477
382	4,7540	18963	-2,238	2,5165	0,1129	0,284	1,0063	2,5324	0,884888	2,227	0,47924	1,205985	7,502599	361,6253

383	4,5420	18730	-2,21	2,3319	0,1178	0,2747	1,0069	2,348	0,874462	2,039	0,499141	1,163948	7,241082	349,0202
384	4,3345	18488	-2,182	2,1529	0,1227	0,2641	1,0075	2,169	0,863622	1,859	0,518797	1,116942	6,948651	334,925
385	4,1326	18237	-2,152	1,9806	0,1275	0,2526	1,0081	1,9966	0,852376	1,688	0,538198	1,065963	6,631504	319,6385
386	3,9372	17978	-2,121	1,8158	0,1324	0,2404	1,0087	1,8316	0,840729	1,527	0,557336	1,011998	6,295783	303,4568
387	3,7490	17710	-2,09	1,6591	0,1372	0,2276	1,0093	1,6746	0,828688	1,375	0,576201	0,956	5,947409	286,6651
388	3,5686	17435	-2,057	1,5112	0,142	0,2145	1,01	1,5263	0,816261	1,234	0,594784	0,898861	5,591937	269,5314
389	3,3963	17152	-2,024	1,3724	0,1467	0,2013	1,0106	1,387	0,803455	1,103	0,613077	0,841397	5,234447	252,3004
390	3,2325	16861	-1,99	1,2429	0,1514	0,1882	1,0113	1,2569	0,790277	0,982	0,631072	0,784337	4,879469	235,1904
391	3,0770	16563	-1,954	1,1226	0,156	0,1752	1,012	1,1361	0,776735	0,872	0,648759	0,728313	4,530939	218,3913
392	2,9300	16257	-1,918	1,0116	0,1607	0,1625	1,0127	1,0245	0,762838	0,772	0,666131	0,673862	4,192191	202,0636
393	2,7911	15945	-1,881	0,9096	0,1653	0,1503	1,0135	0,9219	0,748593	0,681	0,68318	0,621425	3,865974	186,3399
394	2,6602	15626	-1,844	0,8163	0,1698	0,1386	1,0142	0,8279	0,734009	0,599	0,699899	0,571357	3,554491	171,3265
395	2,5369	15300	-1,805	0,7315	0,1743	0,1275	1,015	0,7424	0,719094	0,526	0,716279	0,523932	3,259454	157,1057
396	2,4209	14969	-1,766	0,6546	0,1787	0,117	1,0157	0,6649	0,703857	0,461	0,732315	0,479356	2,982143	143,7393
397	3,3348	14631	-1,726	1,6084	0,1831	0,2946	1,0165	1,6349	0,688308	1,107	0,747998	1,203057	7,484388	360,7475
398	3,1779	14288	-1,686	1,492	0,1875	0,2797	1,0173	1,5177	0,672456	1,003	0,763322	1,138851	7,084949	341,4946
399	3,0309	13939	-1,645	1,3861	0,1918	0,2659	1,0181	1,4112	0,656309	0,91	0,778282	1,078786	6,711276	323,4835
400	2,8930	13585	-1,603	1,2901	0,1961	0,2529	1,0189	1,3144	0,639878	0,825	0,79287	1,022842	6,363242	306,7083
410	1,8952	9819	-1,159	0,7366	0,2355	0,1735	1,027	0,7565	0,462126	0,34	0,917162	0,675558	4,202743	202,5722
420	1,3284	5833	-0,688	0,6401	0,2683	0,1717	1,0348	0,6623	0,267354	0,171	0,999645	0,639838	3,980521	191,8611
430	0,9841	1895	-0,224	0,7605	0,2929	0,2228	1,0412	0,7918	0,066479	0,051	1,039078	0,790195	4,915912	236,947
440	0,7632	-1757	0,2074	0,9705	0,3082	0,2991	1,0454	1,0146	-0,13008	-0,126	1,037314	1,006758	6,263184	301,8855
450	0,6153	-4934	0,5823	1,1975	0,3134	0,3753	1,0469	1,2537	-0,31342	-0,375	0,998899	1,196204	7,441753	358,6925
460	0,5129	-7513	0,8865	1,3994	0,3082	0,4313	1,0454	1,463	-0,47701	-0,668	0,930268	1,301828	8,098853	390,3647
470	0,4403	-9441	1,1141	1,5544	0,2929	0,4553	1,0412	1,6184	-0,61698	-0,959	0,838712	1,303691	8,110443	390,9234
480	0,3880	-10739	1,2672	1,6553	0,2683	0,4441	1,0348	1,7128	-0,73204	-1,212	0,731358	1,21058	7,531191	363,0034
490	0,3501	-11486	1,3553	1,7054	0,2355	0,4017	1,027	1,7515	-0,82298	-1,404	0,614368	1,047773	6,518341	314,184
500	0,3228	-11805	1,393	1,7157	0,1961	0,3364	1,0189	1,7481	-0,89194	-1,53	0,492477	0,844966	5,256649	253,3705
510	0,2228	-11842	1,3974	1,6201	0,1514	0,2453	1,0113	1,6385	-0,94166	-1,526	0,368864	0,597608	3,717802	179,198
520	0,1228	-11742	1,3856	1,5084	0,1029	0,1553	1,0053	1,5163	-0,97488	-1,47	0,24529	0,369985	2,301728	110,9433
530	0,1128	-11628	1,3721	1,4848	0,0521	0,0773	1,0014	1,4869	-0,99385	-1,476	0,122382	0,181718	1,130494	54,48981

540	0,0128	-11580	1,3664	1,3792	1E-16	2E-16	1	1,3792	-1	-1,379	3,68E-16	5,07E-16	3,15E-15	1,52E-13
550	0,0128	-11627	1,3719	1,3847	-0,052	-0,072	1,0014	1,3866	-0,99385	-1,376	-0,12238	-0,16946	-1,05425	-50,8147
560	0,0128	-11740	1,3853	1,3981	-0,103	-0,144	1,0053	1,4054	-0,97488	-1,363	-0,24529	-0,34293	-2,13342	-102,831
570	0,0128	-11838	1,3969	1,4097	-0,151	-0,213	1,0113	1,4257	-0,94166	-1,327	-0,36886	-0,51998	-3,2349	-155,922
580	0,0128	-11800	1,3924	1,4052	-0,196	-0,276	1,0189	1,4317	-0,89194	-1,253	-0,49248	-0,69201	-4,30509	-207,505
590	0,0128	-11480	1,3546	1,3674	-0,236	-0,322	1,027	1,4043	-0,82298	-1,125	-0,61437	-0,84007	-5,22619	-251,902
600	0,0128	-10732	1,2664	1,2791	-0,268	-0,343	1,0348	1,3236	-0,73204	-0,936	-0,73136	-0,93549	-5,81982	-280,515
610	0,0128	-9433	1,1131	1,1258	-0,293	-0,33	1,0412	1,1722	-0,61698	-0,695	-0,83871	-0,94424	-5,87428	-283,14
620	0,0128	-7503	0,8854	0,8981	-0,308	-0,277	1,0454	0,9389	-0,47701	-0,428	-0,93027	-0,83548	-5,19764	-250,526
630	0,0128	-4923	0,5809	0,5937	-0,313	-0,186	1,0469	0,6216	-0,31342	-0,186	-0,9989	-0,59305	-3,68942	-177,83
640	0,0128	-1745	0,2059	0,2187	-0,308	-0,067	1,0454	0,2286	-0,13008	-0,028	-1,03731	-0,22682	-1,41108	-68,014
650	0,0128	1908	-0,225	-0,2124	-0,293	0,0622	1,0412	-0,221	0,066479	-0,014	-1,03908	0,220728	1,373178	66,18717
660	0,0128	5848	-0,69	-0,6773	-0,268	0,1817	1,0348	-0,701	0,267354	-0,181	-0,99964	0,677052	4,212035	203,0201
670	0,0128	9835	-1,161	-1,1478	-0,236	0,2703	1,027	-1,179	0,462126	-0,53	-0,91716	1,052679	6,548863	315,6552
680	0,0128	13602	-1,605	-1,5923	-0,196	0,3122	1,0189	-1,622	0,639878	-1,019	-0,79287	1,262474	7,854029	378,5642
690	0,0128	16879	-1,992	-1,979	-0,151	0,2996	1,0113	-2,001	0,790277	-1,564	-0,63107	1,248904	7,769606	374,495
700	0,0128	19421	-2,292	-2,279	-0,103	0,2346	1,0053	-2,291	0,904474	-2,061	-0,43874	0,999879	6,220388	299,8227
710	0,0128	21032	-2,482	-2,469	-0,052	0,1285	1,0014	-2,472	0,975767	-2,409	-0,22491	0,555307	3,454643	166,5138
720	0,0128	21583	-2,547	-2,5341	-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.

$\varphi^\circ$	Цилиндры								$M_{кр.ц},$ Нм
	1-й		2-й		3-й		4-й		
	$\varphi^\circ$ кливошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	$\varphi^\circ$ кливошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	$\varphi^\circ$ кливошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	$\varphi^\circ$ кливошипа	$M_{кр.ц},$ Нм	
0	0	0	180	-9,483E-14	360	-9,483E-14	540	-9,483E-14	-2,8E-13
10	10	124,6007945	190	124,600794	370	124,600794	550	124,600794	498,4032
20	20	106,4634722	200	106,463472	380	106,463472	560	106,463472	425,8539
30	30	-23,38183881	210	-23,3818388	390	-23,3818388	570	-23,3818388	-93,5274
40	40	-21,11059165	220	-21,1105916	400	-21,1105916	580	-21,1105916	-84,4424
50	50	-105,0989229	230	-105,098923	410	-105,098923	590	-105,098923	-420,396
60	60	-119,4181592	240	-119,418159	420	-119,418159	600	-119,418159	-477,673
70	70	-80,60728974	250	-80,6072897	430	-80,6072897	610	-80,6072897	-322,429
80	80	-5,977727063	260	-5,97772706	440	-5,97772706	620	-5,97772706	-23,9109
90	90	88,3916376	270	88,3916376	450	88,3916376	630	88,3916376	353,5666
100	100	187,7466864	280	187,746686	460	187,746686	640	187,746686	750,9867
110	110	276,1956256	290	276,195626	470	276,195626	650	276,195626	1104,783
120	120	339,3955154	300	339,395515	480	339,395515	660	339,395515	1357,582
130	130	362,0378887	310	362,037889	490	362,037889	670	362,037889	1448,152
140	140	329,9650748	320	329,965075	500	329,965075	680	329,965075	1319,86
150	150	227,8545589	330	227,854559	510	227,854559	690	227,854559	911,4182
160	160	-84,21602683	340	-84,2160268	520	-84,2160268	700	-84,2160268	-336,864
170	170	-150,3838447	350	-150,383845	530	-150,383845	710	-150,383845	-601,535
180	180	-9,48296E-14	360	-9,483E-14	540	-9,483E-14	720	-9,483E-14	-3,8E-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	-6,9031208	-14,3484	14,3484	-26,3294	26,32938
10	-1,497305	-6,6157788	-14,0611	14,1406	-26,042	26,08504
20	-2,722937	-5,7274091	-13,1727	13,4512	-25,1537	25,30062
30	-3,427118	-4,394726	-11,84	12,3260	-23,821	24,06625
40	-3,511994	-2,9219906	-10,3673	10,9460	-22,3482	22,62252
50	-3,000118	-1,5797287	-9,02503	9,5106	-21,006	21,21915
60	-2,034669	-0,5889346	-8,03424	8,2879	-20,0152	20,11834
70	-0,833161	-0,071978	-7,51728	7,5633	-19,4982	19,51603
80	0,375736	-0,0381924	-7,4835	7,4929	-19,4644	19,46807
90	1,401353	-0,40327	-7,84858	7,9727	-19,8295	19,87898
100	2,128572	-1,0291747	-8,47448	8,7377	-20,4554	20,56588
110	2,484701	-1,743842	-9,18915	9,5191	-21,1701	21,31541
120	2,518894	-2,4203411	-9,86565	10,1821	-21,8466	21,99133
130	2,305097	-2,9750041	-10,4203	10,6722	-22,4013	22,51955
140	1,932448	-3,3796351	-10,8249	10,9961	-22,8059	22,88762
150	1,474187	-3,6392274	-11,0845	11,1821	-23,0655	23,11255
160	0,98413	-3,7855651	-11,2309	11,2739	-23,2118	23,23267
170	0,490957	-3,8605954	-11,3059	11,3166	-23,2869	23,29203
180	4,76E-16	-3,8882878	-11,3336	11,3336	-23,3145	23,31454
190	-0,493279	-3,8788536	-11,3242	11,3349	-23,3051	23,31033
200	-0,993422	-3,8213106	-11,2666	11,3103	-23,2476	23,26878
210	-1,493352	-3,6865394	-11,1318	11,2316	-23,1128	23,16099
220	-1,964903	-3,4363966	-10,8817	11,0577	-22,8627	22,94693
230	-2,354172	-3,0383406	-10,4836	10,7447	-22,4646	22,58761
240	-2,609574	-2,5074733	-9,95278	10,2892	-21,9337	22,08842
250	-2,640107	-1,8529109	-9,29822	9,6658	-21,2792	21,44232
260	-2,381052	-1,1512499	-8,59656	8,9202	-20,5775	20,71481
270	-1,813378	-0,5218389	-7,96714	8,1709	-19,9481	20,03035
280	-0,992874	-0,1009223	-7,54623	7,6113	-19,5272	19,5524
290	-0,067139	0,00580024	-7,43951	7,4398	-19,4205	19,42057
300	0,728292	-0,210804	-7,65611	7,6907	-19,6371	19,65056
310	1,096172	-0,5771954	-8,0225	8,0970	-20,0035	20,03346
320	0,720983	-0,5998601	-8,04517	8,0774	-20,0261	20,03909
330	-0,655057	0,84000433	-6,6053	6,6377	-18,5863	18,59779
340	-7,058984	14,8478251	7,40252	10,2287	-4,57843	8,413756
350	-6,553124	28,9547083	21,5094	22,4855	9,528452	11,56438
360	-7,86E-15	32,0767621	24,63146	24,6315	12,65051	12,65051
363	5,820007	25,7154606	18,27016	19,1748	6,289204	8,56893
370	7,573413	15,9298709	8,484566	11,3730	-3,49639	8,34154
380	5,823727	7,46799092	0,022686	5,8238	-11,9583	13,30097
390	6,918685	5,75636848	-1,68894	7,1218	-13,6699	15,32103
400	4,949446	2,60615776	-4,83915	6,9220	-16,8201	17,53319
410	4,088504	1,18341664	-6,26189	7,4784	-18,2428	18,69538
420	3,933818	0,33984831	-7,10546	8,1217	-19,0864	19,48758
430	4,112874	-0,41806	-7,86337	8,8740	-19,8443	20,26605
440	4,335944	-1,2477624	-8,69307	9,7144	-20,674	21,12381
450	4,417692	-2,1359752	-9,58128	10,5507	-21,5622	22,01013
460	4,275717	-3,0008331	-10,4461	11,2873	-22,4271	22,83103

470	3,909653	-3,7566854	-11,202	11,8647	-23,1829	23,5103
480	3,369468	-4,3487021	-11,794	12,2659	-23,775	24,01254
490	2,7234	-4,7629224	-12,2082	12,5083	-24,1892	24,34201
500	1,892655	-4,6722731	-12,1176	12,2645	-24,0985	24,17274
510	1,145802	-4,4074565	-11,8528	11,9080	-23,8337	23,86124
520	0,564783	-4,4411251	-11,8864	11,8998	-23,8674	23,87406
530	1,47E-15	-4,0040258	-11,4493	11,4493	-23,4303	23,43028
540	-0,506736	-3,9846704	-11,43	11,4412	-23,4109	23,41641
550	-1,018027	-3,915957	-11,3613	11,4068	-23,3422	23,3644
560	-1,526773	-3,7690443	-11,2143	11,3178	-23,1953	23,24549
570	-2,004737	-3,5060605	-10,9514	11,1333	-22,9323	23,01978
580	-2,397794	-3,09464	-10,5399	10,8092	-22,5209	22,64818
590	-2,628745	-2,5258939	-9,9712	10,3119	-21,9522	22,10898
600	-2,610077	-1,8318347	-9,27714	9,6373	-21,2581	21,41772
610	-2,266965	-1,0960884	-8,54139	8,8371	-20,5223	20,64717
620	-1,566809	-0,4508836	-7,89619	8,0501	-19,8771	19,9388
630	-0,546811	-0,0555815	-7,50089	7,5208	-19,4818	19,48951
640	0,671938	-0,0580497	-7,50335	7,5334	-19,4843	19,49589
650	1,893709	-0,5481335	-7,99344	8,2147	-19,9744	20,06396
660	2,883607	-1,5183789	-8,96368	9,4161	-20,9446	21,14221
670	3,422238	-2,8473134	-10,2926	10,8466	-22,2736	22,53494
680	3,364336	-4,3142188	-11,7595	12,2313	-23,7405	23,97768
690	2,683292	-5,6440196	-13,0893	13,3615	-25,0703	25,21346
700	1,487148	-6,5709008	-14,0162	14,0949	-25,9972	26,03966
710	3,38E-15	-6,9031208	-14,3484	14,3484	-26,3294	26,32938
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 <sub>ш.ш i</sub>	Значения R <sub>ш.ш i</sub> , кН, для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R <sub>ш.ш 0</sub>	12108,7	12108,7	12108,7	0	0	0	0	0	0	0	12108,7	12108,7
R <sub>ш.ш 10</sub>	11915,8	11915,8	11915,8	0	0	0	0	0	0	0	11915,8	11915,8
R <sub>ш.ш 20</sub>	11267	11267	11267	0	0	0	0	0	0	0	11267	11267
R <sub>ш.ш 30</sub>	10193,7	10193,7	10193,7	0	0	0	0	0	0	0	0	10193,7
R <sub>ш.ш 40</sub>	8853,92	8853,92	8853,92	0	0	0	0	0	0	0	0	8853,92
R <sub>ш.ш 50</sub>	7418,99	7418,99	7418,99	0	0	0	0	0	0	0	0	7418,99
R <sub>ш.ш 60</sub>	6141,38	6141,38	6141,38	0	0	0	0	0	0	0	0	6141,38
R <sub>ш.ш 70</sub>	5342,94	5342,94	5342,94	0	0	0	0	0	0	0	5342,94	5342,94
R <sub>ш.ш 80</sub>	5257,24	5257,24	5257,24	0	0	0	0	0	0	0	5257,24	5257,24
R <sub>ш.ш 90</sub>	5781,28	5781,28	0	0	0	0	0	0	0	0	5781,28	5781,28
R <sub>ш.ш 100</sub>	6588,11	6588,11	0	0	0	0	0	0	0	0	6588,11	6588,11
R <sub>ш.ш 110</sub>	7380,28	7380,28	0	0	0	0	0	0	0	0	7380,28	7380,28
R <sub>ш.ш 120</sub>	8031,18	8031,18	0	0	0	0	0	0	0	0	8031,18	8031,18
R <sub>ш.ш 130</sub>	8499,16	8499,16	0	0	0	0	0	0	0	0	8499,16	8499,16
R <sub>ш.ш 140</sub>	8800,03	8800,03	0	0	0	0	0	0	0	0	8800,03	8800,03
R <sub>ш.ш 150</sub>	8966,84	8966,84	0	0	0	0	0	0	0	0	8966,84	8966,84
R <sub>ш.ш 160</sub>	9044,86	9044,86	9044,86	0	0	0	0	0	0	0	9044,86	9044,86
R <sub>ш.ш 170</sub>	9079,48	9079,48	9079,48	0	0	0	0	0	0	0	9079,48	9079,48
R <sub>ш.ш 180</sub>	9093,89	9093,89	9093,89	0	0	0	0	0	0	0	9093,89	9093,89
R <sub>ш.ш 190</sub>	9097,84	9097,84	9097,84	0	0	0	0	0	0	0	9097,84	9097,84
R <sub>ш.ш 200</sub>	9081,41	9081,41	9081,41	0	0	0	0	0	0	0	9081,41	9081,41
R <sub>ш.ш 210</sub>	9016,66	9016,66	9016,66	0	0	0	0	0	0	0	0	9016,66
R <sub>ш.ш 220</sub>	8862,56	8862,56	8862,56	0	0	0	0	0	0	0	0	8862,56
R <sub>ш.ш 230</sub>	8573,49	8573,49	8573,49	0	0	0	0	0	0	0	0	8573,49
R <sub>ш.ш 240</sub>	8142,57	8142,57	8142,57	0	0	0	0	0	0	0	0	8142,57
R <sub>ш.ш 250</sub>	7536,1	7536,1	7536,1	0	0	0	0	0	0	0	0	7536,1
R <sub>ш.ш 260</sub>	6788,15	6788,15	6788,15	0	0	0	0	0	0	0	0	6788,15
R <sub>ш.ш 270</sub>	6007,65	6007,65	6007,65	0	0	0	0	0	0	0	0	6007,65
R <sub>ш.ш 280</sub>	5398,61	5398,61	5398,61	0	0	0	0	0	0	0	5398,61	5398,61

R <sub>III.III</sub> 290	5200,23	5200,23	5200,23	0	0	0	0	0	0	0	5200,23	5200,23
R <sub>III.III</sub> 300	5465,15	5465,15	0	0	0	0	0	0	0	0	5465,15	5465,15
R <sub>III.III</sub> 310	5885,77	5885,77	0	0	0	0	0	0	0	0	5885,77	5885,77
R <sub>III.III</sub> 320	5850,06	5850,06	0	0	0	0	0	0	0	0	5850,06	5850,06
R <sub>III.III</sub> 330	4414,47	4414,47	0	0	0	0	0	0	0	0	4414,47	4414,47
R <sub>III.III</sub> 340	11950	11950	11950	0	0	0	0	0	0	0	11950	11950
R <sub>III.III</sub> 350	24636,6	24636,6	24636,6	0	0	0	0	0	0	0	24636,6	24636,6
R <sub>III.III</sub> 360	26871,2	26871,2	26871,2	0	0	0	0	0	0	0	26871,2	26871,2
R <sub>III.III</sub> 370	21319,6	21319,6	21319,6	0	0	0	0	0	0	0	21319,6	21319,6
R <sub>III.III</sub> 380	13128,8	13128,8	13128,8	0	0	13128,85	13128,8	13128,8	0	0	13128,8	13128,8
R <sub>III.III</sub> 390	0	0	0	0	0	0	0	0	6247,74	6247,74	6247,74	6247,74
R <sub>III.III</sub> 400	6940,57	6940,57	0	0	0	0	0	0	0	0	6940,57	6940,57
R <sub>III.III</sub> 410	5590,54	5590,54	0	0	0	0	0	0	0	0	5590,54	5590,54
R <sub>III.III</sub> 420	5735,31	5735,31	0	0	0	0	0	0	0	0	5735,31	5735,31
R <sub>III.III</sub> 430	6257,03	6257,03	0	0	0	0	0	0	0	0	6257,03	6257,03
R <sub>III.III</sub> 440	6967,16	6967,16	0	0	0	0	0	0	0	0	6967,16	6967,16
R <sub>III.III</sub> 450	7774,72	0	0	0	0	0	0	0	0	7774,72	7774,72	7774,72
R <sub>III.III</sub> 460	8568,24	8568,24	0	0	0	0	0	0	0	0	8568,24	8568,24
R <sub>III.III</sub> 470	9253,5	9253,5	0	0	0	0	0	0	0	0	9253,5	9253,5
R <sub>III.III</sub> 480	9777,93	9777,93	0	0	0	0	0	0	0	0	9777,93	9777,93
R <sub>III.III</sub> 490	10131	10131	0	0	0	0	0	0	0	0	10131	10131
R <sub>III.III</sub> 500	10333,8	10333,8	0	0	0	0	0	0	0	0	10333,8	10333,8
R <sub>III.III</sub> 510	10057,6	10057,6	0	0	0	0	0	0	0	0	10057,6	10057,6
R <sub>III.III</sub> 520	9681,1	9681,1	9681,1	0	0	0	0	0	0	0	9681,1	9681,1
R <sub>III.III</sub> 530	9663,24	9663,24	9663,24	0	0	0	0	0	0	0	9663,24	9663,24
R <sub>III.III</sub> 540	9209,63	9209,63	9209,63	0	0	0	0	0	0	0	9209,63	9209,63
R <sub>III.III</sub> 550	9204,23	9204,23	9204,23	0	0	0	0	0	0	0	9204,23	9204,23
R <sub>III.III</sub> 560	9178,19	9178,19	9178,19	0	0	0	0	0	0	0	9178,19	9178,19
R <sub>III.III</sub> 570	9103,59	9103,59	9103,59	0	0	0	0	0	0	0	0	9103,59
R <sub>III.III</sub> 580	8939,35	8939,35	8939,35	0	0	0	0	0	0	0	0	8939,35
R <sub>III.III</sub> 590	8639,64	8639,64	8639,64	0	0	0	0	0	0	0	0	8639,64
R <sub>III.III</sub> 600	8166,17	8166,17	8166,17	0	0	0	0	0	0	0	0	8166,17

R <sub>ш.ш 610</sub>	7505,86	7505,86	7505,86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7505,86	
R <sub>ш.ш 620</sub>	6697,04	6697,04	6697,04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6697,04	
R <sub>ш.ш 630</sub>	5869,47	5869,47	5869,47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5869,47	
R <sub>ш.ш 640</sub>	5289,52	5289,52	5289,52	0	0	0	0	0	0	0	0	5289,52	5289,52	
R <sub>ш.ш 650</sub>	5306,36	5306,36	5306,36	0	0	0	0	0	0	0	0	5306,36	5306,36	
R <sub>ш.ш 660</sub>	6057,36	6057,36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6057,36	6057,36	
R <sub>ш.ш 670</sub>	7316,22	7316,22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7316,22	7316,22	
R <sub>ш.ш 680</sub>	8749,92	8749,92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8749,92	8749,92	
R <sub>ш.ш 690</sub>	10096,8	10096,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10096,8	10096,8	
R <sub>ш.ш 700</sub>	11176,5	11176,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11176,5	11176,5	
R <sub>ш.ш 710</sub>	11870	11870	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11870	11870	
ΣR <sub>ш.ш i</sub>	12108,7	12108,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12108,7	12108,7

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

1-я коренная шейка	1-й кривошип				2-я коренная шейка			2-й кривошип			3-я коренная шейка			3-й кривошип		
	Rк.ш1, Н	j <sub>кв</sub> , град	Rк1, Н	T1, Н	Kрк1, Н	Tк2, Н	Kк2, Н	Rк.ш2, Н	j <sub>кв</sub> , град	T2, Н	Kрк2, Н	Tк3, Н	Kк3, Н	Rк.ш3, Н	j <sub>кв</sub> , град	T3, Н
20613,85	0	-20613,85	2,4E-13	1507,4	1507,42	180	4,8E-13	-17599,02	9,7E-13	-17656,89	17656,89	540	1,47E-12	-17714,76	20613,85	0
20381,58	-1497,3	-20326,51	502,013	1368,5	1457,64	190	-493,28	-17589,58	-500,007	-17642,49	17649,58	550	-506,736	-17695,4	20381,58	-1497,3
19627,93	-2722,94	-19438,14	864,757	953,05	1286,9	200	-993,42	-17532,04	-1005,72	-17579,36	17608,11	560	-1018,03	-17626,69	19627,93	-2722,94
18426,96	-3427,12	-18105,46	966,883	354,09	1029,68	210	-1493,4	-17397,27	-1510,06	-17438,52	17503,78	570	-1526,77	-17479,78	18426,96	-3427,12
16999,46	-3511,99	-16632,72	773,545	-257,2	815,185	220	-1964,9	-17147,13	-1984,82	-17181,96	17296,22	580	-2004,74	-17216,79	16999,46	-3511,99
15582	-3000,12	-15290,46	322,973	-729,31	797,621	230	-2354,2	-16749,07	-2375,98	-16777,22	16944,63	590	-2397,79	-16805,37	15582	-3000,12
14443,69	-2034,67	-14299,67	-287,453	-959,27	1001,41	240	-2609,6	-16218,2	-2619,16	-16227,41	16437,43	600	-2628,74	-16236,62	14443,69	-2034,67
13807,87	-833,161	-13782,71	-903,473	-890,47	1268,54	250	-2640,1	-15563,64	-2625,09	-15553,1	15773,08	610	-2610,08	-15542,57	13807,87	-833,161
13754,06	375,7363	-13748,92	-1378,39	-556,53	1486,5	260	-2381,1	-14861,98	-2324,01	-14834,4	15015,34	620	-2266,96	-14806,82	13754,06	375,7363
14183,4	1401,353	-14114	-1607,37	-59,284	1608,46	270	-1813,4	-14232,57	-1690,09	-14197,09	14297,34	630	-1566,81	-14161,61	14183,4	1401,353
14892,8	2128,572	-14739,91	-1560,72	464,13	1628,27	280	-992,87	-13811,65	-769,842	-13788,98	13810,46	640	-546,811	-13766,31	14892,8	2128,572
15653,04	2484,701	-15454,57	-1275,92	874,82	1547,02	290	-67,139	-13704,93	302,399	-13736,86	13740,18	650	671,9379	-13768,78	15653,04	2484,701

16326,55	2518,894	-16131,07	-895,301	1104,8	1422	300	728,292	-13921,54	1311	-14090,2	14151,06	660	1893,709	-14258,86	16326,55	2518,894
16844,2	2305,097	-16685,74	-604,463	1198,9	1342,66	310	1096,17	-14287,93	1989,89	-14758,52	14892,06	670	2883,607	-15229,11	16844,2	2305,097
17199,27	1932,448	-17090,37	-605,732	1389,9	1516,15	320	720,983	-14310,59	2071,61	-15434,32	15572,72	680	3422,238	-16558,04	17199,27	1932,448
17412,48	1474,187	-17349,96	-1064,62	2239,6	2479,78	330	-655,06	-12870,73	1354,64	-15447,84	15507,12	690	3364,336	-18024,95	17412,48	1474,187
17523,95	984,1296	-17496,3	-4021,56	9316,7	10147,6	340	-7059	1137,094	-2187,85	-9108,828	9367,893	700	2683,292	-19354,75	17523,95	984,1296
17578,18	490,9568	-17571,33	-3522,04	16408	16781,4	350	-6553,1	15243,98	-2532,99	-2518,827	3572,187	710	1487,148	-20281,63	17578,18	490,9568
17599,02	4,76E-13	-17599,02	-4,2E-12	17983	17982,5	360	-8E-12	18366,03	-2,2E-12	-1123,91	1123,91	720	3,38E-12	-20613,85	17599,02	4,76E-13
17596,5	-493,279	-17589,58	3156,64	14797	15130,1	370	5820,01	12004,73	2910	-4304,561	5195,899	0	0	-20613,85	17596,5	-493,279
17560,16	-993,422	-17532,04	4283,42	9875,6	10764,5	380	7573,41	2219,14	3038,05	-9053,685	9549,816	10	-1497,3	-20326,51	17560,16	-993,422
17461,25	-1493,35	-17397,27	3658,54	5577,3	6670,14	390	5823,73	-6242,74	1550,4	-12840,44	12933,7	20	-2722,94	-19438,14	17461,25	-1493,35
17259,34	-1964,9	-17147,13	4441,79	4596,4	6391,89	400	6918,68	-7954,363	1745,78	-13029,91	13146,34	30	-3427,12	-18105,46	17259,34	-1964,9
16913,71	-2354,17	-16749,07	3651,81	2822,2	4615,28	410	4949,45	-11104,57	718,726	-13868,65	13887,26	40	-3511,99	-16632,72	16913,71	-2354,17
16426,81	-2609,57	-16218,2	3349,04	1845,4	3823,84	420	4088,5	-12527,31	544,193	-13908,89	13919,53	50	-3000,12	-15290,46	16426,81	-2609,57
15785,98	-2640,11	-15563,64	3286,96	1096,4	3464,99	430	3933,82	-13370,88	949,574	-13835,27	13867,82	60	-2034,67	-14299,67	15785,98	-2640,11
15051,51	-2381,05	-14861,98	3246,96	366,59	3267,59	440	4112,87	-14128,79	1639,86	-13955,75	14051,76	70	-833,161	-13782,71	15051,51	-2381,05
14347,63	-1813,38	-14232,57	3074,66	-362,96	3096,01	450	4335,94	-14958,49	2355,84	-14353,71	14545,75	80	375,7363	-13748,92	14347,63	-1813,38
13847,29	-992,874	-13811,65	2705,28	-1017,5	2890,31	460	4417,69	-15846,71	2909,52	-14980,35	15260,29	90	1401,353	-14114	13847,29	-992,874
13705,1	-67,139	-13704,93	2171,43	-1503,3	2641,03	470	4275,72	-16711,56	3202,14	-15725,73	16048,44	100	2128,572	-14739,91	13705,1	-67,139
13940,57	728,2919	-13921,54	1590,68	-1772,9	2381,93	480	3909,65	-17467,42	3197,18	-16460,99	16768,61	110	2484,701	-15454,57	13940,57	728,2919
14329,91	1096,172	-14287,93	1136,65	-1885,8	2201,83	490	3369,47	-18059,43	2944,18	-17095,25	17346,93	120	2518,894	-16131,07	14329,91	1096,172
14328,74	720,9829	-14310,59	1001,21	-2081,5	2309,8	500	2723,4	-18473,65	2514,25	-17579,69	17758,58	130	2305,097	-16685,74	14328,74	720,9829
12887,39	-655,057	-12870,73	1273,86	-2756,1	3036,28	510	1892,66	-18383	1912,55	-17736,69	17839,5	140	1932,448	-17090,37	12887,39	-655,057
7149,982	-7058,98	1137,094	4102,39	-9627,6	10465,2	520	1145,8	-18118,19	1309,99	-17734,07	17782,39	150	1474,187	-17349,96	7149,982	-7058,98
16592,84	-6553,12	15243,98	3558,95	-16698	17073	530	564,783	-18151,86	774,457	-17824,08	17840,89	160	984,1296	-17496,3	16592,84	-6553,12
18366,03	-7,9E-12	18366,03	4,7E-12	-18040	18040,4	540	1,5E-12	-17714,76	245,478	-17643,04	17644,75	170	490,9568	-17571,33	18366,03	-7,9E-12
13341,14	5820,007	12004,73	-3163,37	-14850	15183,3	550	-506,74	-17695,4	-253,368	-17647,21	17649,03	180	4,76E-13	-17599,02	13341,14	5820,007
7891,841	7573,413	2219,14	-4295,72	-9922,9	10812,8	560	-1018	-17626,69	-755,653	-17608,14	17624,34	190	-493,279	-17589,58	7891,841	7573,413
8537,424	5823,727	-6242,74	-3675,25	-5618,5	6713,81	570	-1526,8	-17479,78	-1260,1	-17505,91	17551,2	200	-993,422	-17532,04	8537,424	5823,727
10542,3	6918,685	-7954,363	-4461,71	-4631,2	6430,79	580	-2004,7	-17216,79	-1749,04	-17307,03	17395,19	210	-1493,35	-17397,27	10542,3	6918,685

12157,65	4949,446	-11104,57	-3673,62	-2850,4	4649,76	590	-2397,8	-16805,37	-2181,35	-16976,25	17115,82	220	-1964,9	-17147,13	12157,65	4949,446
13177,61	4088,504	-12527,31	-3358,62	-1854,7	3836,68	600	-2628,7	-16236,62	-2491,46	-16492,85	16679,97	230	-2354,17	-16749,07	13177,61	4088,504
13937,55	3933,818	-13370,88	-3271,95	-1085,8	3447,42	610	-2610,1	-15542,57	-2609,83	-15880,39	16093,41	240	-2609,57	-16218,2	13937,55	3933,818
14715,25	4112,874	-14128,79	-3189,92	-339,01	3207,88	620	-2267	-14806,82	-2453,54	-15185,23	15382,17	250	-2640,11	-15563,64	14715,25	4112,874
15574,24	4335,944	-14958,49	-2951,38	398,44	2978,15	630	-1566,8	-14161,61	-1973,93	-14511,8	14645,43	260	-2381,05	-14861,98	15574,24	4335,944
16450,96	4417,692	-15846,71	-2482,25	1040,2	2691,39	640	-546,81	-13766,31	-1180,09	-13999,44	14049,09	270	-1813,38	-14232,57	16450,96	4417,692
17249,87	4275,717	-16711,56	-1801,89	1471,4	2326,33	650	671,938	-13768,78	-160,468	-13790,22	13791,15	280	-992,874	-13811,65	17249,87	4275,717
17899,61	3909,653	-17467,42	-1007,97	1604,3	1894,65	660	1893,71	-14258,86	913,285	-13981,9	14011,69	290	-67,139	-13704,93	17899,61	3909,653
18371,08	3369,468	-18059,43	-242,931	1415,2	1435,86	670	2883,61	-15229,11	1805,95	-14575,32	14686,78	300	728,2919	-13921,54	18371,08	3369,468
18673,32	2723,4	-18473,65	349,419	957,8	1019,55	680	3422,24	-16558,04	2259,21	-15422,99	15587,57	310	1096,172	-14287,93	18673,32	2723,4
18480,18	1892,655	-18383	735,841	179,03	757,306	690	3364,34	-18024,95	2042,66	-16167,77	16296,3	320	720,9829	-14310,59	18480,18	1892,655
18154,38	1145,802	-18118,19	768,745	-618,28	986,53	700	2683,29	-19354,75	1014,12	-16112,74	16144,62	330	-655,057	-12870,73	18154,38	1145,802
18160,64	564,7835	-18151,86	461,182	-1064,9	1160,46	710	1487,15	-20281,63	-2785,92	-9572,269	9969,437	340	-7058,98	1137,094	18160,64	564,7835
17714,76	1,47E-12	-17714,76	9,6E-13	-1449,5	1449,55	720	3,4E-12	-20613,85	-3276,56	-2684,937	4236,124	350	-6553,12	15243,977	17714,76	1,47E-12
17702,66	-506,736	-17695,4	253,368	-1459,2	1481,06	0	0	-20613,85	-3,9E-12	-1123,91	1123,91	360	-7,9E-12	18366,031	17702,66	-506,736
17656,06	-1018,03	-17626,69	-239,639	-1349,9	1371,02	10	-1497,3	-20326,51	2161,35	-4160,89	4688,757	370	5820,007	12004,73	17656,06	-1018,03
17546,33	-1526,77	-17479,78	-598,082	-979,18	1147,39	20	-2722,9	-19438,14	2425,24	-8609,5	8944,567	380	7573,413	2219,1398	17546,33	-1526,77
17333,12	-2004,74	-17216,79	-711,191	-444,33	838,584	30	-3427,1	-18105,46	1198,3	-12174,1	12232,93	390	5823,727	-6242,74	17333,12	-2004,74
16975,57	-2397,79	-16805,37	-557,1	86,325	563,749	40	-3512	-16632,72	1703,35	-12293,54	12410,99	400	6918,685	-7954,363	16975,57	-2397,79
16448,05	-2628,74	-16236,62	-185,687	473,08	508,219	50	-3000,1	-15290,46	974,664	-13197,52	13233,46	410	4949,446	-11104,57	16448,05	-2628,74
15760,2	-2610,08	-15542,57	287,704	621,45	684,817	60	-2034,7	-14299,67	1026,92	-13413,49	13452,74	420	4088,504	-12527,31	15760,2	-2610,08
14979,35	-2266,96	-14806,82	716,902	512,06	880,993	70	-833,16	-13782,71	1550,33	-13576,8	13665,02	430	3933,818	-13370,88	14979,35	-2266,96
14248,03	-1566,81	-14161,61	971,273	206,35	992,95	80	375,736	-13748,92	2244,31	-13938,86	14118,38	440	4112,874	-14128,79	14248,03	-1566,81
13777,17	-546,811	-13766,31	974,082	-173,84	989,474	90	1401,35	-14114	2868,65	-14536,25	14816,6	450	4335,944	-14958,49	13777,17	-546,811
13785,17	671,9379	-13768,78	728,317	-485,56	875,338	100	2128,57	-14739,91	3273,13	-15293,31	15639,65	460	4417,692	-15846,71	13785,17	671,9379
14384,07	1893,709	-14258,86	295,496	-597,85	666,894	110	2484,7	-15454,57	3380,21	-16083,07	16434,44	470	4275,717	-16711,56	14384,07	1893,709
15499,71	2883,607	-15229,11	-182,356	-450,98	486,454	120	2518,89	-16131,07	3214,27	-16799,24	17103,98	480	3909,653	-17467,42	15499,71	2883,607
16908	3422,238	-16558,04	-558,571	-63,845	562,208	130	2305,1	-16685,74	2837,28	-17372,58	17602,75	490	3369,468	-18059,43	16908	3422,238
18336,24	3364,336	-18024,95	-715,944	467,29	854,949	140	1932,45	-17090,37	2327,92	-17782,01	17933,74	500	2723,4	-18473,65	18336,24	3364,336

19539,87	2683,292	-19354,75	-604,553	1002,4	1170,59	150	1474,19	-17349,96	1683,42	-17866,48	17945,61	510	1892,655	-18383	19539,87	2683,292
20336,08	1487,148	-20281,63	-251,509	1392,7	1415,2	160	984,13	-17496,3	1064,97	-17807,24	17839,06	520	1145,802	-18118,19	20336,08	1487,148
20613,85	3,38E-12	-20613,85	245,478	1521,3	1540,94	170	490,957	-17571,33	527,87	-17861,59	17869,39	530	564,7835	-18151,86	20613,85	3,38E-12

Таблица Г4 – Силы действующие на колено вала.

Крк, Н	Рк, Н	Тк1, Н	Тк3, Н	Тк4, Н	Тк2, Н	Крк1, Н	Крк3, Н	Крк4, Н	Крк2, Н	Тк2=Тк4, Н	Тк3, Н	Кк2,4, Н	Кк3, Н	Ф <sub>кв</sub> , град
-20613,9	20613,9	0	1,472E-12	-7,86E-12	4,76373E-13	-20613,852	-17714,7568	18366,031	-17599,019	4,764E-13	9,7402E-13	-3014,833	-17656,888	0
-20326,5	20381,6	-1497,3046	-506,7356	5820,0067	-493,278694	-20326,51	-17695,4015	12004,73	-17589,585	1004,0259	-500,00712	-2736,9252	-17642,493	10
-19438,1	19627,9	-2722,9368	-1018,027	7573,4126	-993,422324	-19438,14	-17626,688	2219,1398	-17532,042	1729,5145	-1005,7249	-1906,0986	-17579,365	20
-18105,5	18427	-3427,1179	-1526,773	5823,7272	-1493,35185	-18105,457	-17479,7754	-6242,7401	-17397,27	1933,766	-1510,0625	-708,18659	-17438,523	30
-16632,7	16999,5	-3511,9942	-2004,737	6918,685	-1964,90332	-16632,722	-17216,7916	-7954,3626	-17147,128	1547,0909	-1984,82	514,40595	-17181,96	40
-15290,5	15582	-3000,1182	-2397,794	4949,4455	-2354,17163	-15290,46	-16805,371	-11104,573	-16749,072	645,94659	-2375,9826	1458,6118	-16777,221	50
-14299,7	14443,7	-2034,6692	-2628,745	4088,504	-2609,57418	-14299,666	-16236,625	-12527,314	-16218,204	-574,90501	-2619,1595	1918,5387	-16227,415	60
-13782,7	13807,9	-833,16109	-2610,077	3933,8179	-2640,1074	-13782,709	-15542,5658	-13370,883	-15563,642	-1806,9463	-2625,0923	1780,9329	-15553,104	70
-13748,9	13754,1	375,73634	-2266,965	4112,8739	-2381,05158	-13748,923	-14806,8194	-14128,791	-14861,981	-2756,7879	-2324,0081	1113,0576	-14834,4	80
-14114	14183,4	1401,3534	-1566,809	4335,9439	-1813,37757	-14114,001	-14161,6146	-14958,493	-14232,57	-3214,731	-1690,0935	118,56894	-14197,092	90
-14739,9	14892,8	2128,5716	-546,8109	4417,6916	-992,873998	-14739,906	-13766,3126	-15846,706	-13811,653	-3121,4456	-769,84247	-928,25233	-13788,983	100
-15454,6	15653	2484,7013	671,93791	4275,7165	-67,1390299	-15454,573	-13768,7808	-16711,564	-13704,931	-2551,8403	302,399438	-1749,6422	-13736,856	110
-16131,1	16326,6	2518,8941	1893,7085	3909,6525	728,2919457	-16131,072	-14258,8646	-17467,417	-13921,535	-1790,6021	1311,00025	-2209,5371	-14090,2	120
-16685,7	16844,2	2305,0972	2883,6066	3369,4679	1096,171985	-16685,735	-15229,11	-18059,433	-14287,926	-1208,9252	1989,88929	-2397,8088	-14758,518	130
-17090,4	17199,3	1932,4476	3422,2383	2723,3999	720,9828743	-17090,366	-16558,0445	-18473,654	-14310,591	-1211,4647	2071,61059	-2779,775	-15434,318	140
-17350	17412,5	1474,1866	3364,3364	1892,6551	-655,056507	-17349,958	-18024,9499	-18383,004	-12870,727	-2129,2431	1354,63993	-4479,2318	-15447,838	150
-17496,3	17524	984,12962	2683,2916	1145,8021	-7058,98406	-17496,296	-19354,7507	-18118,188	1137,094	-8043,1137	-2187,8462	-18633,39	-9108,8283	160
-17571,3	17578,2	490,95678	1487,1476	564,78347	-6553,12373	-17571,326	-20281,6318	-18151,856	15243,977	-7044,0805	-2532,9881	-32815,304	-2518,8273	170
-17599	17599	4,764E-13	3,383E-12	1,472E-12	-7,8598E-12	-17599,019	-20613,8519	-17714,757	18366,031	-8,336E-12	-2,238E-12	-35965,05	-1123,9104	180
-17589,6	17596,5	-493,27869	0	-506,73555	5820,006675	-17589,585	-20613,8519	-17695,401	12004,73	6313,2854	2910,00334	-29594,314	-4304,5611	190
-17532	17560,2	-993,42232	-1497,305	-1018,0275	7573,412554	-17532,042	-20326,5099	-17626,688	2219,1398	8566,8349	3038,05399	-19751,181	-9053,685	200
-17397,3	17461,2	-1493,3519	-2722,937	-1526,7731	5823,727166	-17397,27	-19438,1402	-17479,775	-6242,7401	7317,079	1550,39516	-11154,53	-12840,44	210

-17147,1	17259,3	-1964,9033	-3427,118	-2004,7366	6918,684975	-17147,128	-18105,4571	-17216,792	-7954,3626	8883,5883	1745,78355	-9192,765	-13029,91	220
-16749,1	16913,7	-2354,1716	-3511,994	-2397,7936	4949,445532	-16749,072	-16632,7217	-16805,371	-11104,573	7303,6172	718,725679	-5644,4983	-13868,647	230
-16218,2	16426,8	-2609,5742	-3000,118	-2628,7449	4088,503982	-16218,204	-15290,4598	-16236,625	-12527,314	6698,0782	544,192877	-3690,8899	-13908,887	240
-15563,6	15786	-2640,1074	-2034,669	-2610,0771	3933,817875	-15563,642	-14299,6656	-15542,566	-13370,883	6573,9253	949,57435	-2192,7592	-13835,274	250
-14862	15051,5	-2381,0516	-833,1611	-2266,9647	4112,873877	-14861,981	-13782,7091	-14806,819	-14128,791	6493,9255	1639,85639	-733,18998	-13955,75	260
-14232,6	14347,6	-1813,3776	375,73634	-1566,8094	4335,943905	-14232,57	-13748,9234	-14161,615	-14958,493	6149,3215	2355,84012	725,92345	-14353,708	270
-13811,7	13847,3	-992,874	1401,3534	-546,81095	4417,691615	-13811,653	-14114,001	-13766,313	-15846,706	5410,5656	2909,5225	2035,0529	-14980,354	280
-13704,9	13705,1	-67,13903	2128,5716	671,93791	4275,716503	-13704,931	-14739,9057	-13768,781	-16711,564	4342,8555	3202,14407	3006,6334	-15725,735	290
-13921,5	13940,6	728,29195	2484,7013	1893,7085	3909,652519	-13921,535	-15454,5731	-14258,865	-17467,417	3181,3606	3197,17691	3545,8815	-16460,995	300
-14287,9	14329,9	1096,172	2518,8941	2883,6066	3369,467909	-14287,926	-16131,0722	-15229,11	-18059,433	2273,2959	2944,18099	3771,5067	-17095,253	310
-14310,6	14328,7	720,98287	2305,0972	3422,2383	2723,399924	-14310,591	-16685,7352	-16558,045	-18473,654	2002,4171	2514,24856	4163,0623	-17579,694	320
-12870,7	12887,4	-655,05651	1932,4476	3364,3364	1892,655102	-12870,727	-17090,3661	-18024,95	-18383,004	2547,7116	1912,55133	5512,2774	-17736,685	330
1137,09	7149,98	-7058,9841	1474,1866	2683,2916	1145,802111	1137,094	-17349,9585	-19354,751	-18118,188	8204,7862	1309,99436	19255,282	-17734,073	340
15244	16592,8	-6553,1237	984,12962	1487,1476	564,7834678	15243,977	-17496,2962	-20281,632	-18151,856	7117,9072	774,456545	33395,833	-17824,076	350
18366	18366	-7,86E-12	490,95678	3,383E-12	1,47166E-12	18366,031	-17571,3265	-20613,852	-17714,757	9,331E-12	245,478389	36080,788	-17643,042	360
12004,7	13341,1	5820,0067	4,764E-13	-1497,3046	-506,735554	12004,73	-17599,0188	-20326,51	-17695,401	-6326,7422	-253,36778	29700,131	-17647,21	370
2219,14	7891,84	7573,4126	-493,2787	-2722,9368	-1018,02746	2219,1398	-17589,5846	-19438,14	-17626,688	-8591,44	-755,65308	19845,828	-17608,136	380
-6242,74	8537,42	5823,7272	-993,4223	-3427,1179	-1526,77314	-6242,7401	-17532,0416	-18105,457	-17479,775	-7350,5003	-1260,0977	11237,035	-17505,909	390
-7954,36	10542,3	6918,685	-1493,352	-3511,9942	-2004,73659	-7954,3626	-17397,2705	-16632,722	-17216,792	-8923,4216	-1749,0442	9262,429	-17307,031	400
-11104,6	12157,7	4949,4455	-1964,903	-3000,1182	-2397,79362	-11104,573	-17147,1276	-15290,46	-16805,371	-7347,2392	-2181,3485	5700,7977	-16976,249	410
-12527,3	13177,6	4088,504	-2354,172	-2034,6692	-2628,74487	-12527,314	-16749,0716	-14299,666	-16236,625	-6717,2488	-2491,4583	3709,3106	-16492,848	420
-13370,9	13937,6	3933,8179	-2609,574	-833,16109	-2610,07711	-13370,883	-16218,2044	-13782,709	-15542,566	-6543,895	-2609,8256	2171,683	-15880,385	430
-14128,8	14715,2	4112,8739	-2640,107	375,73634	-2266,96469	-14128,791	-15563,642	-13748,923	-14806,819	-6379,8386	-2453,536	678,02842	-15185,231	440
-14958,5	15574,2	4335,9439	-2381,052	1401,3534	-1566,80939	-14958,493	-14861,981	-14114,001	-14161,615	-5902,7533	-1973,9305	-796,87882	-14511,798	450
-15846,7	16451	4417,6916	-1813,378	2128,5716	-546,810949	-15846,706	-14232,57	-14739,906	-13766,313	-4964,5026	-1180,0943	-2080,3937	-13999,441	460
-16711,6	17249,9	4275,7165	-992,874	2484,7013	671,9379059	-16711,564	-13811,6534	-15454,573	-13768,781	-3603,7786	-160,46805	-2942,7834	-13790,217	470
-17467,4	17899,6	3909,6525	-67,13903	2518,8941	1893,708545	-17467,417	-13704,9308	-16131,072	-14258,865	-2015,944	913,284758	-3208,5519	-13981,898	480
-18059,4	18371,1	3369,4679	728,29195	2305,0972	2883,6066	-18059,433	-13921,535	-16685,735	-15229,11	-485,86131	1805,94927	-2830,3232	-14575,322	490

-18473,7	18673,3	2723,3999	1096,172	1932,4476	3422,238303	-18473,654	-14287,9264	-17090,366	-16558,045	698,83838	2259,20514	-1915,609	-15422,985	500
-18383	18480,2	1892,6551	720,98287	1474,1866	3364,336368	-18383,004	-14310,5912	-17349,958	-18024,95	1471,6813	2042,65962	-358,05422	-16167,771	510
-18118,2	18154,4	1145,8021	-655,0565	984,12962	2683,291615	-18118,188	-12870,7267	-17496,296	-19354,751	1537,4895	1014,11755	1236,5631	-16112,739	520
-18151,9	18160,6	564,78347	-7058,984	490,95678	1487,147625	-18151,856	1137,09399	-17571,326	-20281,632	922,36416	-2785,9182	2129,7757	-9572,2689	530
-17714,8	17714,8	1,472E-12	-6553,124	4,764E-13	3,38294E-12	-17714,757	15243,9772	-17599,019	-20613,852	1,911E-12	-3276,5619	2899,095	-2684,9373	540
-17695,4	17702,7	-506,73555	-7,86E-12	-493,27869	0	-17695,401	18366,0311	-17589,585	-20613,852	506,73555	-3,93E-12	2918,4504	-1123,9104	550
-17626,7	17656,1	-1018,0275	5820,0067	-993,42232	-1497,30457	-17626,688	12004,7296	-17532,042	-20326,51	-479,27711	2161,35105	2699,8218	-4160,8901	560
-17479,8	17546,3	-1526,7731	7573,4126	-1493,3519	-2722,93684	-17479,775	2219,13981	-17397,27	-19438,14	-1196,1637	2425,23786	1958,3648	-8609,5002	570
-17216,8	17333,1	-2004,7366	5823,7272	-1964,9033	-3427,11788	-17216,792	-6242,74014	-17147,128	-18105,457	-1422,3813	1198,30464	888,6655	-12174,099	580
-16805,4	16975,6	-2397,7936	6918,685	-2354,1716	-3511,99418	-16805,371	-7954,36259	-16749,072	-16632,722	-1114,2006	1703,3454	-172,64936	-12293,542	590
-16236,6	16448	-2628,7449	4949,4455	-2609,5742	-3000,11823	-16236,625	-11104,5733	-16218,204	-15290,46	-371,37336	974,663653	-946,16518	-13197,517	600
-15542,6	15760,2	-2610,0771	4088,504	-2640,1074	-2034,66918	-15542,566	-12527,3144	-15563,642	-14299,666	575,40793	1026,9174	-1242,9001	-13413,49	610
-14806,8	14979,4	-2266,9647	3933,8179	-2381,0516	-833,161092	-14806,819	-13370,8827	-14861,981	-13782,709	1433,8036	1550,32839	-1024,1104	-13576,796	620
-14161,6	14248	-1566,8094	4112,8739	-1813,3776	375,7363446	-14161,615	-14128,791	-14232,57	-13748,923	1942,5457	2244,30511	-412,6912	-13938,857	630
-13766,3	13777,2	-546,81095	4335,9439	-992,874	1401,353385	-13766,313	-14958,4934	-13811,653	-14114,001	1948,1643	2868,64865	347,68847	-14536,247	640
-13768,8	13785,2	671,93791	4417,6916	-67,13903	2128,571637	-13768,781	-15846,7063	-13704,931	-14739,906	1456,6337	3273,13163	971,12497	-15293,306	650
-14258,9	14384,1	1893,7085	4275,7165	728,29195	2484,701303	-14258,865	-16711,5642	-13921,535	-15454,573	590,99276	3380,2089	1195,7085	-16083,069	660
-15229,1	15499,7	2883,6066	3909,6525	1096,172	2518,894068	-15229,11	-17467,4165	-14287,926	-16131,072	-364,71253	3214,27329	901,96219	-16799,244	670
-16558	16908	3422,2383	3369,4679	720,98287	2305,097205	-16558,045	-18059,4331	-14310,591	-16685,735	-1117,1411	2837,28256	127,69071	-17372,584	680
-18024,9	18336,2	3364,3364	2723,3999	-655,05651	1932,447559	-18024,95	-18473,6535	-12870,727	-17090,366	-1431,8888	2327,92374	-934,58378	-17782,01	690
-19354,8	19539,9	2683,2916	1892,6551	-7058,9841	1474,186608	-19354,751	-18383,0041	1137,094	-17349,958	-1209,105	1683,42086	-2004,7922	-17866,481	700
-20281,6	20336,1	1487,1476	1145,8021	-6553,1237	984,1296217	-20281,632	-18118,1876	15243,977	-17496,296	-503,018	1064,96587	-2785,3356	-17807,242	710
-20613,9	20613,9	3,383E-12	564,78347	-7,86E-12	490,9567773	-20613,852	-18151,8561	18366,031	-17571,326	490,95678	527,870123	-3042,5254	-17861,591	720

Таблица Г5 – Силы действующие на шатунную шейку

$K_{Rш}, Н$	$R_k, Н$	$R_k, Н$	$\psi, рад$	$\psi, град$	$Rш.ш., Н$	$\varphi_{кв}, град$
-5205,5995	-12108,7	12108,72027	0	0	12109	0
-5205,5995	-11821,4	11821,37828	0,1259899	7,2186869	11916	10
-5205,5995	-10933	10933,00862	0,2440905	13,985353	11267	20
-5205,5995	-9600,33	9600,325471	0,3428789	19,645515	10194	30
-5205,5995	-8127,59	8127,590086	0,4078755	23,369544	8853,9	40
-5205,5995	-6785,33	6785,328217	0,4163049	23,852515	7419	50
-5205,5995	-5794,53	5794,534045	0,3376864	19,348008	6141,4	60
-5205,5995	-5277,58	5277,577484	0,1565759	8,9711371	5342,9	70
-5205,5995	-5243,79	5243,791822	-0,0715313	-4,098442	5257,2	80
-5205,5995	-5608,87	5608,869454	-0,2448337	-14,027937	5781,3	90
-5205,5995	-6234,77	6234,774145	-0,3289957	-18,850067	6588,1	100
-5205,5995	-6949,44	6949,441475	-0,3433759	-19,673987	7380,3	110
-5205,5995	-7625,94	7625,940567	-0,3190235	-18,2787	8031,2	120
-5205,5995	-8180,6	8180,603615	-0,2746548	-15,736559	8499,2	130
-5205,5995	-8585,23	8585,234527	-0,2213998	-12,685273	8800	140
-5205,5995	-8844,83	8844,826904	-0,165154	-9,4626297	8966,8	150
-5205,5995	-8991,16	8991,16461	-0,1090212	-6,2464545	9044,9	160
-5205,5995	-9066,19	9066,194861	-0,0540996	-3,09968	9079,5	170
-5205,5995	-9093,89	9093,887235	-5,238E-17	-3,001E-15	9093,9	180
-5205,5995	-9084,45	9084,453047	0,0542459	3,1080638	9097,8	190
-5205,5995	-9026,91	9026,910032	0,1096101	6,2801972	9081,4	200
-5205,5995	-8892,14	8892,138884	0,166388	9,5333303	9016,7	210
-5205,5995	-8642	8641,996034	0,2235661	12,809393	8862,6	220
-5205,5995	-8243,94	8243,940044	0,2781606	15,937429	8573,5	230
-5205,5995	-7713,07	7713,072777	0,326242	18,692289	8142,6	240
-5205,5995	-7058,51	7058,510392	0,3579216	20,507396	7536,1	250
-5205,5995	-6356,85	6356,849419	0,358389	20,534178	6788,1	260
-5205,5995	-5727,44	5727,438395	0,3066269	17,568429	6007,7	270
-5205,5995	-5306,52	5306,521814	0,1849658	10,597762	5398,6	280
-5205,5995	-5199,8	5199,799232	0,0129111	0,7397534	5200,2	290
-5205,5995	-5416,4	5416,403425	-0,1336588	-7,658084	5465,1	300
-5205,5995	-5782,79	5782,794856	-0,1873348	-10,733494	5885,8	310
-5205,5995	-5805,46	5805,459576	-0,1235579	-7,0793439	5850,1	320
-5205,5995	-4365,6	4365,59514	0,1489386	8,5335539	4414,5	330
-5205,5995	9642,226	-9642,22558	-0,6319403	-36,207513	11950	340
-5205,5995	23749,11	-23749,1088	-0,2692319	-15,42585	24637	350
-5205,5995	26871,16	-26871,1627	-2,925E-16	-1,676E-14	26871	360
-5205,5995	20509,86	-20509,8612	0,2764977	15,842153	21320	370
-5205,5995	10724,27	-10724,2714	0,6148707	35,229496	13129	380
-5205,5995	2262,391	-2262,39145	1,2002618	68,769933	6247,7	390
-5205,5995	550,769	-550,769006	1,4913578	85,448509	6940,6	400
-5205,5995	-2599,44	2599,441716	-1,0871937	-62,291609	5590,5	410

-5205,5995	-4022,18	4022,182835	-0,793575	-45,468498	5735,3	420
-5205,5995	-4865,75	4865,751156	-0,6798848	-38,954529	6257	430
-5205,5995	-5623,66	5623,659436	-0,6314591	-36,179941	6967,2	440
-5205,5995	-6453,36	6453,361844	-0,5916095	-33,896726	7774,7	450
-5205,5995	-7341,57	7341,574718	-0,5416952	-31,036847	8568,2	460
-5205,5995	-8206,43	8206,43262	-0,4803219	-27,52042	9253,5	470
-5205,5995	-8962,28	8962,284908	-0,4113473	-23,568462	9777,9	480
-5205,5995	-9554,3	9554,301543	-0,339047	-19,425963	10131	490
-5205,5995	-9968,52	9968,521918	-0,266692	-15,280324	10334	500
-5205,5995	-9877,87	9877,872527	-0,1893111	-10,846726	10058	510
-5205,5995	-9613,06	9613,056002	-0,1186326	-6,7971474	9681,1	520
-5205,5995	-9646,72	9646,724541	-0,0584799	-3,3506515	9663,2	530
-5205,5995	-9209,63	9209,625235	-1,598E-16	-9,156E-15	9209,6	540
-5205,5995	-9190,27	9190,269884	0,0550825	3,1559943	9204,2	550
-5205,5995	-9121,56	9121,556457	0,1111468	6,3682431	9178,2	560
-5205,5995	-8974,64	8974,643806	0,1685075	9,6547693	9103,6	570
-5205,5995	-8711,66	8711,659969	0,2261834	12,959353	8939,4	580
-5205,5995	-8300,24	8300,239443	0,2812263	16,113078	8639,6	590
-5205,5995	-7731,49	7731,4934	0,3277428	18,77828	8166,2	600
-5205,5995	-7037,43	7037,434184	0,3551579	20,34905	7505,9	610
-5205,5995	-6301,69	6301,687857	0,3453248	19,785651	6697	620
-5205,5995	-5656,48	5656,483025	0,2702187	15,482389	5869,5	630
-5205,5995	-5261,18	5261,180987	0,1035613	5,9336251	5289,5	640
-5205,5995	-5263,65	5263,649176	-0,1269696	-7,2748196	5306,4	650
-5205,5995	-5753,73	5753,73302	-0,31796	-18,217768	6057,4	660
-5205,5995	-6723,98	6723,97838	-0,4051307	-23,212278	7316,2	670
-5205,5995	-8052,91	8052,912907	-0,4018444	-23,023987	8749,9	680
-5205,5995	-9519,82	9519,818311	-0,3397036	-19,463582	10097	690
-5205,5995	-10849,6	10849,61908	-0,2424516	-13,891452	11177	700
-5205,5995	-11776,5	11776,50022	-0,125616	-7,1972688	11870	710
-5205,5995	-12108,7	12108,72027	-2,794E-16	-1,601E-14	12109	720

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

R <sub>к.ш i</sub>	Значения R <sub>к.ш i</sub> , Н, для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R <sub>к.ш 0</sub>	17656,89	17656,89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17656,9
R <sub>к.ш 10</sub>	17649,58	17649,58	17649,6	0	0	0	0	0	0	0	0	17649,6
R <sub>к.ш 20</sub>	17608,11	17608,11	17608,1	0	0	0	0	0	0	0	0	17608,1
R <sub>к.ш 30</sub>	17503,78	17503,78	17503,8	0	0	0	0	0	0	0	0	17503,8
R <sub>к.ш 40</sub>	17296,22	17296,22	17296,2	0	0	0	0	0	0	0	0	17296,2
R <sub>к.ш 50</sub>	16944,63	16944,63	16944,6	0	0	0	0	0	0	0	0	16944,6
R <sub>к.ш 60</sub>	16437,43	16437,43	16437,4	0	0	0	0	0	0	0	0	16437,4
R <sub>к.ш 70</sub>	15773,08	15773,08	15773,1	0	0	0	0	0	0	0	0	15773,1
R <sub>к.ш 80</sub>	15015,34	15015,34	0	0	0	0	0	0	0	0	15015,3	15015,3
R <sub>к.ш 90</sub>	14297,34	14297,34	0	0	0	0	0	0	0	0	14297,3	14297,3
R <sub>к.ш 100</sub>	13810,46	13810,46	0	0	0	0	0	0	0	0	13810,5	13810,5
R <sub>к.ш 110</sub>	13740,18	13740,18	0	0	0	0	0	0	0	0	13740,2	13740,2
R <sub>к.ш 120</sub>	14151,06	14151,06	0	0	0	0	0	0	0	0	14151,1	14151,1
R <sub>к.ш 130</sub>	14892,06	14892,06	0	0	0	0	0	0	0	0	14892,1	14892,1
R <sub>к.ш 140</sub>	15572,72	15572,72	0	0	0	0	0	0	0	0	15572,7	15572,7
R <sub>к.ш 150</sub>	15507,12	15507,12	0	0	0	0	0	0	0	0	15507,1	15507,1
R <sub>к.ш 160</sub>	9367,893	9367,893	0	0	0	0	0	0	0	0	9367,89	9367,89
R <sub>к.ш 170</sub>	3572,187	3572,187	0	0	0	0	0	0	0	0	3572,19	3572,19
R <sub>к.ш 180</sub>	1123,91	1123,91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1123,91
R <sub>к.ш 190</sub>	5195,899	5195,899	5195,9	0	0	0	0	0	0	0	0	5195,9
R <sub>к.ш 200</sub>	9549,816	9549,816	9549,82	0	0	0	0	0	0	0	0	9549,82
R <sub>к.ш 210</sub>	12933,7	12933,7	12933,7	0	0	0	0	0	0	0	0	12933,7
R <sub>к.ш 220</sub>	13146,34	13146,34	13146,3	0	0	0	0	0	0	0	0	13146,3
R <sub>к.ш 230</sub>	13887,26	13887,26	13887,3	0	0	0	0	0	0	0	0	13887,3
R <sub>к.ш 240</sub>	13919,53	13919,53	13919,5	0	0	0	0	0	0	0	0	13919,5
R <sub>к.ш 250</sub>	13867,82	13867,82	13867,8	0	0	0	0	0	0	0	0	13867,8
R <sub>к.ш 260</sub>	14051,76	14051,76	14051,8	0	0	0	0	0	0	0	0	14051,8
R <sub>к.ш 270</sub>	14545,75	14545,75	14545,8	0	0	0	0	0	0	0	0	14545,8
R <sub>к.ш 280</sub>	15260,29	15260,29	15260,3	0	0	0	0	0	0	0	0	15260,3
R <sub>к.ш 290</sub>	16048,44	16048,44	16048,4	0	0	0	0	0	0	0	0	16048,4
R <sub>к.ш 300</sub>	16768,61	16768,61	0	0	0	0	0	0	0	0	16768,6	16768,6
R <sub>к.ш 310</sub>	17346,93	17346,93	0	0	0	0	0	0	0	0	17346,9	17346,9
R <sub>к.ш 320</sub>	17758,58	17758,58	0	0	0	0	0	0	0	0	17758,6	17758,6
R <sub>к.ш 330</sub>	17839,5	17839,5	17839,5	0	0	0	0	0	0	0	0	17839,5
R <sub>к.ш 340</sub>	17782,39	0	0	0	0	0	0	0	0	17782,39107	17782,4	17782,4
R <sub>к.ш 350</sub>	17840,89	17840,89	0	0	0	0	0	0	0	0	17840,9	17840,9
R <sub>к.ш 360</sub>	17644,75	17644,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17644,7
R <sub>к.ш 370</sub>	17649,03	17649,03	17649	0	0	0	0	0	0	0	0	17649
R <sub>к.ш 380</sub>	17624,34	17624,34	17624,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R <sub>к.ш 390</sub>	0	17551,2	17551,2	0	17551,20164	0	0	0	0	0	0	0
R <sub>к.ш 400</sub>	0	17395,19	17395,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R <sub>к.ш 410</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17115,8	17115,8
R <sub>к.ш 420</sub>	16679,97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16680	16680
R <sub>к.ш 430</sub>	16093,41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16093,4	16093,4
R <sub>к.ш 440</sub>	15382,17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15382,2	15382,2
R <sub>к.ш 450</sub>	14645,43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14645,4	14645,4
R <sub>к.ш 460</sub>	14049,09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14049,1	14049,1
R <sub>к.ш 470</sub>	13791,15	13791,15	0	0	0	0	0	0	0	0	13791,2	13791,2
R <sub>к.ш 480</sub>	14011,69	14011,69	0	0	0	0	0	0	0	0	14011,7	14011,7

R <sub>к.ш</sub> 490	14686,78	14686,78	0	0	0	0	0	0	0	0	14686,8	14686,8
R <sub>к.ш</sub> 500	15587,57	15587,57	0	0	0	0	0	0	0	0	15587,6	15587,6
R <sub>к.ш</sub> 510	16296,3	16296,3	0	0	0	0	0	0	0	0	16296,3	16296,3
R <sub>к.ш</sub> 520	16144,62	16144,62	0	0	0	0	0	0	0	0	16144,6	16144,6
R <sub>к.ш</sub> 530	9969,437	9969,437	0	0	0	0	0	0	0	0	9969,44	9969,44
R <sub>к.ш</sub> 540	4236,124	4236,124	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4236,12
R <sub>к.ш</sub> 550	1123,91	1123,91	1123,91	0	0	0	0	0	0	0	0	1123,91
R <sub>к.ш</sub> 560	4688,757	4688,757	4688,76	0	0	0	0	0	0	0	0	4688,76
R <sub>к.ш</sub> 570	8944,567	8944,567	8944,57	0	0	0	0	0	0	0	0	8944,57
R <sub>к.ш</sub> 580	12232,93	12232,93	12232,9	0	0	0	0	0	0	0	0	12232,9
R <sub>к.ш</sub> 590	12410,99	12410,99	12411	0	0	0	0	0	0	0	0	12411
R <sub>к.ш</sub> 600	13233,46	13233,46	13233,5	0	0	0	0	0	0	0	0	13233,5
R <sub>к.ш</sub> 610	13452,74	13452,74	13452,7	0	0	0	0	0	0	0	0	13452,7
R <sub>к.ш</sub> 620	13665,02	13665,02	13665	0	0	0	0	0	0	0	0	13665
R <sub>к.ш</sub> 630	14118,38	14118,38	14118,4	0	0	0	0	0	0	0	0	14118,4
R <sub>к.ш</sub> 640	14816,6	14816,6	14816,6	0	0	0	0	0	0	0	0	14816,6
R <sub>к.ш</sub> 650	15639,65	15639,65	0	0	0	0	0	0	0	0	15639,6	15639,6
R <sub>к.ш</sub> 660	16434,44	16434,44	0	0	0	0	0	0	0	0	16434,4	16434,4
R <sub>к.ш</sub> 670	17103,98	17103,98	0	0	0	0	0	0	0	0	17104	17104
R <sub>к.ш</sub> 680	17602,75	17602,75	0	0	0	0	0	0	0	0	17602,8	17602,8
R <sub>к.ш</sub> 690	17933,74	17933,74	0	0	0	0	0	0	0	0	17933,7	17933,7
R <sub>к.ш</sub> 700	17945,61	17945,61	0	0	0	0	0	0	0	0	17945,6	17945,6
R <sub>к.ш</sub> 710	17839,06	17839,06	0	0	0	0	0	0	0	0	17839,1	17839,1
ΣR <sub>к.ш</sub> i	17869,39	17869,39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17869,4

Таблица Г.7 - Суммарные силы действующие на 1-ю коренную шейку

R <sub>к.ш i</sub>	Значения R <sub>к.ш i</sub> , Н, для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R <sub>к.ш 0</sub>	10306,92593	10306,92593	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10306,92593
R <sub>к.ш 10</sub>	10190,79149	10190,79149	10190,79149	0	0	0	0	0	0	0	0	10190,79149
R <sub>к.ш 20</sub>	9813,965557	9813,965557	9813,965557	0	0	0	0	0	0	0	0	9813,965557
R <sub>к.ш 30</sub>	9213,478068	9213,478068	9213,478068	0	0	0	0	0	0	0	0	9213,478068
R <sub>к.ш 40</sub>	8499,72843	8499,72843	8499,72843	0	0	0	0	0	0	0	0	8499,72843
R <sub>к.ш 50</sub>	7791,002352	7791,002352	7791,002352	0	0	0	0	0	0	0	0	7791,002352
R <sub>к.ш 60</sub>	7221,84734	7221,84734	7221,84734	0	0	0	0	0	0	0	0	7221,84734
R <sub>к.ш 70</sub>	6903,934148	6903,934148	6903,934148	0	0	0	0	0	0	0	0	6903,934148
R <sub>к.ш 80</sub>	6877,028298	6877,028298	0	0	0	0	0	0	0	0	6877,028298	6877,028298
R <sub>к.ш 90</sub>	7091,69967	7091,69967	0	0	0	0	0	0	0	0	7091,69967	7091,69967
R <sub>к.ш 100</sub>	7446,40246	7446,40246	0	0	0	0	0	0	0	0	7446,40246	7446,40246
R <sub>к.ш 110</sub>	7826,518531	7826,518531	0	0	0	0	0	0	0	0	7826,518531	7826,518531
R <sub>к.ш 120</sub>	8163,276247	8163,276247	0	0	0	0	0	0	0	0	8163,276247	8163,276247
R <sub>к.ш 130</sub>	8422,102359	8422,102359	0	0	0	0	0	0	0	0	8422,102359	8422,102359
R <sub>к.ш 140</sub>	8599,63615	8599,63615	0	0	0	0	0	0	0	0	8599,63615	8599,63615
R <sub>к.ш 150</sub>	8706,237505	8706,237505	0	0	0	0	0	0	0	0	8706,237505	8706,237505
R <sub>к.ш 160</sub>	8761,975975	8761,975975	0	0	0	0	0	0	0	0	8761,975975	8761,975975
R <sub>к.ш 170</sub>	8789,091988	8789,091988	0	0	0	0	0	0	0	0	8789,091988	8789,091988
R <sub>к.ш 180</sub>	8799,509414	8799,509414	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8799,509414
R <sub>к.ш 190</sub>	8798,249992	8798,249992	8798,249992	0	0	0	0	0	0	0	0	8798,249992
R <sub>к.ш 200</sub>	8780,082167	8780,082167	8780,082167	0	0	0	0	0	0	0	0	8780,082167
R <sub>к.ш 210</sub>	8730,623114	8730,623114	8730,623114	0	0	0	0	0	0	0	0	8730,623114
R <sub>к.ш 220</sub>	8629,670198	8629,670198	8629,670198	0	0	0	0	0	0	0	0	8629,670198
R <sub>к.ш 230</sub>	8456,854096	8456,854096	8456,854096	0	0	0	0	0	0	0	0	8456,854096
R <sub>к.ш 240</sub>	8213,404142	8213,404142	8213,404142	0	0	0	0	0	0	0	0	8213,404142
R <sub>к.ш 250</sub>	7892,989277	7892,989277	7892,989277	0	0	0	0	0	0	0	0	7892,989277
R <sub>к.ш 260</sub>	7525,753886	7525,753886	7525,753886	0	0	0	0	0	0	0	0	7525,753886
R <sub>к.ш 270</sub>	7173,813258	7173,813258	7173,813258	0	0	0	0	0	0	0	0	7173,813258
R <sub>к.ш 280</sub>	6923,647316	6923,647316	6923,647316	0	0	0	0	0	0	0	0	6923,647316
R <sub>к.ш 290</sub>	6852,547638	6852,547638	6852,547638	0	0	0	0	0	0	0	0	6852,547638
R <sub>к.ш 300</sub>	6970,285977	6970,285977	0	0	0	0	0	0	0	0	6970,285977	6970,285977
R <sub>к.ш 310</sub>	7164,957	7164,957	0	0	0	0	0	0	0	0	7164,957	7164,957
R <sub>к.ш 320</sub>	7164,370801	7164,370801	0	0	0	0	0	0	0	0	7164,370801	7164,370801
R <sub>к.ш 330</sub>	6443,692762	6443,692762	6443,692762	0	0	0	0	0	0	0	0	6443,692762
R <sub>к.ш 340</sub>	3574,990865	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3574,990865	3574,990865
R <sub>к.ш 350</sub>	8296,418976	8296,418976	0	0	0	0	0	0	0	0	8296,418976	8296,418976
R <sub>к.ш 360</sub>	9183,015534	9183,015534	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9183,015534
R <sub>к.ш 370</sub>	6670,569879	6670,569879	6670,569879	0	0	0	0	0	0	0	0	6670,569879
R <sub>к.ш 380</sub>	3945,920653	3945,920653	3945,920653	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R <sub>к.ш 390</sub>	0	4268,711825	4268,711825	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R <sub>к.ш 400</sub>	0	5271,149921	5271,149921	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R <sub>к.ш 410</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6078,827178	6078,827178
R <sub>к.ш 420</sub>	6588,806257	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6588,806257	6588,806257
R <sub>к.ш 430</sub>	6968,777306	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6968,777306	6968,777306
R <sub>к.ш 440</sub>	7357,623044	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7357,623044	7357,623044
R <sub>к.ш 450</sub>	7787,119741	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7787,119741	7787,119741
R <sub>к.ш 460</sub>	8225,480231	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8225,480231	8225,480231
R <sub>к.ш 470</sub>	8624,936667	8624,936667	0	0	0	0	0	0	0	0	8624,936667	8624,936667
R <sub>к.ш 480</sub>	8949,804775	8949,804775	0	0	0	0	0	0	0	0	8949,804775	8949,804775
R <sub>к.ш 490</sub>	9185,538079	9185,538079	0	0	0	0	0	0	0	0	9185,538079	9185,538079
R <sub>к.ш 500</sub>	9336,65868	9336,65868	0	0	0	0	0	0	0	0	9336,65868	9336,65868
R <sub>к.ш 510</sub>	9240,089066	9240,089066	0	0	0	0	0	0	0	0	9240,089066	9240,089066
R <sub>к.ш 520</sub>	9077,190978	9077,190978	0	0	0	0	0	0	0	0	9077,190978	9077,190978
R <sub>к.ш 530</sub>	9080,320224	9080,320224	0	0	0	0	0	0	0	0	9080,320224	9080,320224
R <sub>к.ш 540</sub>	8857,378414	8857,378414	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8857,378414
R <sub>к.ш 550</sub>	8851,327786	8851,327786	8851,327786	0	0	0	0	0	0	0	0	8851,327786
R <sub>к.ш 560</sub>	8828,030804	8828,030804	8828,030804	0	0	0	0	0	0	0	0	8828,030804
R <sub>к.ш 570</sub>	8773,163401	8773,163401	8773,163401	0	0	0	0	0	0	0	0	8773,163401
R <sub>к.ш 580</sub>	8666,55757	8666,55757	8666,55757	0	0	0	0	0	0	0	0	8666,55757
R <sub>к.ш 590</sub>	8487,784014	8487,784014	8487,784014	0	0	0	0	0	0	0	0	8487,784014
R <sub>к.ш 600</sub>	8224,024117	8224,024117	8224,024117	0	0	0	0	0	0	0	0	8224,024117
R <sub>к.ш 610</sub>	7880,099197	7880,099197	7880,099197	0	0	0	0	0	0	0	0	7880,099197

R <sub>к.ш</sub> 620	7489,676748	7489,676748	7489,676748	0	0	0	0	0	0	0	0	7489,676748
R <sub>к.ш</sub> 630	7124,012567	7124,012567	7124,012567	0	0	0	0	0	0	0	0	7124,012567
R <sub>к.ш</sub> 640	6888,584112	6888,584112	6888,584112	0	0	0	0	0	0	0	0	6888,584112
R <sub>к.ш</sub> 650	6892,583413	6892,583413	0	0	0	0	0	0	0	0	6892,583413	6892,583413
R <sub>к.ш</sub> 660	7192,032955	7192,032955	0	0	0	0	0	0	0	0	7192,032955	7192,032955
R <sub>к.ш</sub> 670	7749,854476	7749,854476	0	0	0	0	0	0	0	0	7749,854476	7749,854476
R <sub>к.ш</sub> 680	8454,001311	8454,001311	0	0	0	0	0	0	0	0	8454,001311	8454,001311
R <sub>к.ш</sub> 690	9168,118376	9168,118376	0	0	0	0	0	0	0	0	9168,118376	9168,118376
R <sub>к.ш</sub> 700	9769,93382	9769,93382	0	0	0	0	0	0	0	0	9769,93382	9769,93382
R <sub>к.ш</sub> 710	10168,04058	10168,04058	0	0	0	0	0	0	0	0	10168,04058	10168,04058
ΣR <sub>к.ш</sub> i	10306,92593	10306,92593	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10306,92593

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д Расчет основных деталей двигателя

### Д.1 Расчет поршневой группы

#### Д.1.1 Расчет поршня

Напряжение изгиба в днище поршня

$$\sigma_{из} = P_{z0} * (r_i / \delta)^2 = 7,539 * (29,8/8)^2 = 104,6 \text{ МПа} , \quad (\text{Д.1})$$

где

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

Днище поршня должно быть усилено ребрами жесткости.

Напряжение сжатия в сечении х – х

$$\sigma_{сж} = P_{z0} / F_{x-x} = 0,0398 / 0,001366 = 29,1 \text{ МПа} , \quad (\text{Д.3})$$

где:

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

$$F_{x-x} = (\pi/4) * (d_k^2 * d_i^2) * -n'_M F' = \left[ 3,14/4 \right] * (73,6^2 - 60^2) - 4 * 15 \cdot 10^{-6} = 0,001366 \text{ м}^2 ; \quad (\text{Д.5})$$

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

Напряжение разрыва в сечении х - х:

- максимальная угловая скорость холостого хода

$$\omega_{x.x. \max} = \pi * n_{x.x. \max} / 30 = 3,14 * 6000 / 30 = 628 \text{ рад/сж} ; \quad (\text{Д.7})$$

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

$$m_{x.x.} = 0,5 * m_{II} = 0,5 * 0,422 = 0,211 \text{ кг} ; \quad (\text{Д.8})$$

- максимальная разрывающая сила

$$P_j = m_{x.x.} * R * \omega_{x.x. \max}^2 * (1 + \lambda) = 0,211 * 0,0375 * 628^2 * (1 + 0,3125) * 10^{-6} = 0,00606 \text{ МН} ; \quad (\text{Д.9})$$

- напряжение разрыва

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

Напряжения в верхней кольцевой перемычке:

- среза

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

- изгиба

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

- сложное

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

Удельное давление поршня на стенку цилиндра:

$$q_1 = N_{\max} / (h_{ю} * D) = 0,0019806 / (0,045 * 0,082) = 0,54 \text{ МПа}; \quad (\text{Д.14})$$

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

Диаметры головки и юбки поршня:

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

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

Диаметральные зазоры в горячем состоянии:

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

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

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

## Д.1.2 Расчет поршневого кольца

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

Среднее давление кольца на стенку цилиндра

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

где

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

Давление кольца на стенку цилиндра в различных точках окружности

$$p = p_{cp} * \mu_k \quad (\text{Д.24})$$

Результаты расчета  $p$ , а также  $\mu_k$  для различных углов  $\varphi$  приведены в таблице Д.1

Таблица Д.1 – Результаты расчета

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

Напряжение изгиба кольца в рабочем состоянии

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

Напряжение изгиба при надевании кольца на поршень

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

Монтажный зазор в замке поршневого кольца

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

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

### Д.1.3 Расчет поршневого пальца

Расчетная сила, действующая на поршневой палец:

- газовая

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

- инерционная

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

где

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

- расчетная

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

Удельное давление пальца на втулку поршневой головки

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

Удельное давление пальца на бобышки

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

Напряжение изгиба в среднем сечении пальца

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

где

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

Касательные напряжения среза в сечениях между бобышками и головкой шатуна

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

Наибольшее увеличение горизонтального диаметра пальца при овализации

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

Напряжения овализации на внешней поверхности пальца:

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

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

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

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

Напряжения овализации на внутренней поверхности пальца:

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

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

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

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

## Д.2 Расчет шатунной группы

### Д.2.1 Расчет поршневой головки шатуна

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

Материал втулки — бронза;  $E_B = 1,15 * 10^5 \text{ МПа}$ ,  $\alpha_B = 1,8 * 10^{-5} \text{ 1/К}$ .

По формулам определяем:

- при изгибе:

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

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

- при растяжении-сжатии:

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

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

Расчет сечения I-I:

- максимальное напряжение пульсирующего цикла

$$\sigma_{\max} = \frac{(n + m_{в.г.}) * \omega_{x.x.\max}^2 * R * (+\lambda) * 10^{-6}}{2 * h_z * l_{ш}} = \frac{(0,422 + 0,032) * 628 * 0,0375 * (+0,3125) * 10^{-6}}{2 * 0,004 * 0,027} = 40,8 \text{ МПа} \quad (\text{Д.44})$$

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

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

- среднее напряжение и амплитуда напряжений:

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

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

где  $k_{\sigma} = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (\sigma_B - 400) = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (800 - 400) = 1,272$  - эффективный коэффициент концентрации напряжений (головка не имеет резких переходов и концентрация напряжений в основном зависит от качественной структуры материала);  $\varepsilon_M = 0,85$  - масштабный коэффициент;  $\varepsilon_n = 1$  - коэффициент поверхностной чувствительности.

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

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

Напряжения от запрессованной втулки (суммарный натяг)

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

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

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

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

Удельное давление на поверхности соприкосновения втулки с головкой

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

$$= \frac{0,0611}{24 * \left[ \frac{\left( \frac{2^2 + 24^2}{2,2 * 10^5} \right)^{0,3} \left( \frac{4^2 + 22^2}{1,15 * 10^5} \right)^{0,3}}{\left( \frac{2^2 - 24^2}{2,2 * 10^5} \right)^{0,3} \left( \frac{4^2 - 22^2}{1,15 * 10^5} \right)^{0,3}} \right]} = 22,1 \text{ МПа} \quad (\text{Д.48})$$

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

Напряжение от суммарного натяга на внутренней поверхности головки

$$\sigma'_i = \frac{P * \left( \frac{d_2^2 + d^2}{d_2^2 - d^2} \right)}{\left( \frac{32^2 + 24^2}{32^2 - 24^2} \right)} = \frac{22,1 * \left( \frac{2^2 + 24^2}{32^2 - 24^2} \right)}{\left( \frac{32^2 + 24^2}{32^2 - 24^2} \right)} = 78,93 \text{ МПа} \quad (\text{Д.49})$$

Напряжение от суммарного натяга на внешней поверхности головки

$$\sigma'_a = \frac{P * 2 * d^2}{d_2^2 - d^2} = \frac{22,1 * 2 * 24^2}{32^2 - 24^2} = 56,83 \text{ МПа} \quad (\text{Д.50})$$

Расчет сечения А-А на изгиб:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$M_{j\varphi_{u.z}} = M_{j0} + N_{jn} * r_{cp} * (1 - \cos \varphi_{u.z}) + 0,5 * P_{jn} * r_{cp} * (\sin \varphi_{u.z} - \cos \varphi_{u.z}) = 0,494 + 3480 * 0,014 * (1 - \cos 105^\circ) + 0,5 * (-7132) * 0,014 * (\sin 105^\circ -$$

$$-\cos 105^{\circ}) = 0,68 \text{ Н*м.} \quad (\text{Д.55})$$

Напряжение на внешнем волокне от растягивающей силы

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

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

где:

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

$$F_2 = (\varnothing_2 - d) \cdot l_{ш} = (2 - 24) \cdot 27 = 216 \text{ мм}^2;$$

$$F_B = (\varnothing - d_n) \cdot l_{ш} = (4 - 22) \cdot 27 = 54 \text{ мм}^2. \quad (\text{Д.57})$$

Суммарная сила, сжимающая головку

$$P_{сж} = (\varnothing_{z0} - P_0) * F_n - m_n * R * \omega^2 (\cos \varphi + \lambda * \cos 2\varphi) = (6,7596 - 0,1) *$$

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

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

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

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

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

$$M_{сж\varphi_{ш.з.}} = P_{сж} * r_{cp} * \left[ \frac{M_{сж0}}{P_{сж} * r_{cp}} + \frac{N_{сж0}}{P_{сж}} * (-\cos \varphi_{ш.з.}) - \left( \frac{\sin \varphi_{ш.з.}}{2} - \frac{\varphi_{ш.з.}}{\pi} * \sin \varphi_{ш.з.} - \frac{1}{\pi} * \cos \varphi_{ш.з.} \right) \right] =$$

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

где :

$$\frac{N_{сж0}}{P_{сж}} = 0,0005;$$

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

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

$$f(\varphi_{u.3}) = 1 - \cos \varphi_{u.3} = 1,2588 ;$$

Напряжение на внешнем волокне от сжимающей силы

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

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

Максимальное и минимальное напряжения асимметричного цикла:

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

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

Среднее напряжение и амплитуды напряжения:

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

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

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

Так как  $\sigma_{ak} / \sigma_m = 35,63 / 72,47 = 0,492 \leq \left[ \beta_\sigma - \alpha_\sigma \right] \left[ -\beta_\sigma \right] = 3,97$ , то запас прочности в сечении А-А определяется по пределу текучести

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

## Д.2.2 Расчет кривошипной головки шатуна

Максимальная сила инерции

$$P_{jp} = -R * \omega_{x.x.\max}^2 * \left[ m_n + m_{u.n.} \right] (1 + \lambda) + \left[ m_{u.k.} - m_{kp} \right] * 10^{-6} = -628^2 * 0,0375 *$$

$$* \left[ 0,422 + 0,132 \right] + \left[ 0,3125 \right] + \left[ 0,396 - 0,132 \right] * 10^{-6} = -0,0147 \text{ МН,} \quad (\text{Д.66})$$

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

Момент сопротивления расчетного сечения

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

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

Моменты инерции вкладыша и крышки:

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

Напряжение изгиба крышки и вкладыша:

$$\begin{aligned} \sigma_{из} &= P_{jp} * \left[ \frac{0,023 * c_{\delta}}{(J_B + J) * W_{ИЗ}} + \frac{0,4}{F_z} \right] = 0,0147 * \left[ \frac{0,023 * 0,06}{\left( 1 + \frac{176 * 10^{-12}}{1408 * 10^{-12}} \right) * 0,587 * 10^{-7}} + \frac{0,4}{0,000132} \right] = \\ &= 352 \text{ МПа}, \end{aligned} \quad (\text{Д.69})$$

где

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

### Д.2.3 Расчет стержня шатуна

Площадь и моменты инерции расчетного сечения В - В:

$$\begin{aligned} F_{cp} &= h_{ш} * b_{ш} - (d_{ш} - a_{ш}) * (d_{ш} - 2 * t_{ш}) = 24 * 15 - (15 - 5) * \\ &* (24 - 2 * 4,5) = 210 \text{ мм}^2 = 210 * 10^{-6} \text{ м}^2; \\ J_x &= \frac{h_{ш}^3 * b_{ш} - (d_{ш} - a_{ш})^3 * (d_{ш} - 2 * t_{ш})}{12} = \frac{24^3 * 15 - (15 - 5)^3 * (24 - 2 * 4,5)^3}{12} = \\ &= 14468 \text{ мм}^2 = 144,7 * 10^{-10} \text{ м}^4; \\ J_y &= \frac{h_{ш} * b_{ш}^3 - (d_{ш} - a_{ш}) * (d_{ш} - 2 * t_{ш})^3}{12} = \frac{24 * 15^3 - (15 - 5) * (24 - 2 * 4,5)^3}{12} = \\ &= 6408 \text{ мм}^2 = 641 * 10^{-11} \text{ м}^4. \end{aligned} \quad (\text{Д.71})$$

Максимальное напряжение от сжимающей силы: в плоскости шатуна

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

где

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

Плоскости, перпендикулярной плоскости качения шатуна

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

где:

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

Минимальное напряжение от растягивающей силы

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

Средние напряжения и амплитуды цикла:

$$\begin{aligned} \sigma_{mx} &= \left( \frac{\sigma_{\max.x} + \sigma_{\min}}{2} \right) = \left( \frac{35 - 44,7}{2} \right) = 45,2 \text{ МПа}; \\ \sigma_{my} &= \left( \frac{\sigma_{\max.y} + \sigma_{\min}}{2} \right) = \left( \frac{28 - 44,7}{2} \right) = 41,7 \text{ МПа}; \\ \sigma_{ax} &= \left( \frac{\sigma_{\max.x} - \sigma_{\min}}{2} \right) = \left( \frac{35 + 44,7}{2} \right) = 89,9 \text{ МПа}; \\ \sigma_{ay} &= \left( \frac{\sigma_{\max.y} - \sigma_{\min}}{2} \right) = \left( \frac{28 + 44,7}{2} \right) = 86,4 \text{ МПа}; \end{aligned} \quad (\text{Д.76})$$

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

где:

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

$$\varepsilon_M = 0,86;$$

$\varepsilon_n = 1,3$  - определяется с учетом поверхностного упрочнения стержня шатуна обдувкой дробью.

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

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

$$n_{\sigma y} = \frac{\sigma_{-1}}{\beta_{aky} + \alpha_\sigma * \sigma_{my}} = \frac{210}{98,3 + 0,12 * 41,7} = 2,03 \quad (Д.79)$$

#### Д.2.4 Расчет шатунных болтов

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

$$\beta_\sigma = \sigma_{-1p} / \sigma_T = 300 / 800 = 0,375, \quad (Д.80)$$

$$\frac{(\beta_\sigma - \alpha_\sigma)}{(1 - \beta_\sigma)} = \frac{0,375 - 0,17}{1 - 0,375} = 0,328 \quad (Д.81)$$

Сила предварительной затяжки

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

Суммарная сила, растягивающая болт

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

где  $\chi = 0,2$ .

Максимальные и минимальные напряжения, возникающие в болте:

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

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

Среднее напряжение и амплитуды цикла:

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

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

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

$$n_{\tau\sigma} = \frac{\sigma_T}{\sigma_{ak} + \sigma_m} = \frac{800}{4,9 + 266} = 2,49\tag{Д.86}$$

### Д.3 Расчет коленчатого вала

Определяем:

- пределы прочности  $\sigma_B = 400$  МПа и текучести (условные)  $\sigma_T = 300$  МПа и  $\tau_T = 160$  МПа;

- пределы усталости (выносливости) при изгибе  $\sigma_{-1} = 150$  МПа, растяжении-сжатии  $\sigma_{-1p} = 120$  МПа и кручении  $\tau_{-1} = 115$  МПа;

- коэффициенты приведения цикла при изгибе  $\alpha_\sigma = 0,4$  и кручении  $\alpha_\tau = 0,6$ .

Напряжения при изгибе:

$$\beta_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_m} = \frac{150}{300} = 0,5;\tag{Д.87}$$

$$\frac{(\beta_\sigma - \alpha_\sigma)}{(1 - \beta_\sigma)} = \frac{0,5 - 0,4}{1 - 0,5} = 0,2.\tag{Д.88}$$

Напряжения при кручении:

$$\beta_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_m} = 0,719 ; \quad (Д.89)$$

$$\frac{(\beta_{\tau} - \alpha_{\tau})}{(1 - \beta_{\tau})} = \frac{0,719 - 0,6}{1 - 0,719} = 0,42. \quad (Д.90)$$

### Д.3.1 Удельное давление на поверхности шеек

Шатунных шеек:

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

$$k_{ШШ \max} = \frac{R_{ШШ \max}}{d_{ШШ} * l'_{ШШ}} = \frac{21360 * 10^{-6}}{48 * 22 * 10^{-6}} = 20,2 МПа, \quad (Д.91)$$

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

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

Коренных шеек:

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

$$k_{КШ \max} = \frac{R_{КШ \max}}{d_{КШ} * l'_{КШ}} = \frac{16459 * 10^{-6}}{50 * 22 * 10^{-6}} = 14,9 МПа, \quad (Д.92)$$

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

### Д.3.2 Расчет коренной шейки

Момент сопротивления кручению коренной шейки

$$W_{\text{кш}} = \frac{\pi}{16} * d_{\text{кш}}^3 = \frac{3,14 * 50^3 * 10^{-9}}{16} = 24,5 * 10^{-6} \text{ м}^3 \quad (Д.93)$$

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

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \frac{M_{KШmax}}{W_{\kappa\mu}} = \frac{500 * 10^{-6}}{24,5 * 10^{-6}} = 20,4 \text{ МПа}; \\ \tau_{\min} &= \frac{M_{KШmin}}{W_{\kappa\mu}} = \frac{-201,6 * 10^{-6}}{24,5 * 10^{-6}} = -8,2 \text{ МПа}.\end{aligned}\tag{Д.94}$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned}\tau_m &= \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = \frac{20,4 - 8,2}{2} = 6,1 \text{ МПа}; \\ \tau_a &= \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = \frac{20,4 + 8,2}{2} = 14,3 \text{ МПа}; \\ \tau_{ak} &= \frac{\tau_a * k_\tau}{\varepsilon_{M\tau} * \varepsilon_{n\tau}} = \frac{14,3 * 1,1}{0,72 * 1,2} = 18,2 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{Д.95}$$

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

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

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

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

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

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

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{ak} + \alpha_\tau * \tau_m} = \frac{115}{18,2 + 0,6 * 6,1} = 5,2\tag{Д.96}$$

### Д.3.3 Расчёт шатунной шейки

Момент сопротивления кручению шатунной шейки

$$W_{\kappa\mu} = \frac{\pi}{16} * d_{\kappa\mu}^3 = \frac{3,14 * 48^3 * 10^{-9}}{16} = 21,7 * 10^{-6} \text{ м}^3.\tag{Д.97}$$

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла :

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \frac{M_{\text{III max}}}{W_{\text{III}}} = \frac{552 * 10^{-6}}{21,7 * 10^{-6}} = 25,4 \text{ МПа}; \\ \tau_{\min} &= \frac{M_{\text{III min}}}{W_{\text{III}}} = \frac{-148 * 10^{-6}}{21,7 * 10^{-6}} = -6,8 \text{ МПа}.\end{aligned}\tag{Д.98}$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned}\tau_m &= \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = \frac{25,4 - 6,8}{2} = 9,3 \text{ МПа}; \\ \tau_a &= \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = \frac{25,4 + 6,8}{2} = 16,1 \text{ МПа}; \\ \tau_{\text{ак}} &= \frac{\tau_a * k_\tau}{\varepsilon_{M\tau} * \varepsilon_{n\tau}} = \frac{16,1 * 1,1}{0,73 * 1,2} = 18,2 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{Д.99}$$

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

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

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

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

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

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

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{\text{ак}} + \alpha_\tau * \tau_m} = \frac{115}{16,1 + 0,6 * 9,3} = 5,3\tag{Д.100}$$

Максимальное и минимальное нормальные напряжения асимметричного цикла шатунной шейки:

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \frac{M_{\varphi_M \max}}{W_{\text{сIII}}} = \frac{6,76 * 10^{-6}}{10,85 * 10^{-6}} = 0,62 \text{ МПа}, \\ \sigma_{\min} &= \frac{M_{\varphi_M \min}}{W_{\text{сIII}}} = \frac{-244 * 10^{-6}}{10,85 * 10^{-6}} = 22,5 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{Д.101}$$

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

Среднее напряжение и амплитуда цикла:

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{0,62 - 22,5}{2} = -10,9 \text{ МПа} \\ \sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{0,62 + 22,5}{2} = 11,6 \text{ МПа} \\ \sigma_{ak} &= \frac{\sigma_a * k_\sigma}{\varepsilon_{M\sigma} * \varepsilon_{n\sigma}} = \frac{11,6 * 1,8}{0,76 * 1,2} = 22,9 \text{ МПа}\end{aligned}\tag{Д.102}$$

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

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

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

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

Запас прочности шатунной шейки от нормальных напряжений определяется по пределу усталости

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{ak} + \alpha_\tau * \sigma_m} = \frac{150}{22,9 + 0,4 * (-10,9)} = 8,09\tag{Д.103}$$

Общий запас прочности шатунной шейки

$$n_{\text{шт}} = \frac{n_\sigma * n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} = \frac{8,09 * 5,3}{\sqrt{8,09^2 + 5,3^2}} = 4,43.\tag{Д.104}$$

#### Д.3.4 Расчёт щеки

Максимальный и минимальный моменты, скручивающие щёку:

$$\begin{aligned}M_{к.щ. \max} &= T_{\max} * 0,5 * (l_{к.щ.} + h) = 2378 * 0,5 * (28 + 18) * 10^{-3} = 54,7 \text{ Н * м}; \\ M_{к.щ. \min} &= T_{\min} * 0,5 * (l_{к.щ.} + h) = -4081 * 0,5 * (28 + 18) * 10^{-3} = -93,9 \text{ Н * м};\end{aligned}\tag{Д.105}$$

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла щеки:

$$\tau_{\max} = \frac{M_{к.щ.маx}}{W_{щ}} = \frac{54,7 * 10^{-6}}{6,99 * 10^{-6}} = 7,8 \text{ МПа};$$

$$\tau_{\min} = \frac{M_{к.щ.миn}}{W_{щ}} = \frac{-93,9 * 10^{-6}}{6,99 * 10^{-6}} = -13,4 \text{ МПа};$$
(Д.106)

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

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = \frac{7,8 - 13,4}{2} = -2,8 \text{ МПа}$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = \frac{7,8 + 13,4}{2} = 10,6 \text{ МПа}$$

$$\tau_{ак} = \frac{\tau_a * k_{\tau}}{\varepsilon_{M\tau} * \varepsilon_{n\tau}} = \frac{10,6 * 0,7}{0,64 * 0,75} = 15,5 \text{ МПа}$$
(Д.107)

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

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

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

Запас прочности щеки от касательных напряжений определяем по пределу усталости

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{ак} + \alpha_{\tau} * \tau_m} = \frac{115}{15,5 + 0,6 * (-2,8)} = 8,32$$
(Д.108)

Максимальное и минимальное нормальные напряжения щеки:

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

$$P_{щ.миn} = \frac{K_{\min} + K_R}{2} = \frac{-9386 - 15324}{2} = -12355 \text{ Н},$$
(Д.109)

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

$$M_{щ.миn} = 0,25 * (K_{\min} + K_R + 2 * (-P'_{PP})) * l_{ку} = 0,25 * (-12355 - 15324 + 2 * 8000) * 28 * 10^{-3} = -81,8 \text{ Нм}$$
(Д.110)

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

$$\sigma_{\Sigma \min} = \frac{M_{\text{ц. min}}}{W_{\text{ц}}} + \frac{P_{\text{ц. min}}}{F_{\text{ц}}} = \frac{-81,8 * 10^{-6}}{4,21 * 10^{-6}} + \frac{-12355 * 10^{-6}}{1368 * 10^{-6}} = -25,9 \text{ МПа},$$
(Д.111)

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

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

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

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

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

$$\sigma_{\text{ак}} = \frac{\sigma_a * k_{\sigma}}{\varepsilon_{M\sigma} * \varepsilon_{n\sigma}} = \frac{36,7 * 1,16}{0,7 * 0,75} = 81,1 \text{ МПа}.$$
(Д.112)

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

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

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

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

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

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\text{ак}} + \alpha_{\tau} * \sigma_m} = \frac{150}{81,1 + 0,4 * 10,8} = 1,75$$
(Д.113)

Общий запас прочности шатунной шейки

$$n_{\text{шт}} = \frac{n_{\sigma} * n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} = \frac{1,75 * 8,32}{\sqrt{1,75^2 + 8,32^2}} = 1,71.$$
(Д.114)

Приложение Е – Спецификация сборочного чертежа

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
<i>Документация</i>						
А0			16.БР.ЭМСЧ.007.00.000.СБ	Сборочный чертеж	2	
А4			16.БР.ЭМСЧ.007.00.000.ПЗ	Пояснительная записка	102	
<i>Сборочные единицы</i>						
		1	16.БР.ЭМСЧ.007.01.000	Блок цилиндров в сборе	1	
		2	16.БР.ЭМСЧ.007.02.000	Головка блока цилиндров	1	
		3	16.БР.ЭМСЧ.007.03.000	Маховик	1	
		4	16.БР.ЭМСЧ.007.04.000	Насос системы охлаждения	1	
		5	16.БР.ЭМСЧ.007.05.000	ТНВД	1	
		6	16.БР.ЭМСЧ.007.06.000	Маслоприемник	1	
		7	16.БР.ЭМСЧ.007.07.000	Аккумулятор топлива	1	
		8	16.БР.ЭМСЧ.007.08.000	Форсунка	4	
		9	16.БР.ЭМСЧ.007.09.000	Электромагнитный клапан	4	
		10	16.БР.ЭМСЧ.007.10.000	Масляный насос	1	
		11	16.БР.ЭМСЧ.007.11.000	Коленчатый вал	1	
		12	16.БР.ЭМСЧ.007.12.000	Поршень	4	
		13	16.БР.ЭМСЧ.007.13.000	Шатун	4	
		14	16.БР.ЭМСЧ.007.14.000	Поддон картера	1	
		15	16.БР.ЭМСЧ.007.15.000	Выпускной коллектор	1	
<b>16.БР.ЭМСЧ.007.00.000</b>						
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
Разраб.		Кудашов И.А.			Лит.	Лист
Проб.		Смоленский В.В.			1	2
Н.контр.		Смоленский В.В.			ТГУ, ИЗУЭ, гр. ЭМСДЗ-1131	
Утв.		Павлов Д.А.				
Копировал					Формат А4	

