

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»

(наименование кафедры)

13.03.03 «Энергетическое машиностроение»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Двигатели внутреннего сгорания

(направленность (профиль/специализация))

## БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему Модернизация системы охлаждения двигателей семейства ВАЗ

Студент

М.А. Масленков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Нормоконтролер

А.Г. Егоров

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультант

Т.С. Анисифорова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой

к.т.н., доцент Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Тольятти 2019

## ABSTRACT

This graduation project deals with modernization of the engine cooling system.

The aim of the work is to give some information about cooling systems and methods to improve their efficiency.

The object of the thesis is the engine cooling system.

The subject of the graduation work is VAZ 21127 engine.

Issues of improving the efficiency of the system, the environmental performance, the safety and the economic component are highlighted in the project's general part.

The graduation work describes in details the need to improve the efficiency of the engine cooling system.

The first chapter gives an analysis of the relevance of the problem and the means of its solution.

The second chapter presents thermal calculation of the under consideration VAZ 21127 engine.

The kinematics and dynamics calculation of the engine is presented in the third chapter.

In the fourth part, the cooling system calculation of the catalytic with micro-channel heat exchanger made of aircraft aluminum alloy is presented.

In conclusion we'd like to stress that the technology is compliant with the environment and safety standards.

The work graduation project consists of an explanatory note on 74 pages, introduction, including 29 figures, 13 tables, the list of 25 references including 7 foreign sources and five appendices, and the graphic part on 6 A1 sheets.

## АННОТАЦИЯ

Данный дипломный проект посвящен модернизации системы охлаждения двигателя.

Целью работы является предоставление некоторой информации о системах охлаждения и способах повышения их эффективности.

Объектом диссертации является система охлаждения двигателя.

Предметом дипломной работы является двигатель ВАЗ 21127.

В общей части проекта освещены вопросы повышения эффективности системы, экологических показателей, безопасности и экономической составляющей.

В дипломной работе подробно описывается необходимость повышения эффективности системы охлаждения двигателя.

В первой главе дается анализ актуальности проблемы и средств ее решения.

Во второй главе представлен тепловой расчет рассматриваемого двигателя ВАЗ 21127.

Расчет кинематики и динамики двигателя представлен в третьей главе.

В четвертой части представлен расчет системы охлаждения катализатора с микроканальным теплообменником из авиационного алюминиевого сплава.

В заключение мы хотели бы подчеркнуть, что технология соответствует стандартам окружающей среды и безопасности.

Работа дипломного проекта состоит из пояснительной записки на 74 страницах, введения, включающего 29 рисунков, 23 таблиц, списка из 25 ссылок, включающего 5 зарубежных источников и 7 приложения, и графической части на 6 листах А1

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	6
1 Состояние вопроса.....	7
2 Тепловой расчет двигателя .....	16
2.1 Параметры атмосферы, остаточные газы.....	16
2.2 Вычисление процесса наполнения.....	16
2.3 Параметры сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси.....	18
2.4 Термохимический расчет .....	18
2.5 Термодинамический расчёт.....	19
2.6 Расчет процесса расширения и выпуска .....	21
2.7 Индикаторные показатели рабочего цикла.....	22
2.8 Эффективные показатели и параметры двигателя.....	23
2.9 Индикаторные диаграммы.....	24
2.10 Скоростная характеристика ДВС.....	26
3 Расчет кинематики и динамики двигателя.....	27
3.1 Основные параметры для расчета.....	27
3.2 Перемещение поршня .....	28
3.3 Скорость поршня .....	29
3.4 Ускорение поршня.....	30
3.5 Динамические параметры КШМ.....	31
3.6 Расчет сил инерции.....	32
3.7 Силы инерции вращающихся масс .....	33
3.8 Суммарные силы в КШМ. ....	33
3.9 Построение полярной диаграммы сил.....	35
3.10 Диаграмма износа шатунной шейки.....	37
3.11 Уравновешенность двигателя.....	37
4 Расчет основных деталей ДВС .....	40
4.1 Расчет поршня.....	40
4.2 Расчет поршневых колец .....	42
4.3 Расчет поршневого пальца.....	43
5 Специальная часть. ....	44

5.1 Расчет системы охлаждения .....	46
5.1.1. Расчет жидкостного насоса.....	46
5.1.2. Расчет радиатора.....	48
5.1.3. Расчет вентилятора .....	49
5.2 Расчет модернизированной системы охлаждения .....	50
5.2.1. Расчет радиатора.....	50
Заключение .....	51
Список используемых источников .....	52
Приложение А .....	55
Приложение Б.....	66
Приложение В .....	69

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все прогрессивное человечество использует для передвижения тот или иной автомобильный. Различают автомобили: пассажирские, грузовые, специальные и гоночные. Рост автомобильного парка страны вызвал значительное расширение сети предприятий технического обслуживания и ремонта автомобилей и потребовал привлечение большого количества квалифицированных кадров. Чтобы справиться с огромным объёмом работ по поддержанию растущего автомобильного парка в технически исправном состоянии, необходимо механизировать и автоматизировать процессы техобслуживания и ремонта автомобилей, резко повысить производительность труда. Предприятия по техническому обслуживанию и ремонту автомобилей оснащаются более совершенным оборудованием, внедряются новые технологические процессы, обеспечивающие снижение трудоёмкости и повышение качества работ.

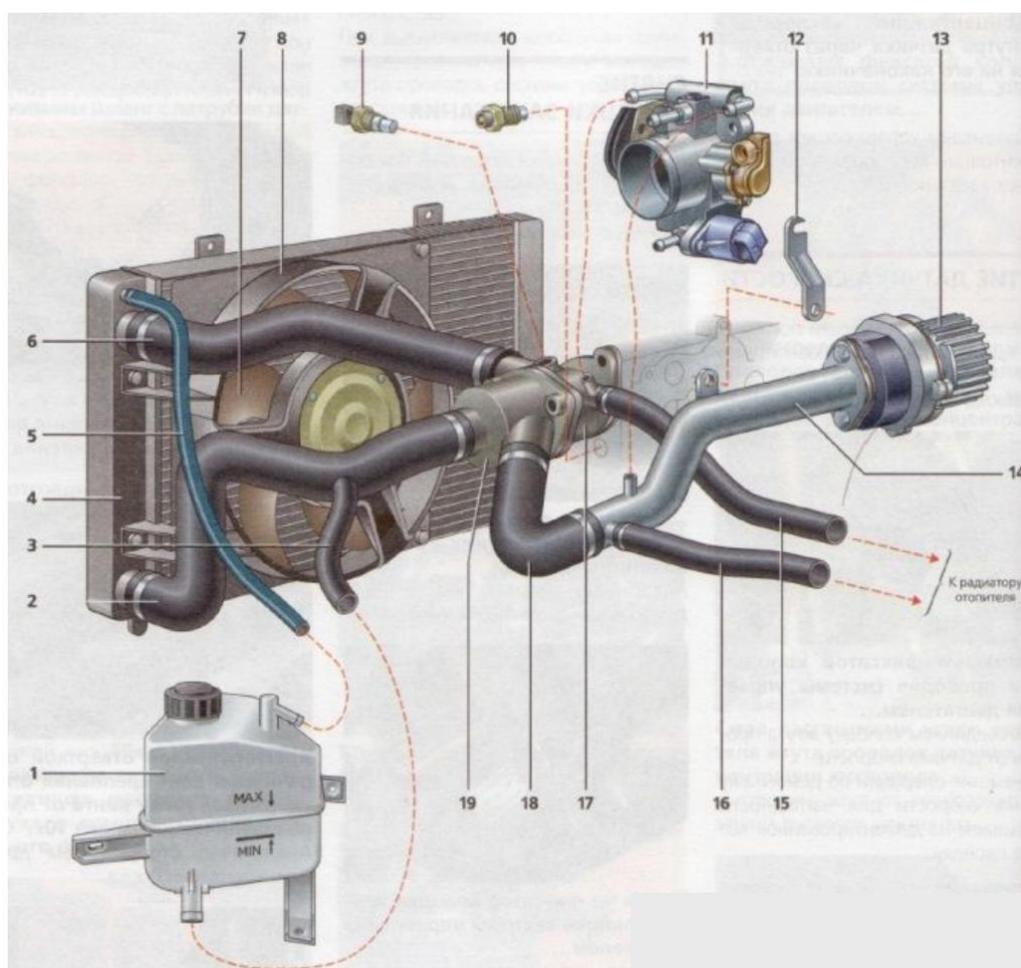
Одним из таких предприятий является ПАО «АВТОВАЗ» — российская автомобилестроительная компания, крупнейший производитель легковых автомобилей в России и Восточной Европе. На данный момент производит автомобили под торговой маркой LADA, а также автомобили марки Nissan, Renault и Datsun. Двигатели собираются на механосборочном производстве (МСП), состоящем в свою очередь из производства двигателей (ПД), производства шасси (ПШ) и производства коробок передач (ПКП).

Актуальностью данного вопроса состоит в том, что за счёт различных систем, в частности системы охлаждения, модернизация которой рассматриваем в данной работе, срок службы двигателя зависит напрямую.

Поэтому целью моей бакалаврской работы является модернизация системы охлаждения двигателей семейства ВАЗ, на примере двигателя 21127.

## 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Устройство системы охлаждения двигателя. Система охлаждения применяется в целях отвода теплоты от двигателя. Эта операция необходима для предоставления непрерывной работы двигателя, так как в случае перегрева, возможен его выход из строя. Система необходима для достижения и поддержания оптимальной температуры двигателя [16,18,21-23]. Система охлаждения состоит из следующих элементов, которые представлены на рисунке 1.



**Система охлаждения:** 1 — расширительный бачок; 2 — отводящий шланг радиатора; 3 — наливной шланг; 4 — радиатор; 5 — паро-отводящий шланг; 6 — подводящий шланг радиатора; 7 — электровентилятор; 8 — кожух электровентилятора; 9 — датчик температуры охлаждающей жидкости; 10 — датчик указателя температуры охлаждающей жидкости; 11 — дроссельный узел; 12 — кронштейн трубы насоса охлаждающей жидкости; 13 — насос охлаждающей жидкости; 14 — труба насоса охлаждающей жидкости; 15 — подводящий шланг радиатора отопителя; 16 — отводящий шланг радиатора отопителя; 17 — выпускной патрубков; 18 — шланг трубы насоса охлаждающей жидкости; 19 — корпус термостата

Рисунок 1 – Система охлаждения двигателя

Рассмотрим основные части системы охлаждения.

1. Расширительный бачок.

Через него охлаждающая жидкость попадает в систему. Он может быть изготовлен из полупрозрачных материалов, например, полупрозрачного полиэтилена, для того что бы можно было наблюдать уровень жидкости с помощью меток MAX и MIN на стенке бачка. Сверху бачок соединяется с патрубком, ведущим в радиатор, а внизу патрубков ведет к наливному шлангу.

2. Крышка расширительного бачка с клапанами.

Благодаря клапанам крышке расширительного бачка в системе обеспечивается герметичность. С помощью выпускного клапана поддерживается повышенное давление системы. Открывается он при давлении меньше 1,1 бар. Впускной же клапан начинает открываться при давлении в системе ниже атмосферного на 0,03-0,13 бар при остывающем двигателе.

3. Насос охлаждающей жидкости.

Насос приводится в действие от коленчатого вала ремнём привода газораспределительного механизма. Он обеспечивает циркуляцию жидкости по пути охлаждения.

4. Термостат.

Термостат предназначен для поддержания рабочей температуры двигателя. Он имеет два клапана, которые в зависимости от термоэлемента, перераспределяют потоки охлаждающей жидкости.

5. Радиатор.

Радиатор предназначен для охлаждения жидкости при достижения ею 100 °С и более. Он имеет пластинчатую структуру, которая обдувается воздухом. Для его изготовления обычно используют алюминий.

Принцип работы. Система охлаждения работает за счет системы управления двигателем. В настоящее время на двигателях алгоритм работы создан на основе математической модели, которая учитывает разные факторы, такие как температуру окружающей среды, наружную температуру, температуру масла и другие.

Также, в зависимости от нагрева двигателя жидкость проходит по малому или большому кругу. На рисунке 2 можно рассмотреть всю схему системы охлаждения двигателя. Синими трубками обозначен малый круг, красными – большой круг.

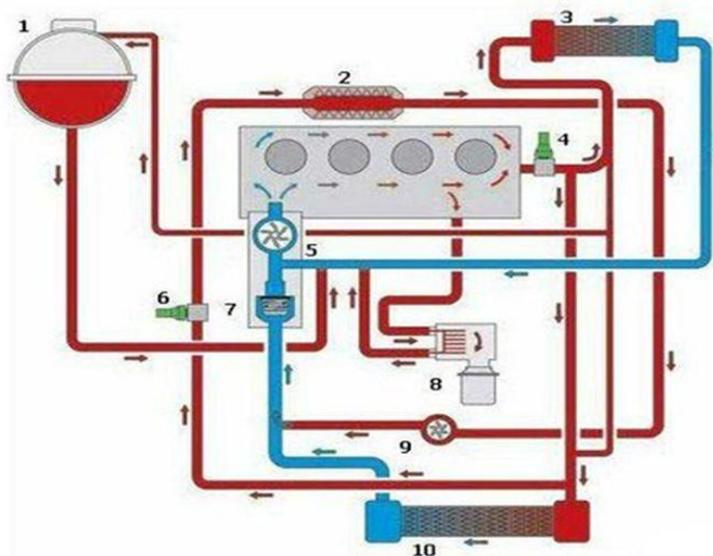


Схема системы охлаждения двигателя: 1 - расширительный бак; 2 - радиатор системы рециркуляции отработавших газов; 3 - теплообменник отопителя; 4 - датчик температуры охлаждающей жидкости; 5 - насос охлаждающей жидкости; 6 - датчик температуры охлаждающей жидкости на выходе радиатора; 7 - термостат; 8 - масляный радиатор; 9 - дополнительный насос охлаждающей жидкости; 10 - радиатор системы охлаждения.

Рисунок 2 – Схема системы охлаждения двигателя

Отвод тепла происходит благодаря каналам в блоке цилиндров и каналам в головке блока цилиндров. Они наполнены охлаждающей жидкостью и называются рубашкой охлаждения (рис. 3). Рубашка охлаждения отводит тепло в основную очередь от цилиндров двигателя. Жидкость в ней постоянно циркулирует по замкнутому кругу благодаря жидкостному насосу, который

приводится в движение с помощью ременной передачи с коленчатого вала (также вращение может происходить и от ремня газораспределительного механизма). При прохождении круга, если охлаждающая жидкость нагревается до  $100^{\circ}\text{C}$ , то термостат открывается и жидкость начинает движение по большому кругу, используя радиатор, который понижает температуру жидкости благодаря высокому теплообмену с воздухом. Если обдува воздухом недостаточно, то вступает в работу вентилятор системы охлаждения.

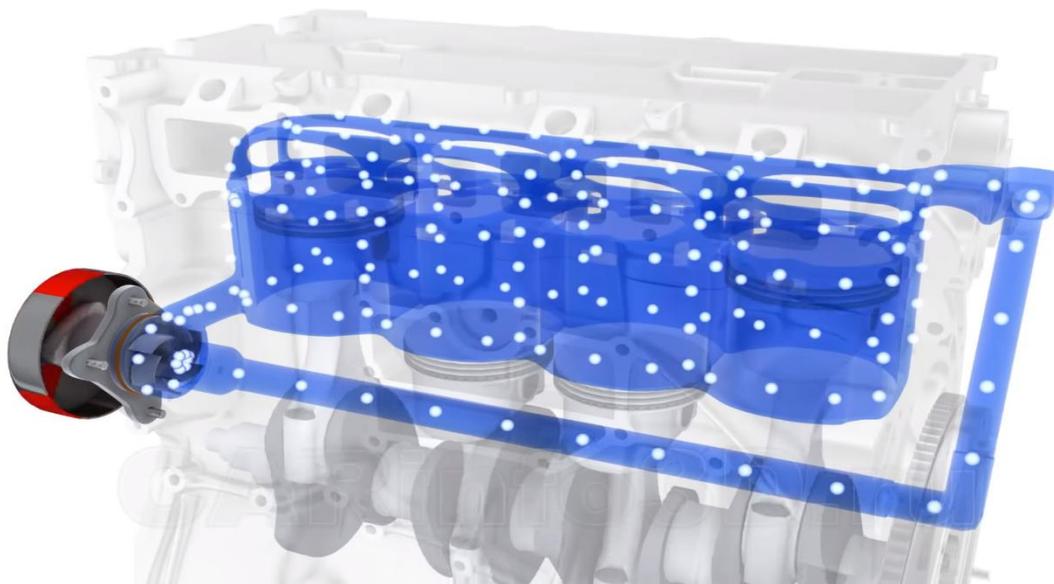
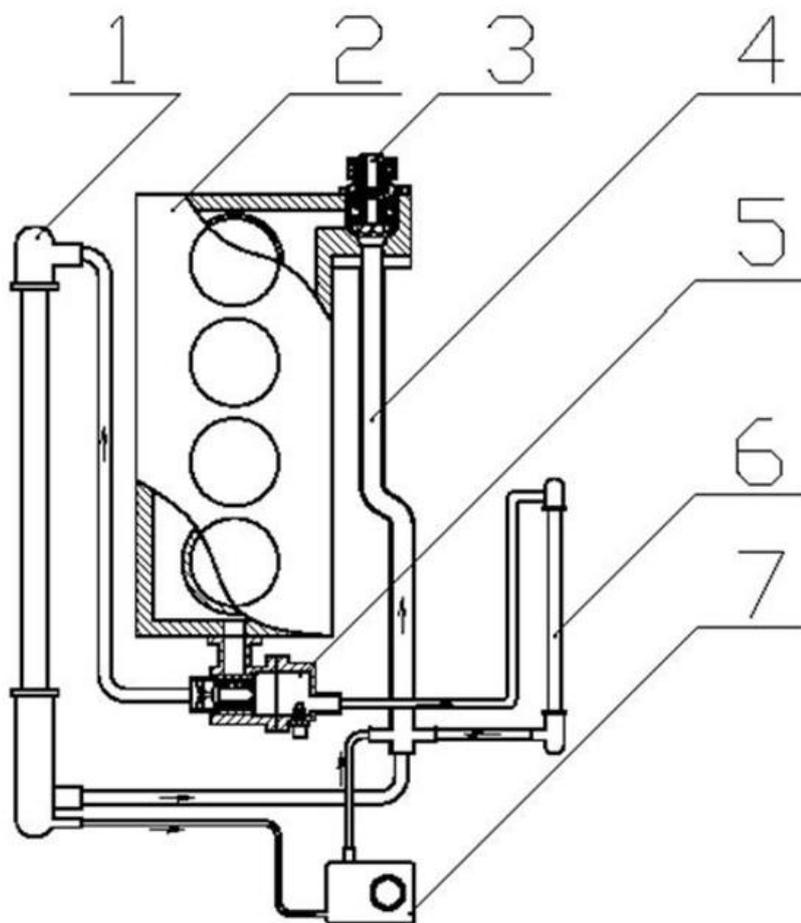


Рисунок 3 – Рубашка охлаждения

Особенности конструкции системы охлаждения двигателей. Система охлаждения автомобиля Лада Гранта с двигателем 21127. Рассмотрим особенности конструкции на примере автомобиля Лада Гранта с двигателем 21127. Этот автомобиль имеет гидравлическую схему системы охлаждения (рис.4)



- 1 – Радиатор системы охлаждения; 2 – Двигатель; 3 – Водяной насос;  
 4 – Подводящая трубка водяного насоса; 5 – Термостат; 6 – Радиатор отопителя; 7 – расширительный бачок

Рисунок 4 – Гидравлическая система охлаждения двигателей семейства Лады Гранты.

Система охлаждения двигателей автомобилей семейства Лада Гранта имеет особенности по сравнению с предыдущими моделями автомобилей:

– радиатор отопителя одноходовой, с пониженным гидравлическим сопротивлением, паянный алюминиевый, с повышенной тепловой эффективностью

стью, встроен последовательно в «малый контур» системы охлаждения, в отличие от ранее принятой параллельной установки двухходового радиатора отопителя;

– термостат имеет один, а не два клапана и управляет только потоком ОЖ через радиатор системы охлаждения;

– одноходовой радиатор системы охлаждения с пониженным гидравлическим сопротивлением.

Циркуляцию ОЖ при её различных температурах см. на рисунках 5 и 6.

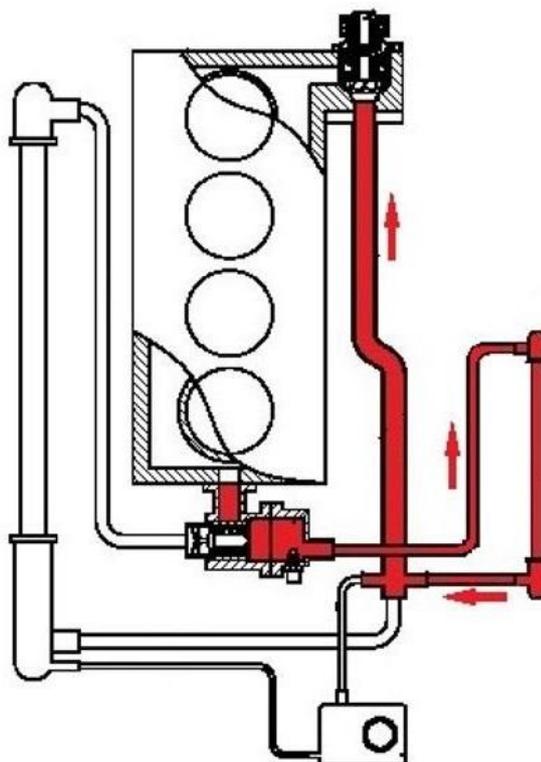


Рисунок 5 – циркуляция ОЖ в системе охлаждения открытия термостата (малый контур).

При температуре ОЖ ниже температуры начала открытия клапана термостата (термостат закрыт) циркуляция 100 % ОЖ идёт через радиатор отопителя (малый контур), показано цветом на рисунке 5.

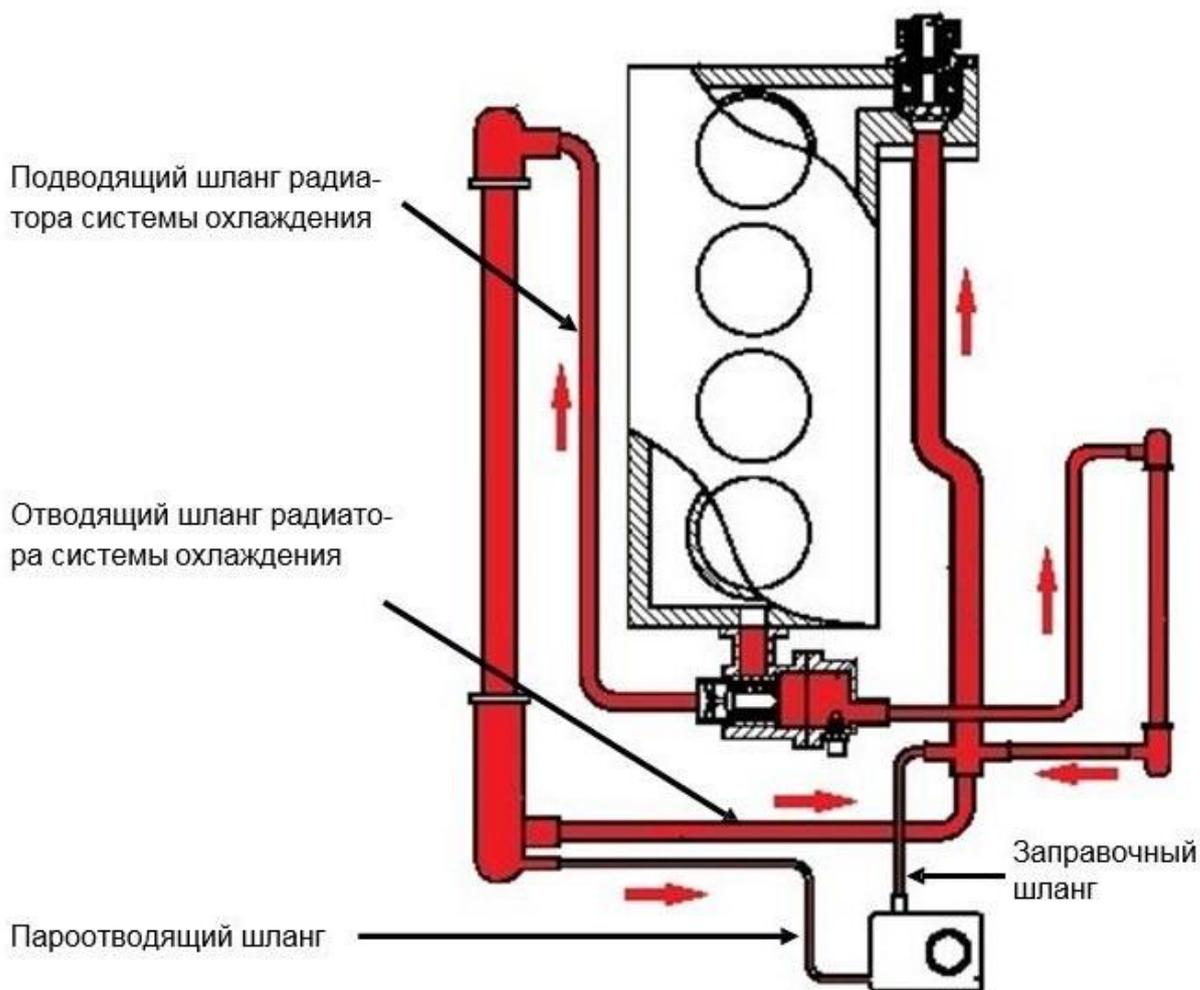


Рисунок 6 – Циркуляция ОЖ в системе охлаждения после открытия термостата

Схема циркуляции ОЖ при её температуре выше температуры начала открытия клапана термостата (термостат открыт) показана цветом на рисунке 6.

Открытие термостата, не прекращая циркуляции ОЖ через радиатор отопителя (малый контур), приводит к возникновению циркуляции ОЖ через радиатор системы охлаждения и его пароотводящий шланг (большой контур). Это сопровождается внешним проявлением в виде нагрева, подводящего и отводящего шлангов радиатора системы охлаждения, самого радиатора, а также в виде вытекания ОЖ из пароотводящего шланга в расширительный бачок.

Преимущества системы охлаждения двигателей автомобилей Лада Гранта.

Основное преимущество системы охлаждения двигателей автомобилей Гранта по сравнению с прежними моделями Приора, Самара и Калина состоит в улучшении отопления салона автомобиля за счет снятия большего количества тепла с радиатора отопителя.

Повышение тепловой эффективности системы отопления салона достигнуто:

а) Увеличением расхода ОЖ через радиатор отопителя в результате направления в него 100 % ОЖ при закрытом термостате (малый контур), что стало возможным при последовательном подключении радиатора отопителя, в отличие от ранее принятого параллельного подключения.

б) Увеличением тепловой эффективности радиатора отопителя в результате изменения его конструкции:

– одноходовая схема вместо двухходовой снизила гидравлическое сопротивление и увеличила расход ОЖ через радиатор отопителя;

– плоские алюминиевые трубки вместо цилиндрических алюминиевых;

– пайка к плоским трубкам гофрированных элементов, увеличивающих площадь теплообмена, вместо напрессовки плоских элементов (пластин) на цилиндрические трубки.

в) Исключением возможности завоздушивания радиатора отопителя за счет удаления воздуха потоком ОЖ уже при минимальной частоте холостого хода двигателя за счет изменения схемы протекания ОЖ через радиатор отопителя в сочетании с увеличенным расходом ОЖ и пониженным гидравлическим сопротивлением, см. выше.

г) Улучшением аэродинамических и расходнонапорных характеристик вентилятора и элементов системы отопления салона автомобиля (патрубки, дефлекторы и т.д).

Второе преимущество системы охлаждения двигателей автомобилей Гранта по сравнению с прежними моделями Приора, Самара и Калина – более точная регулировка температурного режима двигателя.

На прежних моделях Приора, Самара и Калина перемешивание холодной

и горячей ОЖ непосредственно в термостате приводило к неуправляемому завышению температуры ОЖ. На автомобилях Гранта омыв термозлемента термостата осуществляется только горячей ОЖ из двигателя, что минимизировало инерционность термостата и позволило более точно регулировать температуру ОЖ. Зависимость температурного режима работы двигателя от внешних факторов снизилась и стала определяться в основном температурой открытия клапана термостата.

\*Инерционность термостата – это разница между температурой начала открытия клапана термостата и средней температурой ОЖ, поддерживаемой в системе охлаждения.

Третье преимущество системы охлаждения двигателей автомобилей Гранта (2190) и Калина FL (2192, 2194) по сравнению с прежними моделями Приора, Самара и Калина вытекает из двух первых преимуществ и заключается в возможности увеличить углы опережения зажигания, и, соответственно, получить некоторую экономию топлива и улучшение динамики автомобиля.

Поскольку существенная часть тепла отнимается от ОЖ и передается на отопление салона, то у самой ОЖ тепла остается меньше, и её температура понижается. Этому же способствует исключение неуправляемого завышения температуры ОЖ.

Дополнительные причины понижения температуры ОЖ:

а) улучшенные теплотехнические характеристики одноходового радиатора системы охлаждения;

б) дополнительное снятие тепла с элементов системы охлаждения двигателя улучшенной продувкой подкапотного пространства встречным потоком воздуха.

Понижение температуры ОЖ улучшает охлаждение двигателя, в частности, уменьшается температура головки цилиндров за счет меньшей температуры ОЖ на прогретом двигателе. Это и позволяет увеличить углы опережения зажигания, и, соответственно, получить некоторую экономию топлива и улучшение динамики автомобиля.

## 2 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ

Расчет рабочего цикла двигателя с впрыском бензина по методике Вибе.[1-4]

Расчет проводится для 5 различных режимов:

$$n_1 = 840 \text{ (мин}^{-1}\text{)};$$

$$n_2 = 2400 \text{ (мин}^{-1}\text{)};$$

$$n_3 = 4000 \text{ (мин}^{-1}\text{)};$$

$$n_4 = 5800 \text{ (мин}^{-1}\text{)};$$

$$n_5 = 6100 \text{ (мин}^{-1}\text{)}.$$

Дополнительные параметры для просчета рабочего процесса представлены в таблице 1.

Таблица 1 □ Начальные данные для расчета рабочего цикла

$i$	$D, \text{ мм}$	$\tau$	$V_{л}, \text{ л}$	$\alpha$	$\varepsilon$	$S, \text{ мм}$
4	82	4	1,6	1	11	75,6

### 2.1 Параметры атмосферы, остаточные газы

Задаются атмосферные условия:

$$p_0 = 0,1 \text{ (МПа)}; \quad T_0 = 293 \text{ (К)}.$$

Принимаются температура и давление остаточных газов ( $T_r$  и  $p_r$ ):

$$T_r = 900\text{-}1200 \text{ (К)}; \quad p_r = 0,1038\text{-}0,115 \text{ (МПа)}.$$

### 2.2 Вычисление процесса наполнения

Температура ( $T$ ) подогрева свежего заряда  $\Delta T = 6$ .

Плотность заряда на впуске двигателя:

$$\rho_0 = \frac{z_0 \cdot 10^6}{287 \cdot T_0};$$

Потери давления на этапе впуске:

$$\Delta p_a = \frac{2,5 \cdot A_n^2 \cdot n^2 \cdot \rho_0 \cdot 10^{-6}}{2} \text{ (МПа)}$$

Сила, приложенная на площадь, в конце процесса впуска:

$$p_a = p_0 - \Delta p_a$$

Коэффициент остаточных газов:

$$\gamma_r = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{p_r}{\varepsilon \cdot p_a - p_r}$$

Температура ( $T$ ) в конце процесса впуска:

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_r \cdot T_r}{1 + \gamma_r}$$

Вычисление коэффициента наполнения при известном коэффициенте дозарядки  $\phi_{\text{доз}} = 1,1$

$$\eta_v = \frac{T_0}{T_0 + \Delta T} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{p_0} \cdot (\phi_{\text{доз}} \cdot \varepsilon \cdot p_a - p_r)$$

В конце процесса наполнения удельный объем газовой эмиссии вычисляется по следующей формуле:

(здесь  $\mu_0 = 28,9$  – молярная масса воздуха,  $m_T = 115$  кг/моль – молярная масса паров бензина,  $l_0 = 14,910$  кг возд./кг топл.):

$$V_a = 8,314 \cdot 10^{-3} \frac{T_a}{\mu_B \cdot p_a};$$

Полученные данные заносятся в таблицу 2:

Таблица 2 □ Данные вычисления процесса наполнения.

	$n_1 = 840$	$n_2 = 2400$	$n_3 = 4000$	$n_4 = 5800$	$n_5 = 6100$
$A_n$	0,003966	0,010791	0,017168	0,023811	0,023999
$\Delta p_a$	0,003716	0,004497	0,007284	0,010743	0,013416
$p_a$	0,096284	0,095503	0,092716	0,089257	0,086584
$\gamma_r$	0,036781	0,035158	0,035841	0,035214	0,037363
$T_a$	330,3151	328,0193	327,0766	325,5642	327,6317
$\eta_v$	0,906146	0,915576	1,005492	0,930393	0,821076
$V_a$	0,984208	0,985354	1,012058	1,046415	1,085569

### 2.3 Параметры сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси

Определяем политропу сжатия:

$$n^1 = 1 + \frac{8,314}{20,16 + 1,738 \cdot 10^{-3} (\varepsilon^{n_1-1} + 1) \cdot T_a}$$

Сила давления, температура и удельный объем в конце сжатия

$$p_c = p \cdot \varepsilon_1^n; \quad T_c = T_a \cdot \varepsilon_1^{n-1}$$

Удельный объем, давление и температура рабочего тела в момент воспламенения, если угол опережения воспламенения  $\Theta = 13 \div 30$  (град) и  $\lambda = 0,284$ :

$$V_y = \frac{V_a}{\varepsilon} \cdot \left[ 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \left[ \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \left[ \cos\left( \frac{\Theta \cdot \pi}{180} \right) + \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \left( \sin\left( \frac{\Theta \cdot \pi}{180} \right) \right)^2} \right] \right] \right]$$

$$p_y = \left( \frac{V_a}{V_y} \right)^{n_1} \cdot p_a;$$

$$T_y = \left( \frac{V_a}{V_y} \right)^{n_1-1} \cdot T_a.$$

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

Результаты расчетов сведены в таблицу 3.

Таблица 3 □ Параметры начала воспламенения и процесса сжатия

	$n_1 = 840$	$n_2 = 2400$	$n_3 = 4000$	$n_4 = 5800$	$n_5 = 6100$
$n^I$	1,37	1,373	1,375	1,377	1,378
$P_c$	2,571941	2,569513	2,506517	2,424605	2,357648
$T_c$	802,1280	802,3039	803,8438	803,9720	811,0215
$V_y$	0,114451	0,124033	0,146796	0,165731	0,182373
$P_y$	1,835560	1,643582	1,318501	1,128895	1,011512
$T_y$	732,2848	710,5901	674,6576	652,1511	643,0149
$\Theta$	17	20	25	28	30

## 2.4 Термохимический расчет

Теоретическая масса воздуха, необходимая для сгорания 1,0 килограмма жидкого топлива, при  $C = 0,855$  и  $H = 0,145$  будет равна:

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \cdot \left( \frac{8}{3} \cdot C + 8H \right); l_0 = 14,957 \text{ (кмоль.возд./кг.топл)}.$$

Количество воздуха, которое требуется для сгорания 1,0 килограмма жидкого топлива:

$$L_0 = \frac{1}{0,208} \cdot \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} \right); L_0 = 0,516 \text{ (кмоль.возд./кг.топл)}.$$

Количество свежего заряда при  $\alpha = 1$ :

$$M_1 := \alpha \cdot L_0 + \frac{1}{m_T}; M_1 = 0,516 (\text{кмоль.гор.см. / кг.топл}).$$

Общее количество элементов сгорания:

$$M_2 = 0,553 (\text{кмоль гор. см./кг топл.})$$

Коэффициент молекулярного изменения свежей смеси:

$$\mu_0 = \frac{M_2}{M_1}; \mu_0 = 1,052.$$

Коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси:

$$\mu = \frac{\mu_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r}; \mu = 1,05.$$

## 2.5 Термодинамический расчет

Вычисляем среднее индикаторное давление, температуру газов в конце расширения, индикаторный коэффициент полезного действия и прочие показатели.

Коэффициент эффективности сгорания топлива при  $\alpha = 1$  выбираем из таблицы  $\zeta = 0,9$  (от 0,85-0,95).

Целиком учтенная удельная теплота сгорания топлива равна:

$$H_u = 43791 \left( \frac{\text{кМоль}}{\text{кг}} \right)$$

$$q_z = \frac{\zeta \cdot H_u}{(1 + \gamma_r)(\alpha \cdot l_0 + 1)}.$$

Давление газов в процессе сгорания определяется следующим образом:

$$p_2 = E_2 \cdot \Delta X_{1-2} + p_1 \cdot (K_{1-2} \cdot \psi(\varphi_1') - \psi(\varphi_2')) / [K_{1-2} \cdot \psi(\varphi_1') - \psi(\varphi_1')]. E_2 = \left( 0,002 \cdot \frac{\varepsilon}{V_a} \right) \cdot q_z;$$

Часть топлива, сгоревшего на рассматриваемом участке:

$$\Delta X_{1-2} = \exp \left[ -6,908 \left[ \frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[ -6,908 \left[ \frac{\varphi_2}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right].$$

Так же необходимо указать следующие значения:

$\varphi_1'$  и  $\varphi_2'$  – углы поворота коленчатого вала соответственно в начале и в конце определенного участка;

$\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы поворота коленчатого вала, отсчитываемые от момента воспла-

менения соответственно до начала или конца рассматриваемого участка;

$p_1$  – давление в начале рассматриваемого участка, МПа;

$$K_{1-2} = \frac{k_{1-2} + 1}{k_{1-2} - 1} - \text{фактор теплоемкостей.}$$

Отношение средних теплоемкостей рабочего тела на участке 1-2, указанные в Приложении А, рассчитываются по уравнению:

$$k_{1-2} = 1,259 + \left[ 76,7 - \left( 13,6 - \frac{14,2}{\alpha} \right) \cdot x_{1-2} \right] \cdot \frac{1}{T_{1-2}} - \left( 0,0665 - \frac{0,0245}{\alpha} \right) \cdot x_{1-2}.$$

Среднее значение части топлива, приведенного в Приложении А, сгоревшего на участке 1-2:

$$x_{1-2} = 0,5 \left[ \exp \left[ -6,908 \left[ \frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[ -6,908 \left[ \frac{\varphi_2}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] \right];$$

$T_{1-2} = (T_1 + T_2)/2$  – промежуточная температура на участке 1-2;

$$\psi(\varphi') = 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \sigma;$$

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

$$T_2 = \frac{T_y \cdot p_2 \cdot \psi(\varphi_2')}{p_y \cdot \psi(\varphi_y') \cdot \mu_{1-2}} \quad \square \quad \text{указанная в Приложении А температура газов процесса}$$

сгорания;

$\mu_{1-2} = (\mu_1 + \mu_2)/2$  – средний на рассматриваемом участке коэффициент молекулярного изменения свежей смеси;

$$\mu_1 = 1 + \frac{(\mu_{0\max} - 1) \left[ 1 - \exp \left[ -6,908 \left( \frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right)^{m+1} \right] \right]}{1 + \gamma_r}$$

Данные  $\mu_1$  показаны в приложении А для каждого из рабочих режимов.

$\mu_0 = \mu_{0\max}$   $\square$  расчетный коэффициент молекулярного изменения свежей смеси.

Результаты расчета приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Расчетные термодинамические данные

	$n_1 = 840$	$n_2 = 2400$	$n_3 = 4000$	$n_4 = 5800$	$n_5 = 6100$
$q_z$	2389,86	2446,80	2604,66	2393,49	2494,689
$E_2$	53,42065	54,62978	56,61981	50,32115	50,55686

## 2.6 Расчет процесса расширения и выпуска

$V_Z$  – значение объема рабочего тела, соответствующее конечному значению давления  $p_Z$  при сгорании, т.е. при  $\varphi = \varphi_Z$  (значение выбирается из Приложения А). Средний показатель политропы расширения находится методом последовательных приближений, при заданной начальной  $T_Z$  и  $n_2$ .

Рассчитывается  $n_2$  по следующей формуле:

$$n^2 = 1 + \frac{8,341}{23,7 + 0,0046 \cdot 2872,74 \cdot \left(1 + \frac{1}{\delta^{n_2-1}}\right)}.$$

Значения в конце процесса расширения как политропного процесса

$$p_b = \frac{p_Z}{\delta^{n_2}}; p_b; \quad T_b = \frac{T_Z}{\delta^{n_2-1}}; T_b,$$

где  $p_Z$  и  $T_Z$  – параметры в конце сжатия (выбираются из Приложения А).

Текущие значения удельного объема, давления и температуры газов от конца процесса сгорания до 540 град. п.к.в. находятся из соотношений

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

$\varphi_{пр}$  – текущее значение угла поворота коленчатого вала

Требуется произвести проверку на правильность выбора значения полученных температур отработавших газов. Для проверки используется следующая формула:

$$T_r = \frac{T_b}{\sqrt[3]{\frac{p_b}{p_r}}};$$

Составляется таблица 5, в которую вносятся полученные значения.

Таблица 5 □ Процесс впуска и расширения

	$n_1 = 840$	$n_2 = 2400$	$n_3 = 4000$	$n_4 = 5800$	$n_5 = 6100$
$n^2$	1,18222	1,18167	1,17732	1,18941	1,19515
$V_z$	0,17536	0,16072	0,14260	0,13540	0,13300
$p_z$	4,58894	5,07161	6,07235	5,58087	5,31159
$V_y$	0,59710	0,59508	0,60444	0,49024	0,43200
$T_z$	2007,77	2003,60	2090,49	1760,64	1618,05

## 2.7 Индикаторные показатели рабочего цикла

Следующий этап расчета предназначен для получения индикаторных показателей за цикл работы двигателя. Теоретическая индикаторная работа за цикл определяется по методу «трапеций»:

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

Расчётное среднее индикаторное давление

$$P_{iT} = \frac{\varepsilon \cdot L_{iT}}{(\varepsilon - 1)V_a}, \text{ МПа}$$

Индикаторный коэффициент полезного действия

$$\eta_i = 8.314 \frac{M_1 \cdot P_{iT} \cdot T_0}{P_0 \cdot \eta_v \cdot H_u}$$

Удельный индикаторный расход топлива

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

Результаты расчета индикаторных показателей рабочего цикла приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Показатели индикаторные в процессе рабочего цикла

	$n_1 = 840$	$n_2 = 2400$	$n_3 = 4000$	$n_4 = 5800$	$n_5 = 6100$
$\eta_i$	0,41904	0,43270	0,41230	0,38336	0,39825
$g_i$	195,563	189,38924	198,760	213,766	205,773
$P_{iT}$	1,30300	1,35948	1,42260	1,22394	1,12209
$L_{iT}$	1,16584	1,21779	1,30886	1,16432	1,10737

## 2.8 Эффективные показатели и параметры двигателя

Расчёт средней скорости поршня:

$$v_n = \frac{S \cdot n}{30}, \text{ м/с}$$

Среднее давление вследствие воздействия механических потерь

$$P_M = 0.034 + 0.0113 v, \text{ МПа}$$

Среднее эффективное давление

$$P_e = P_{IT} - P_M, \text{ МПа}$$

Механический коэффициент положительного действия

$$\eta_M = \frac{P_e}{P_{IT}}$$

Эффективный коэффициент положительного действия

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_M$$

Удельный эффективный расход топлива

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_M}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Расчетная эффективная мощность

$$N_e = \frac{P_e \cdot V_{л} \cdot n}{30\tau}, \text{ кВт.}$$

Расход топлива в час

$$G_T = \frac{N_e \cdot g}{1000_e}, \text{ кг/ч.}$$

Крутящий момент двигателя

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

Результаты расчета эффективных показателей двигателя приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Эффективные показатели двигателя

при n =	$V_{п.ср}$	$p_M$	$p_e$	$\eta_M$	$\eta_e$	$g_e$	$N_e$	$M_e$	$G_T$
840	2,12	0,06	1,24	0,95	0,40	205,25	13,88	157,77	2,85
2400	6,05	0,11	1,25	0,92	0,40	206,50	39,82	158,45	8,22
4000	10,08	0,17	1,26	0,88	0,36	224,85	66,94	159,81	15,05
5800	14,62	0,22	1,00	0,82	0,31	261,65	77,18	127,07	20,20
6100	15,37	0,23	0,89	0,79	0,32	259,94	72,11	112,88	18,74

## 2.9 Индикаторные диаграммы

Ниже приведены индикаторные диаграммы рассчитываемого нами ДВС на пяти установившихся режимах работы. Рисунки с 7 по 11, демонстрируют нам зависимость давления в цилиндре двигателя от угла ПКВ, а с 12 по 16, зависимость давления в цилиндре двигателя от объема цилиндра.

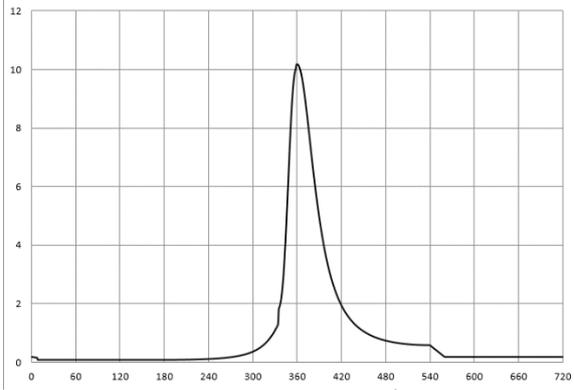


Рисунок 7 – 840 об/мин<sup>-1</sup>

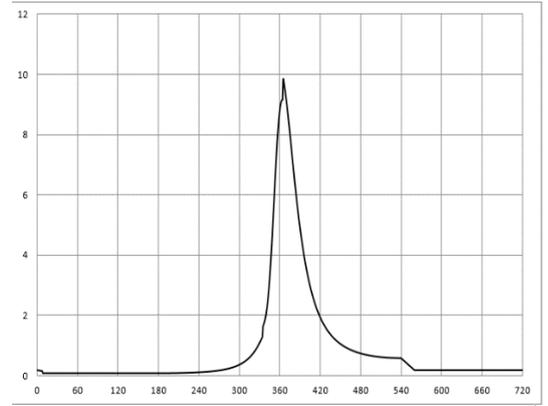


Рисунок 8 – 2400 об/мин<sup>-1</sup>

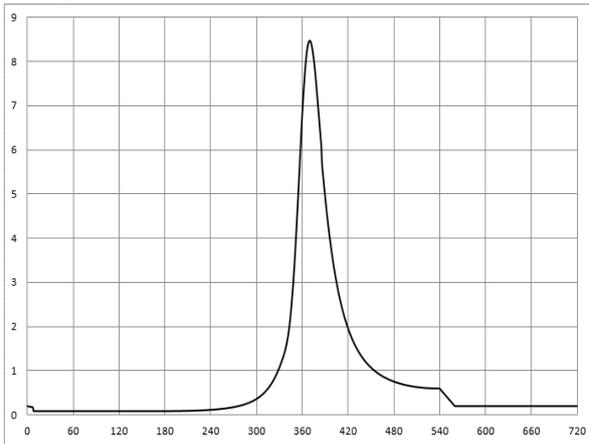


Рисунок 9 – 4000 об/мин<sup>-1</sup>

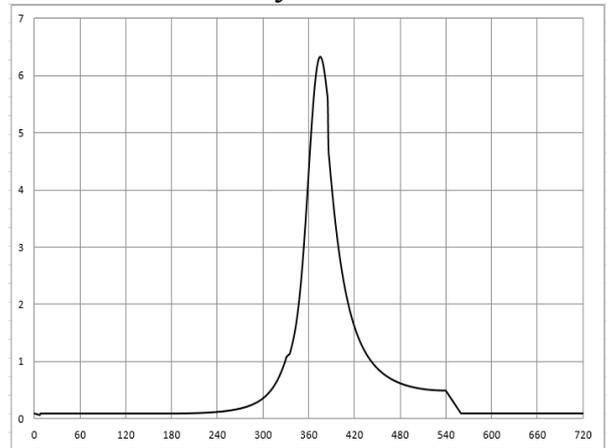


Рисунок 10 – 5800 об/мин<sup>-1</sup>

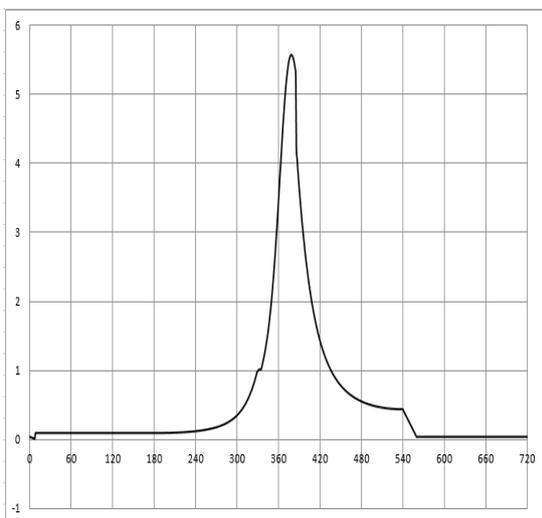


Рисунок 11 – 6100 об/мин<sup>-1</sup>

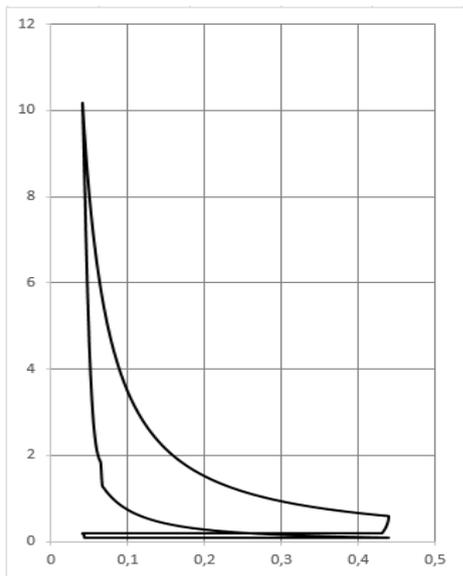


Рисунок 12 – 840 об/мин<sup>-1</sup>

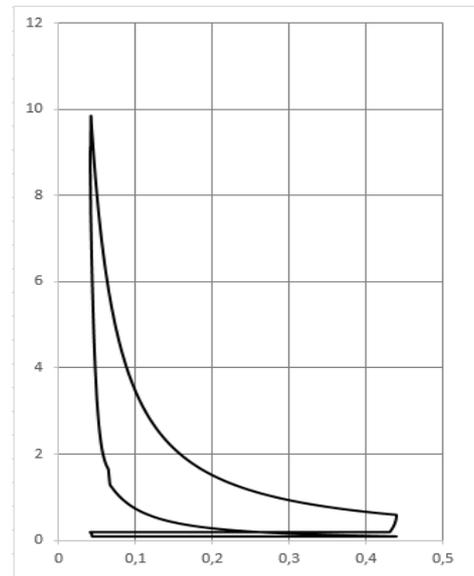


Рисунок 13 – 2400 об/мин<sup>-1</sup>

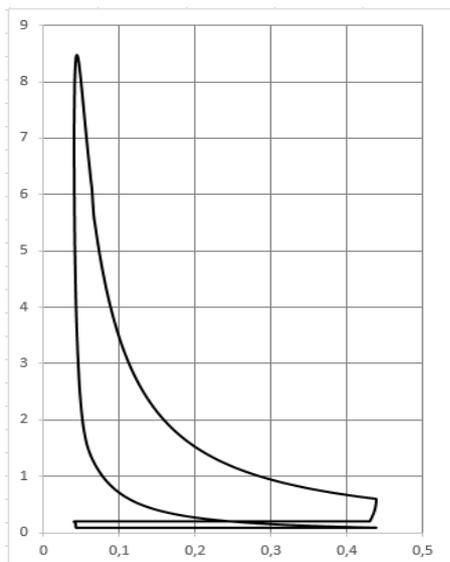


Рисунок 14 – 4000 об/мин<sup>-1</sup>

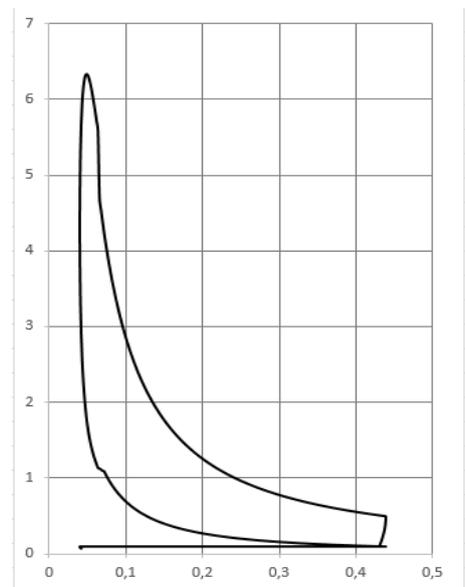


Рисунок 15 – 5800 об/мин<sup>-1</sup>

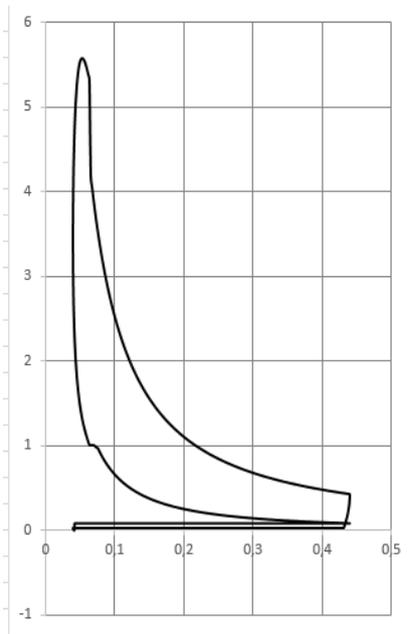


Рисунок 16 – 61000 об/мин<sup>-1</sup>

## 2.10 Скоростная характеристика ДВС

Здесь, нам представлена внешне скоростная характеристика (ВСХ) нашего двигателя, на которой отображены: удельный расход топлива, часовой расход топлива, крутящий момент и мощность, в зависимости от частоты оборотов коленчатого вала.

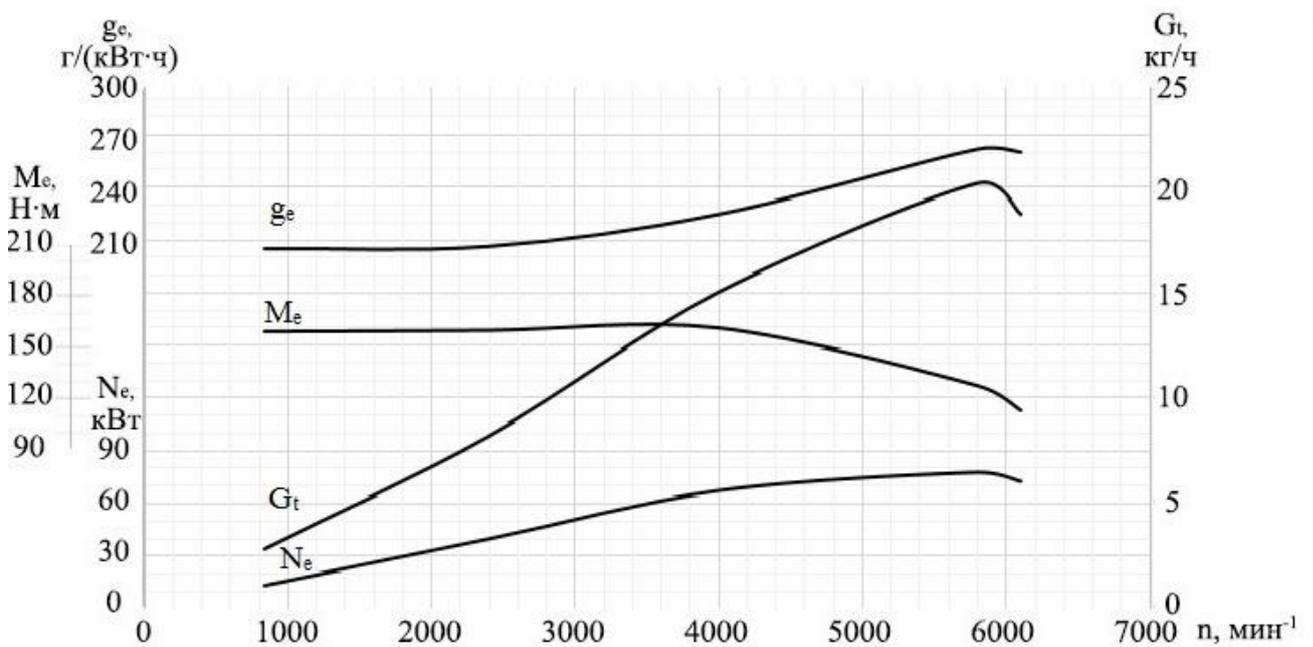


Рисунок 17 – Диаграмма ВСХ

### 3 РАСЧЕТ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ ДВИГАТЕЛЯ

Ниже, в целях экономии объема курсового проекта приведены основные пункты расчетов кинематики и динамики выбранного нами ДВС.[1-15]

#### 3.1 Основные параметры для расчета

Ниже, в целях экономии объема курсового проекта приведены основные пункты расчетов кинематики и динамики выбранного нами ДВС.[1-15]

Данные для этого пункта берутся исходя из результатов теплового расчета и параметров двигателя ВАЗ 21127.

Максимальная мощность  $N_e = 78 \text{ кВт}$

Обороты коленчатого вала  $n = 5800 \text{ об/мин}$

Диаметр цилиндра  $D_{\text{ц}} = 82 \text{ мм}$

Ход поршня  $S = 75,6 \text{ мм}$

Отношение радиуса кривошипа к длине шатуна  $\lambda \sim 0,28$

Угловая скорость вращения коленчатого вала 
$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 5800}{30} = 607 \text{ с}^{-1}$$

Радиус кривошипа 
$$r = \frac{S}{2} = \frac{75,6}{2} = 37,8 \text{ мм}$$

Длина шатуна 
$$l = \frac{r}{\lambda} = \frac{37,8}{0,28} = 135 \text{ мм}$$

#### 3.2 Перемещение поршня

Перемещение поршня состоит из перемещения первого порядка  $S_{\text{П1}}$  при длине шатуна равной  $\infty$ , и второго порядка  $S_{\text{П2}}$ , дополнительного перемещения, зависящей от конечной длины шатуна и определяется по формуле:

$$S_x = r (1 - \cos\varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi)$$

где:  $\varphi$  – угол поворота коленчатого вала;

$S_{П1} = r (1 - \cos\varphi)$  – перемещение первого порядка;

$S_{П2} = r \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi)$  – перемещение второго порядка.

При  $\varphi = 0^\circ$ :

$$S_x = 37,8 (1 - \cos 0) + \frac{0,25}{4} (1 - \cos 2 \cdot 0) = 0 \text{ мм}$$

Проведем расчет до  $\varphi = 720^\circ$ . Результаты расчетов сводятся приложение Б.

По результатам вычислений строится график  $S_x = f(\varphi)$ , изображенный на рисунке 18. Показывающий перемещение поршня в зависимости от угла П.К.В.

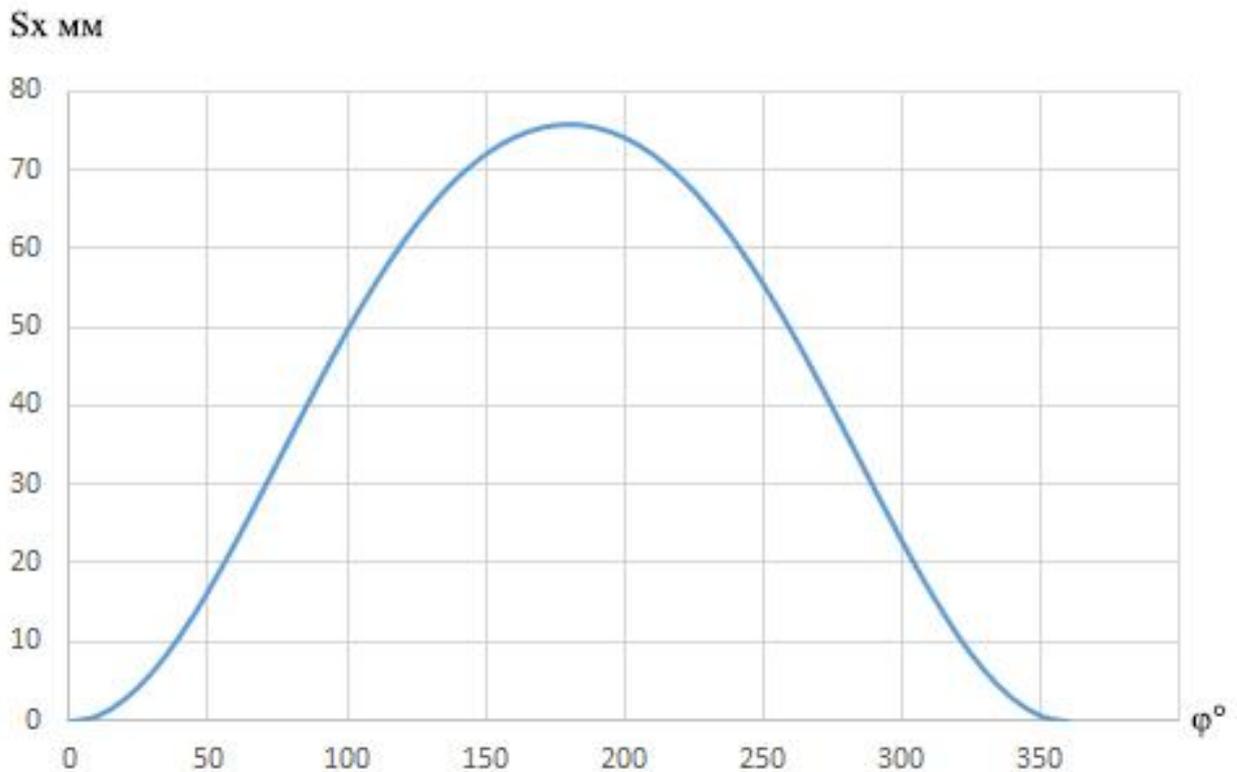


Рисунок 18 – Перемещения поршня

### 3.3 Скорость поршня

Рассчитаем скорость поршня по формуле:

$$V_x = \omega \cdot r \sin\varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi$$

$V_{x1} = \omega \cdot r \sin\varphi$  – скорость первого порядка;

$V_{x2} = \omega \cdot r \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi$  – скорость второго порядка.

При  $\varphi = 0^\circ$ :

$$V_x = 586,43 \cdot 37,8 \sin 0 + \frac{\lambda}{2} \sin 2 \cdot 0 = 0 \text{ м/с}$$

Проведем расчет до  $\varphi = 720^\circ$ . Результаты расчетов сводятся в приложение Б.

По результатам вычислений строится график  $V_x = f(\varphi)$ , изображенный на рисунке 19 и показывающий зависимость скорости поршня от угла П.К.В.

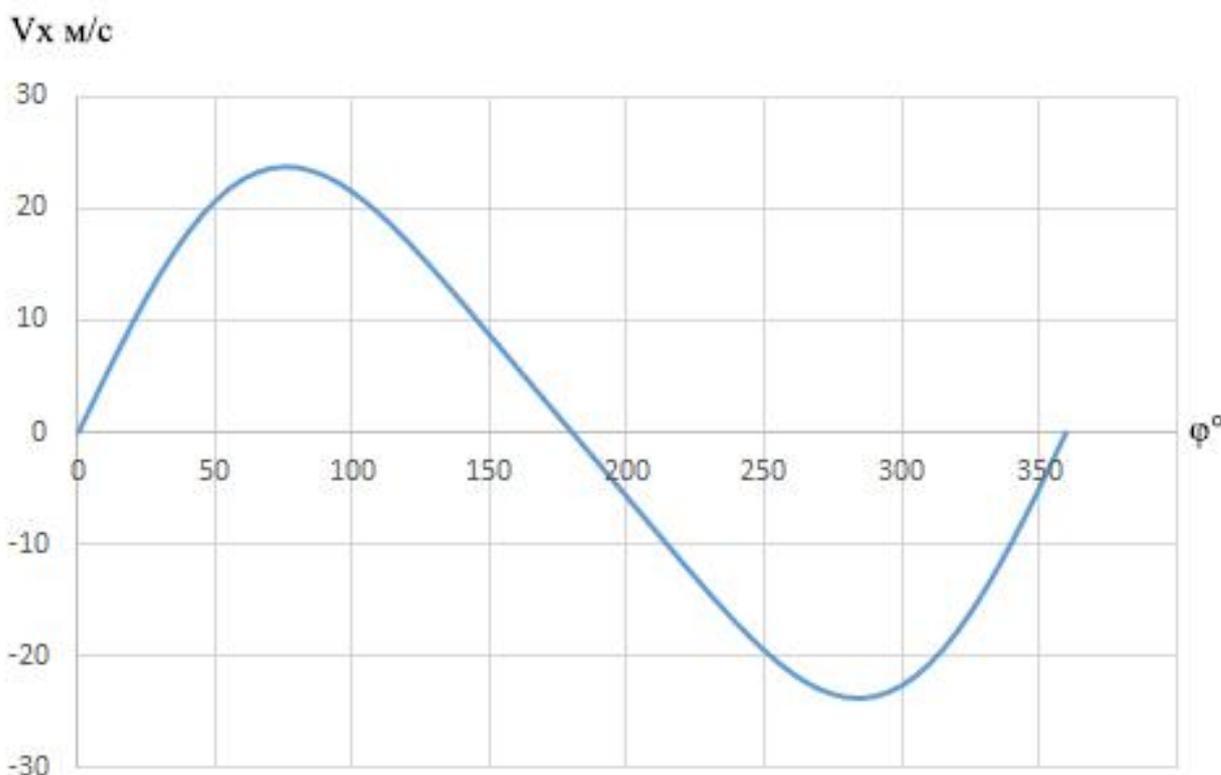


Рисунок 19 – Скорость поршня

### 3.4 Ускорение поршня

Выясним ускорение поршня, вычислив его по формуле:

$$j = \omega^2 \cdot r \cos\varphi + \lambda \cos 2\varphi$$

$j_{п1} = \omega^2 \cdot r \cos\varphi$  – ускорение первого порядка;

$j_{п2} = \omega^2 \cdot r \lambda \cos 2\varphi$  – ускорение второго порядка.

При  $\varphi = 0^\circ$ :

$$j = 586,43^2 \cdot 37,5 \cos 0 + 0,25 \cos 2 \cdot 0 = 15,74 \text{ м}^2/\text{с}$$

Проведем расчет до  $\varphi = 720^\circ$ . Результаты расчетов сводятся в приложение Б.

По результатам вычислений строится график  $j = f(\varphi)$ , изображенный на рисунке 20 и демонстрирующий нам зависимость ускорения поршня от угла П.К.В.

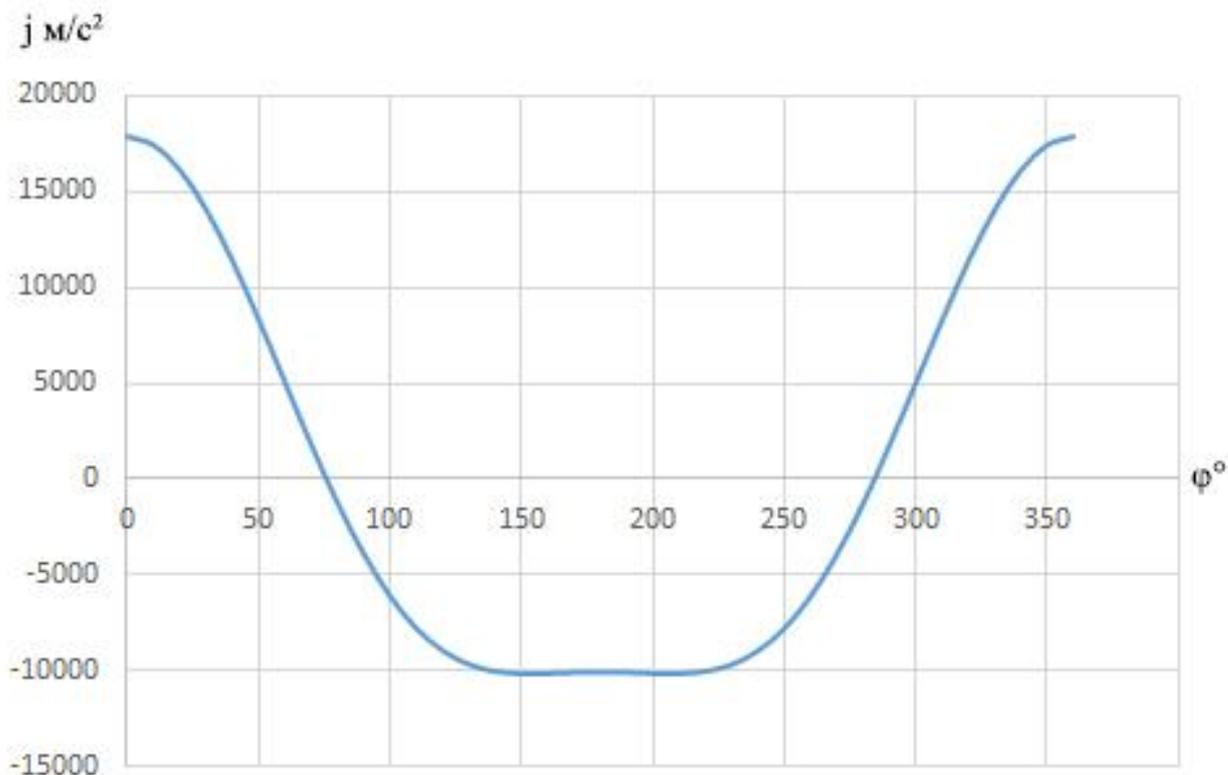


Рисунок 20 – Ускорения поршня

### 3.5 Динамические параметры К.Ш.М.

Определим силу давления газов рассчитав ее по формуле:

$$P_{\Gamma} = p_{\Gamma} \cdot F_{\Pi}$$

где:  $F_{\Pi}$  – площадь поршня.

$$P_{\Gamma} = (p_x - p_0) \cdot \frac{\pi \cdot d_{\Pi}^2}{4}$$

Величина давление  $p_x$  берется с индикаторной диаграммы приведенной в пункте 2.9,  $p_0$  – атмосферное давление,  $d_{\Pi}$  – диаметр поршня.

При  $\varphi = 0^\circ$ :

$$P_{\Gamma} = 0,1166 - 0,1 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,082^2}{4} = 0,087 \text{ Н}$$

Проведем расчет до  $\varphi = 720^\circ$ . Результаты расчетов сводятся в приложение В.

По результатам вычислений построим график  $P_{\Gamma} = f(\varphi)$ , изображенный на рисунке 21 и показывающий зависимость силы давления газов в цилиндре от

угла П.К.В.

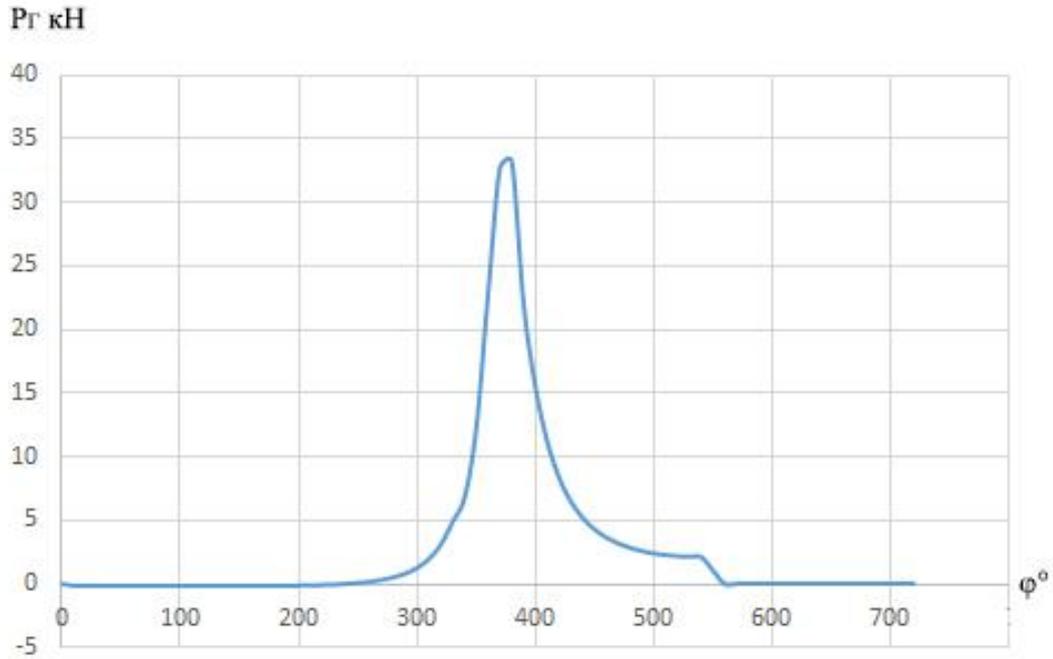


Рисунок 21 – Силы давления газов

### 3.6 Расчет силы инерции

К возвратно-поступательно движущимся массам относятся: поршень, поршневой палец, поршневые кольца, верхняя часть шатуна (0,275 массы шатуна).

Определим сумму инерции по формуле:

$$P_j = -m_j \cdot j$$

где:  $j$  – ускорение поршня,  $m_j$  – масса поршневой группы, равная:

$$m_j = m_{\Pi} + m_{\text{ШП}}$$

Масса поршня:

$$m_{\Pi} = m'_{\Pi} \cdot F_{\Pi} = 100 \cdot 0,0052 = 0,52 \text{ кг}$$

удельную конструктивную массу поршня примем равной  $m'_{\Pi} = 100 \text{ кг/м}^2$ .

Масса шатуна:

$$m_{\text{Ш}} = m'_{\text{Ш}} \cdot F_{\Pi} = 130 \cdot 0,0052 = 0,686 \text{ кг}$$

удельную конструктивную массу шатуна примем равной  $m'_{\text{Ш}} = 130 \text{ кг/м}^2$ .

Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца:

$$m_{\text{ШП}} = 0,275 \cdot m_{\text{Ш}} = 0,275 \cdot 0,686 = 0,188 \text{ кг}$$

Массы, совершающие возвратно-поступательное движение:

$$m_j = m_{\Pi} + m_{\text{ШП}} = 0,52 + 0,188 = 0,716 \text{ кг}$$

Формулу суммарной силы инерции представляем в виде:

$$P_j = -m_j \cdot j = -m_j \cdot r \cos\varphi + \lambda \cos 2\varphi \cdot \omega^2$$

$$P_j = -m_j \cdot \omega^2 \cdot r \cos\varphi - m_j \cdot \lambda \cos 2\varphi \cdot \omega^2$$

$$P_j = P_{j1} + P_{j2}$$

Сила инерции первого рода:

$$P_j = -m_j \cdot \omega^2 \cdot r \cos \varphi = -m_j \cdot j_{\Pi 1}$$

Сила инерции второго рода:

$$P_j = -m_j \cdot \lambda \cos 2\varphi \cdot \omega^2 = -m_j \cdot j_{\Pi 2}$$

При  $\varphi = 0^\circ$ :

$$P_{j1} = -m_j \cdot j_{\Pi 1} = -0,716 \cdot 13945 = -9,9 \text{ Н}$$

$$P_{j2} = -m_j \cdot j_{\Pi 2} = -0,716 \cdot 3904 = -2,7 \text{ Н}$$

$$P_j = P_{j1} + P_{j2} = -9,9 - 2,7 = -12,7 \text{ Н}$$

Проведем расчет до  $\varphi = 720^\circ$ . Результаты расчетов сводятся в приложение В.

По результатам вычислений строится график  $P_j = f(\varphi)$ , показанный на рисунке 22 и демонстрирующий силы инерции в зависимости от угла П.К.В.

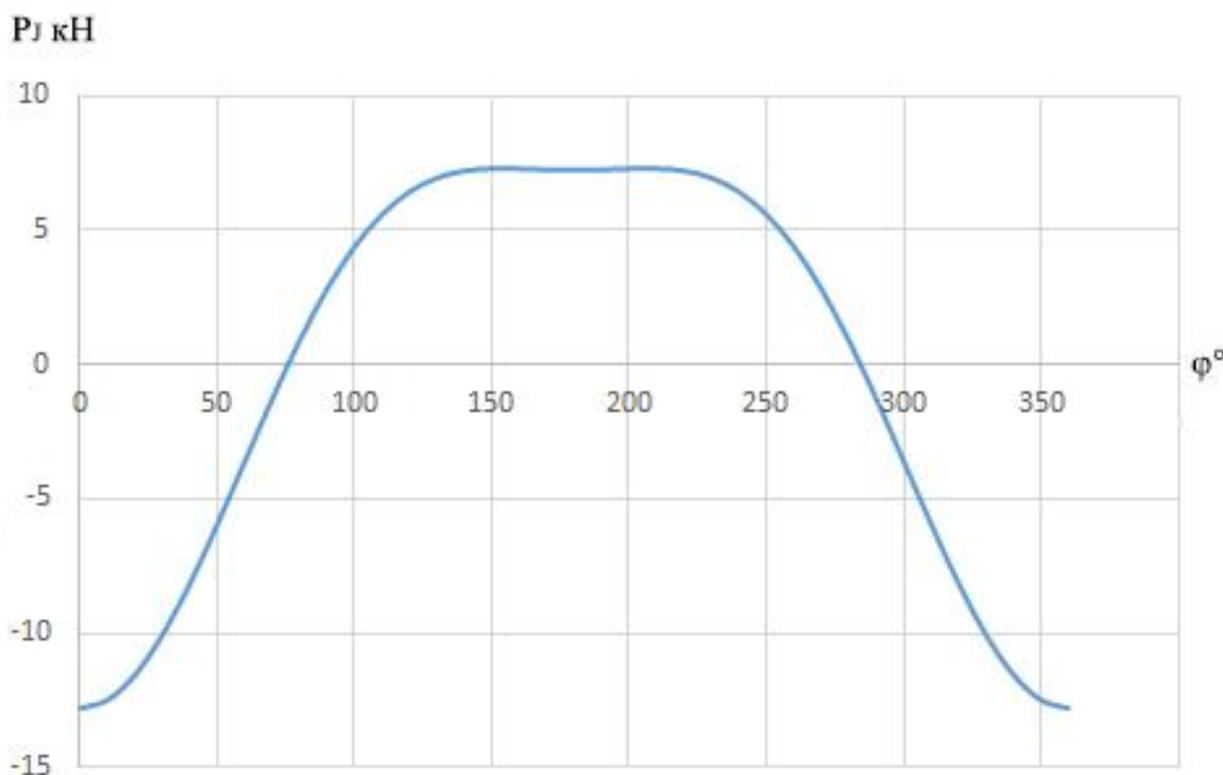


Рисунок 22 – Сил инерции

### 3.7 Силы инерции вращающихся масс

К вращающимся массам относятся кривошип и нижняя часть шатуна (0,725 массы шатуна).

Определим силу инерции по формуле:

$$P_r = -m_r \cdot \omega^2 \cdot r$$

где:  $m_r$  – масса вращающихся деталей.

$$m_r = m_k + m_{\text{шк}}$$

Масса неуравновешенных частей одного колена без противовесов находится по формуле:

$$m_k = m'_k \cdot F_{\Pi} = 170 \cdot 0,0052 = 0,897 \text{ кг}$$

удельную конструктивную массу вала принимаем равной  $m'_k = 170 \text{ кг/м}^2$ .

Масса шатуна, на оси кривошипа:

$$m_{\text{шк}} = 0,725 \cdot m_{\text{ш}} = 0,725 \cdot 0,686 = 0,5 \text{ кг}$$

Масса вращающихся частей:

$$m_r = m_k + m_{\text{шк}} = 0,897 + 0,5 = 1,4 \text{ кг}$$

Силы инерции, создаваемые ими:

$$P_r = -m_r \cdot \omega^2 \cdot r = -1,4 \cdot 607^2 \cdot 0,0378 = -19459 \text{ Н}$$

### 3.8 Суммарные силы в КШМ

Суммарная сила  $P_1$  рассчитывается по формуле:

$$P_1 = P_\Gamma + P_j$$

При  $\varphi = 0^\circ$ :

$$P_1 = P_\Gamma + P_j = 0,087 - 12,7 = -12,7 \text{ кН}$$

Проведем расчет до  $\varphi = 720^\circ$ . Результаты расчетов сводятся в приложение В.

По результатам вычислений образуем график  $P_1 = f(\varphi)$ , показанный на рисунке 23 и демонстрирующий нам суммарные силы действующие в КШМ в зависимости от угла П.К.В.

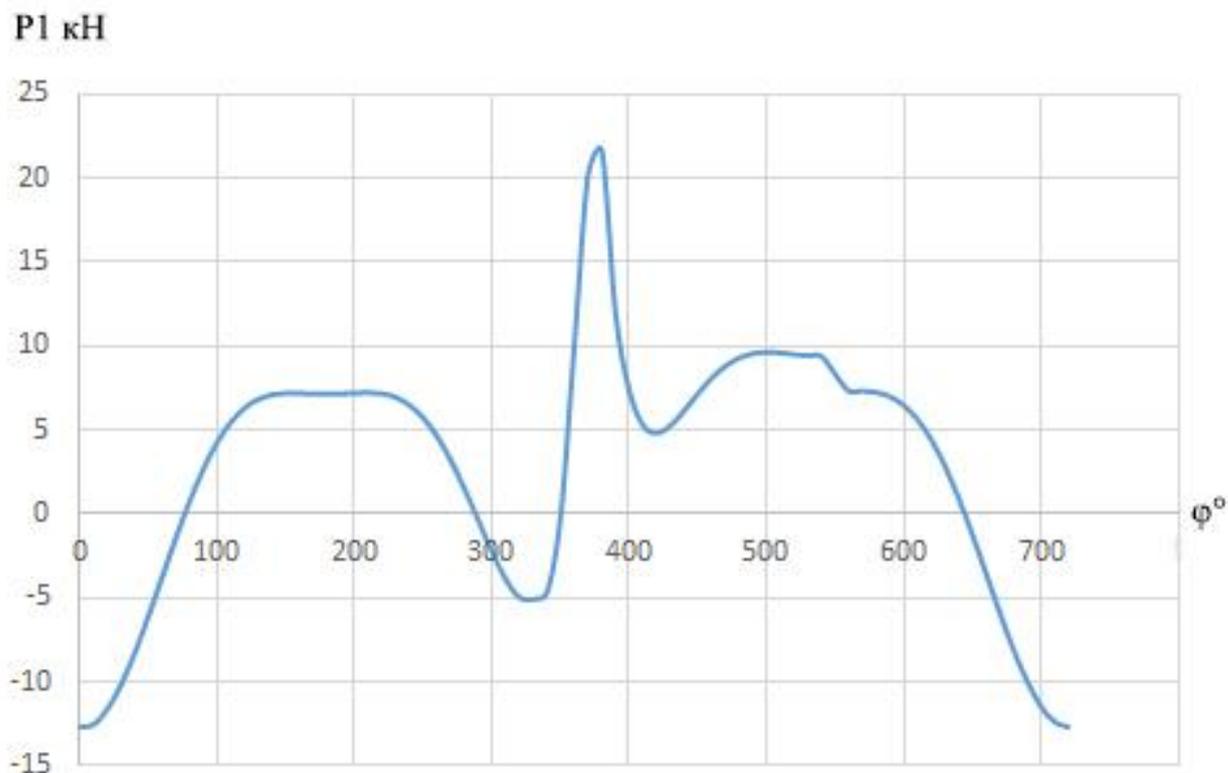


Рисунок 23 – Суммарные силы

На поршневом пальце суммарная сила инерции  $P_1$  раскладывается на две составляющие:

$N$  – нормальная к поверхности цилиндра, прижимающая поршень к поверхности цилиндра, вызывает механические потери и износ цилиндропоршневой группы.

$K$  – действует вдоль оси шатуна, передает усилие поршня на коленчатый вал, вызывает деформации сжатия и растяжения в шатунах.

Силу  $N$ , определим по формуле:

$$N = P_1 \cdot \operatorname{tg} \beta$$

При  $\varphi = 0^\circ$ :

$$N = P_1 \cdot \operatorname{tg} \beta = -12,7 \cdot 0 = 0 \text{ кН}$$

Проведем расчет до  $\varphi = 720^\circ$ . Результаты расчетов сводятся в приложение Б.

Силу  $K$ , определим по формуле:

$$K = \frac{P_1}{\cos \beta}$$

При  $\varphi = 0^\circ$ :

$$K = \frac{P_1}{\cos \beta} = \frac{-12,7}{1} = -12,7 \text{ кН}$$

Проведем расчет до  $\varphi = 720^\circ$ . Результаты расчетов сводятся в приложение В.

Разложим силу  $K$  на две составляющие:

$Z$  – радиальная сила, изгибающая шатунную шейку.

$T$  – тангенциальная сила, изгибающая шатунную шейку, щеки коленчатого вала и дополнительно скручивает коренную шейку.

Определим силу  $Z$ , рассчитав ее по формуле:

$$Z = P_1 \cdot \frac{\cos(\varphi + \beta)}{\cos \beta}$$

При  $\varphi = 0^\circ$ :

$$Z = -12,7 \cdot \frac{\cos \varphi + \beta}{\cos \beta} = -12,7 \text{ кН}$$

Проведем расчет до  $\varphi = 720^\circ$ . Результаты расчетов сводятся в приложение В.

Определим силу  $T$ , рассчитав ее по формуле:

$$T = P_1 \cdot \frac{\sin \varphi + \beta}{\cos \beta} = -12,7 \cdot 0 = 0 \text{ кН}$$

Проведем расчет до  $\varphi = 720^\circ$ . Результаты расчетов сводятся в приложение Б. Все значения тригонометрических функций берутся из литературных источников.[1]

Действия всех описанных нами сил показано на рисунке 24.

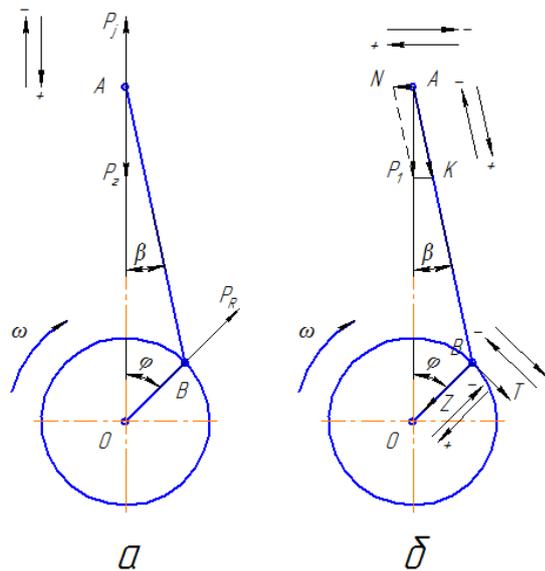


Рисунок 24 – Силы инерции

### 3.9 Построение полярной диаграммы сил

Равнодействующая  $R_{шш}$ , действующих на шатунную шейку, складывается из  $P_r, Z, T$  и определяется по формуле:

$$R_{шш} = \sqrt{T^2 + (Z + P_r)^2}$$

При  $\varphi = 0^\circ$ :

$$R_{шш} = \sqrt{T^2 + (Z + P_r)^2} = \sqrt{0^2 + (-12,7 - 19,4)^2} = 32,1 \text{ кН}$$

Проведем расчет до  $\varphi = 720^\circ$ . Результаты расчетов сводятся в приложение В.

По результатам вычислений строится диаграмма полярной силы  $R_{шш}$ , рисунок 25, действующей на шатунную шейку. Данная диаграмма показывает направление действия силы в каждый конкретный момент времени, в зависимости от угла поворота коленчатого вала.

Для определения максимальной и минимальной силы  $R_{шш}$ , полярную диаграмму перестраиваем в прямоугольные координаты, рисунок 26, в зависимости от угла П.К.В.

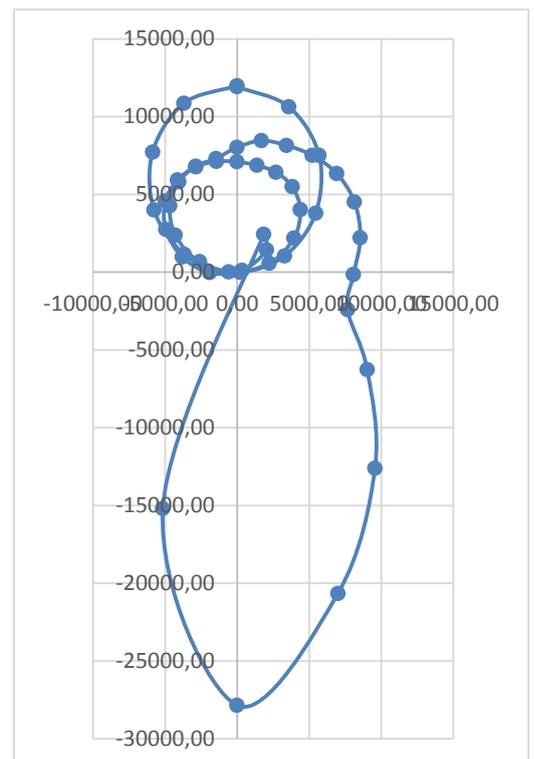


Рисунок 25 – Диаграмма полярной силы

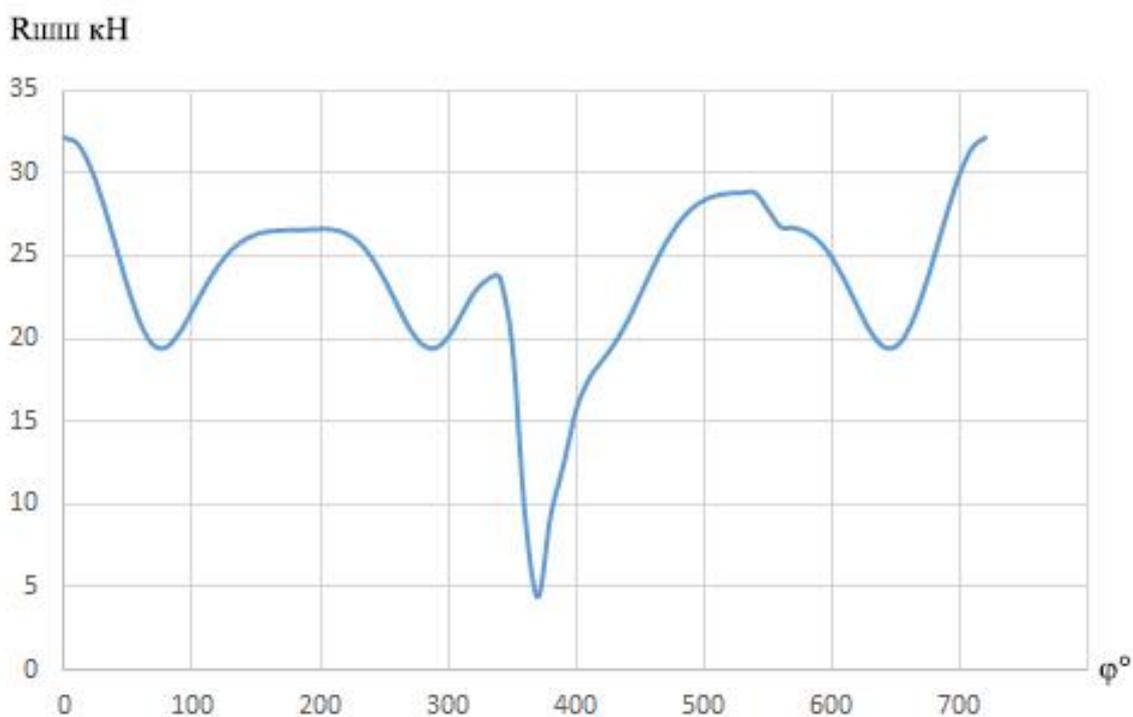


Рисунок 26 – Полярная диаграмма в прямоугольных координатах

### 3.10 Диаграмма износа шатунной шейки

Диаграмма износа строится следующим образом:

- воздействие силы распространяется равномерно по всему подшипнику в секторе  $120^\circ$  (по  $60^\circ$  в обе стороны от точки ее приложения);
- величина износа прямо пропорциональна величине действующей силы;
- суммарный износ равен сумме износов от действия отдельных сил.

Построения выполняется следующим образом. Вычерчиваются две отдельные окружности произвольного радиуса и делятся на сектора по  $10^\circ$  каждый. На первом круге производится вспомогательное построение. Для его построения из полярной диаграммы переносятся вектора действия сил и в соответствии с их направлениями и их действиями находят точки воздействия данных сил. С учетом допущений, для каждой силы, из центра окружности строится дуга  $120^\circ$  с центром в точке приложения данной силы. Увеличение радиуса дуги относительно предыдущей, пропорционально величине силы, действующей в этой точке. По этому примеру строятся и другие построения,

для каждой силы.

После обнаружения износа от действия всех сил во время рабочего цикла, суммируется, по каждому радиусу, общая толщина вычерченных участков и откладывается от второй окружности по соответствующему радиусу в сторону центра. Концы данных отрезков соединяются плавной кривой, для получения нашей диаграммы

По диаграмме износа на рисунке 27 определяется место для подвода масла, которое назначается в зоне наименьших нагрузок.

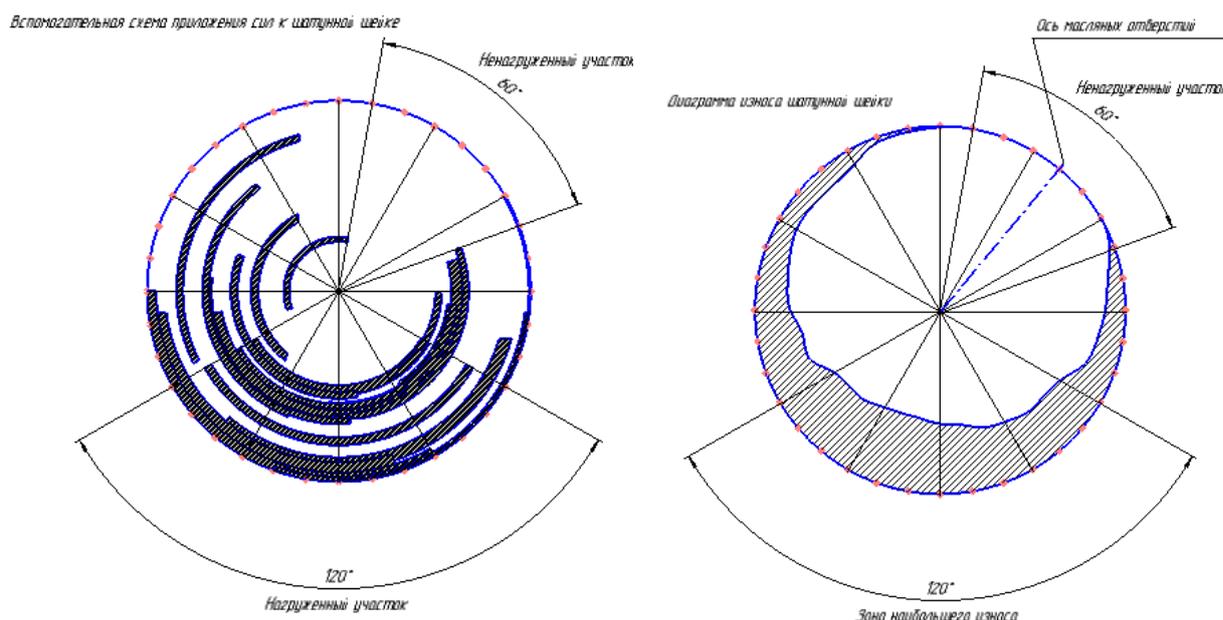


Рисунок 27 – Диаграмма износа

### 3.11 Уравновешенность двигателя

Наш двигатель 4х тактный и 4х цилиндровый, поэтому промежутки между вспышками равны 180°. Схема двигателя приведена на рисунке 28. Очередность процессов в двигателе нашего типа, с указаниями углов П.К.В., показана на таблице 8, приведенной ниже.

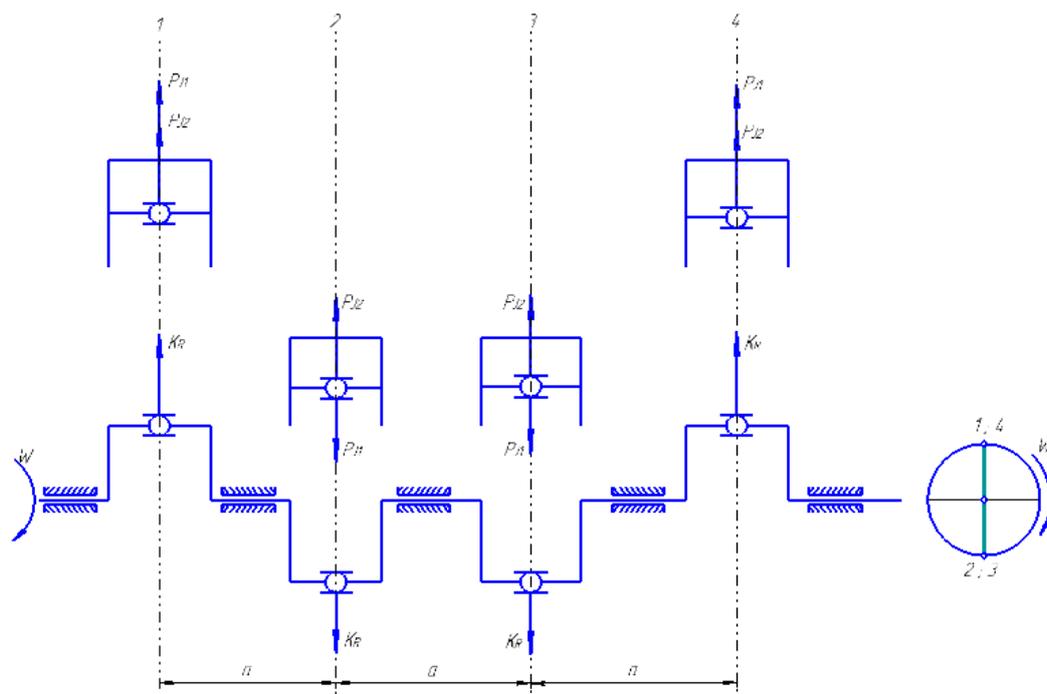


Рисунок 28 – Схема двигателя

Силы инерции первого порядка и второго порядка для данного типа двигателя взаимно уравниваются, так как действуют в одной плоскости и равны нулю:

$$\Sigma P_{j1} = 0$$

$$\Sigma P_{j2} = 0$$

Суммарный момент сил инерции второго порядка также равен нулю:

$$\Sigma M_{j2} = 0$$

Таблица 8 – Очередность процессов

Обороты коленчатого вала	Угол П.К.В., °	Цилиндры			
		1	2	3	4
Первый	0-30				
	30-60	Впуск	Рабочий ход	Сжатие	Выпуск
	60-90				
	90-120	Сжатие	Выпуск	Рабочий ход	Впуск
	120-150				
	150-180	Рабочий ход	Впуск	Выпуск	Сжатие
	180-210				
	210-240	Выпуск	Сжатие	Впуск	Рабочий ход

	240-270	Впуск	Рабочий ход	Сжатие	Выпуск
	270-300				
	300-330	Сжатие	Выпуск	Рабочий ход	Впуск
330-360					
Второй	360-390	Рабочий ход	Впуск	Выпуск	Сжатие
	390-420				
	420-450	Выпуск	Сжатие	Впуск	Рабочий ход
	450-480				
	480-510	Впуск	Рабочий ход	Сжатие	Выпуск
	510-540				
	540-570	Сжатие	Выпуск	Рабочий ход	Впуск
	570-600				
	600-630	Рабочий ход	Впуск	Выпуск	Сжатие
	630-660				
	660-690	Выпуск	Сжатие	Впуск	Рабочий ход

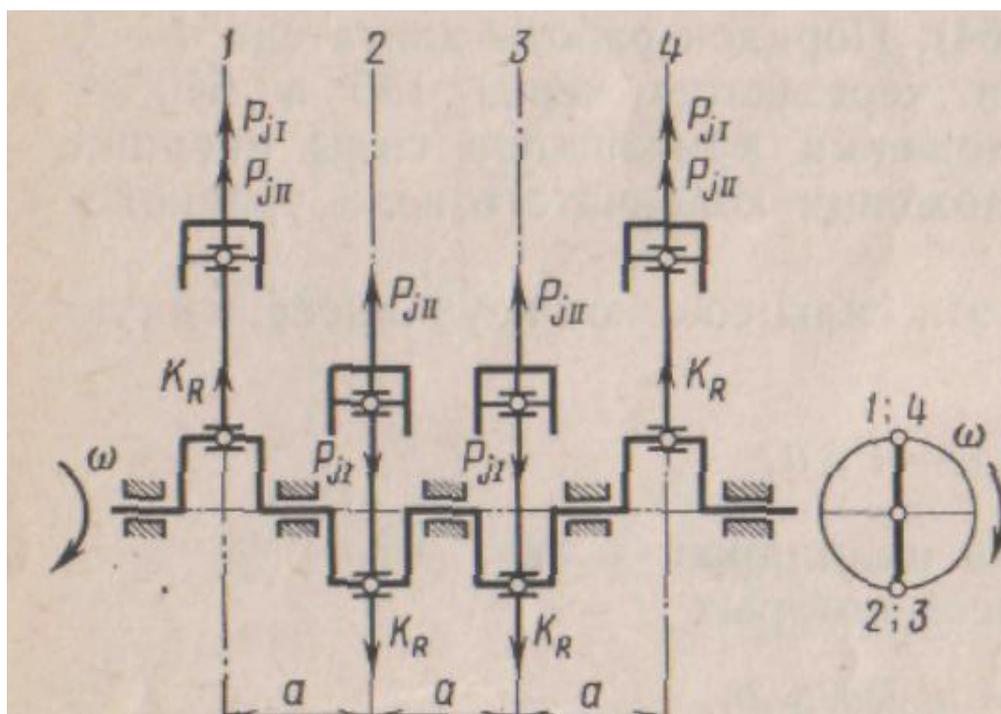


Рисунок 29 – Схема сил инерции, действующих в двигателе ВАЗ - 21127.

Суммарный момент сил инерции первого порядка действует во вращающейся плоскости, составляющей с плоскостью первого кривошипа угол 30:

$$\Sigma M_{j1} = 0 \text{ Нм}$$

Центробежные силы инерции для всех цилиндров равны и направлены попарно в разные стороны. Равнодействующая этих сил равна нулю:

$$\Sigma K_R = 0$$

Суммарный момент  $\Sigma M_R$  центробежных сил действует в той же плоскости, что и равнодействующий момент сил инерции первого порядка:

$$\Sigma M_R = 0 \text{ Нм}$$

Суммарный момент инерции:

$$\Sigma M = \Sigma M_R + \Sigma M_{j1} = 0 \text{ Нм}$$

Уравновешивание этих сил осуществляется противовесами, установленными на продолжении щек вала или путем установки двух противовесов на концах коленчатого вала в плоскости действия моментов:

Масса каждого противовеса:

$$m_{пр} = a \cdot R \cdot \frac{1}{10} \cdot \frac{m_k + m_{шк} + m_j}{pb} = 0,18 \cdot 0,04 \cdot \frac{1}{10} \cdot \frac{0,897 + 0,497 + 0,716}{0,0378 \cdot 0,9} = 1,3 \text{ кг,}$$

где:  $p$  - расстояние от центра тяжести противовеса до оси коленчатого вала,  $b$  - расстояние между центрами тяжести противовесов,  $a$  - расстояние между центрами шатунных щек.

## 4 РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВС

### 4.1 Расчет поршня[15-20,24].

Рассчитаем напряжение изгиба днища поршня по формуле:

$$\sigma_{из} = p_{zmax} \frac{r_i^2}{\delta} = 3,6 \cdot \frac{12,19^2}{2,5} = 85,59 \text{ МПа}$$

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

Определим в сечении наименьшей площади напряжение на сжатие:

$$\sigma_{сж} = \frac{P_{zmax}}{F_{x-x}} = \frac{0,0307}{0,0008} = 38 \text{ МПа}$$

где:  $P_{zmax} = P_z F_{\Pi} = 5,83 \cdot 0,0052 = 0,03 \text{ МН}$  ;

$$F_{x-x} = \frac{\pi}{4} (d_k^2 - d_i^2) - n'_M F' = ((3,14/4) \cdot (73,5 - 65,75) - 10 \cdot 3,875) \cdot 10^{-6} = 0,0008 \text{ м}^2$$

$$F' = \frac{d_k - d_i}{2} \cdot d_M = \frac{73,5 - 65,75}{2} \cdot 1 = 3,875 \text{ мм}^2$$

$$d_k = D - 2 t + \Delta t = 82 - 2 \cdot 3,5 + 0,75 = 73,5 \text{ мм}$$

Максимальная угловая скорость х.х. нашего ДВС:

$$\omega_{x.xmax} = \frac{\pi n_{x.xmax}}{30} = \frac{3,14 \cdot 6100}{30} = 639 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Определим максимальную разрывную силу:

$$P_j = m_{x-x} R \omega_{x.xmax}^2 (1 + \lambda) = 0,229 \cdot 0,04 \cdot 639^2 \cdot (1 + 0,28) \cdot 10^{-6} = 0,0047 \text{ МН}$$

Рассчитаем напряжение разрыва поршня:

$$\sigma_p = \frac{P_j}{F_{x-x}} = \frac{0,0047}{0,0008} = 5,91 \text{ МПа}$$

В кольцевой перемычке, определим напряжения:

Среза;

$$\tau = 0,0314 \cdot p_{zmax} \cdot \frac{D}{h_{\Pi}} = 0,0314 \cdot 5,83 \cdot \frac{82}{3,5} = 4,28 \text{ МПа}$$

Изгиба;

$$\sigma_{из} = 0,0045 p_{zmax} \left(\frac{D}{h_p}\right)^2 = 0,0045 \cdot 5,83 \cdot \frac{82^2}{3,5} = 14,4 \text{ МПа}$$

Сложного;

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{из}^2 + 4\tau^2} = 16,76 \text{ МПа}$$

Максимальное удельное давление юбки поршня на стенку цилиндра определяется по формулам, приведенным ниже:

$$q_1 = \frac{N_{max}}{h_{ю} \cdot D} = \frac{0,0045}{0,055 \cdot 0,082} = 0,9 \text{ МПа}$$

$$q_2 = \frac{N_{max}}{H \cdot D} = \frac{0,0045}{0,08 \cdot 0,082} = 0,68 \text{ МПа}$$

Диаметр головки поршня и юбки поршня соответственно, с учетом монтажных зазоров:

$$D_{\Gamma} = D - \Delta_{\Gamma} = 82 - 0,574 = 81,426 \text{ мм}$$

$$D_{\text{ю}} = D - \Delta_{\text{ю}} = 82 - 0,164 = 81,836 \text{ мм}$$

где:  $\Delta_{\Gamma} = 0,007D = 0,007 \cdot 82 = 0,574 \text{ мм}$ ;  $\Delta_{\text{ю}} = 0,002D = 0,002 \cdot 82 = 0,164 \text{ мм}$ .

#### 4.2 Расчет поршневых колец

Определим давление кольца на стенку цилиндра нашего ДВС:

$$p_{cp} = 0,152E \frac{\frac{A_0}{t}}{\frac{D}{t} - 1} \frac{\frac{10,5}{3,5}}{\frac{82}{3,5} - 1} = 0,152 \cdot 1,2 \cdot 10^5 \frac{\frac{10,5}{3,5}}{\frac{82}{3,5} - 1} = 0,21 \text{ МПа}$$

Определим напряжение изгиба кольца в состоянии работы:

$$\sigma_{из1} = 2,61p_{cp} \left(\frac{D}{t} - 1\right)^2 = 2,61 \cdot 0,21 \cdot \left(\frac{82}{3,5} - 1\right)^2 = 272 \text{ МПа}$$

Таблица 9 – Давления кольца на зеркало цилиндр

Угол определяющий положение текущего давления	0	30	60	90	120	150	180
Переменный коэффициент	1,06	1,04	1,02	1,01	1,03	1,28	1,45
Давление в конкретной точке	0,2968	0,2912	0,2856	0,2828	0,2884	0,3584	0,406

Определим монтажное напряжение кольца, при его установке:

$$\sigma_{из2} = \frac{4E(1 - \frac{0,114A_0}{t})}{m \frac{D}{t} - 1,4 \frac{D}{t}} = \frac{4 \cdot 1,2 \cdot 10^5 \cdot 1 - 0,114 \cdot \frac{10,5}{3,5}}{1,57 \cdot \frac{82}{3,5} - 1,4 \cdot \frac{82}{3,5}} = 390 \text{ МПа}$$

Определим монтажный зазор в замке кольца:

$$\begin{aligned} \Delta_K &= \Delta'_K + \pi D \alpha_K T_K - T_0 - \alpha_{Ц} T_{Ц} - T_0 = \\ &= 0,07 + 3,14 \cdot 82 \cdot (11 \cdot 10^{-6} \cdot 500 - 293 - 11 \cdot 10^{-6} \cdot 380 - 293) = 0,41 \text{ мм} \end{aligned}$$

где:  $\Delta'_K = 0,07$  мм,  $T_K = 680$ К,  $T_{Ц} = 462$  К

### 4.3 Расчет поршневого пальца

Воздействующие на поршневой палец силы:

- газовая

$$P_{zmax} = p_{zmsx} F_{П} = 5,83 \cdot 0,0052 = 0,03 \text{ МН}$$

- инерционная

$$\begin{aligned} P_j &= -m_{П} \omega_M^2 R (1 + \lambda \cdot 10^6) = -0,458 \cdot 607^2 \cdot 0,04 \cdot 1 + 0,28 \cdot 10^6 \\ &= -0,00865 \text{ МН} \end{aligned}$$

-расчетная

$$P = P_{zmax} + kP_j = 0,03 - 0,8 \cdot 0,00865 = 0,0238 \text{ МН}$$

Определяем давление на единицу площади втулки шатуна в поршневой головке:

$$q_{ш} = \frac{P}{d_{П} l_{ш}} = \frac{0,0238}{21 \cdot 30} = 37,8 \text{ МПа}$$

Рассчитаем давление пальца на бобышки:

$$q_6 = \frac{P}{d_{П} (l_{П} - b)} = \frac{0,0238}{21 \cdot (70 - 32)} = 29,9 \text{ МПа}$$

Определим напряжение на изгибе:

$$\sigma_{из} = \frac{P (l_{П} + 2b - 1,5l_{ш})}{1,2 (1 - \alpha^4) d_{П}^3} = \frac{0,0238 \cdot ((70 + 2 \cdot 32 - 1,5 \cdot 30))}{1,2 \cdot (1 - 0,66^4) \cdot 21} = 238,2 \text{ МПа}$$

Напряжения оваллизации на внешней поверхности пальца определяется по формулам и рассчитывается в двух плоскостях:

горизонтальная;

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha 0^\circ} &= \frac{15P}{d_{П} l_{П}} \cdot 0,19 \frac{2 + \alpha}{1 - \alpha^2} \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} - \frac{1}{1 - \alpha} \cdot 0,1 - \alpha - 0,4^3 \\ &= \frac{15 \cdot 0,0238}{21 \cdot 70} \cdot 0,19 \frac{2 + 0,66}{1 - 0,66^2} \frac{1 + 0,66}{1 - 0,66} - \frac{1}{1 - 0,66} \cdot 0,1 - 0,66 - 0,4^3 \\ &= 90 \text{ МПа} \end{aligned}$$

вертикальная;

$$\begin{aligned}\sigma_{\alpha 90^\circ} &= -\frac{15P}{d_{\text{п}}l_{\text{п}}} 0,174 \frac{2+\alpha}{1-\alpha^2} \frac{1+\alpha}{1-\alpha} - \frac{0,636}{1-\alpha} 0,1 - \alpha - 0,4^3 \\ &= \frac{15 \cdot 0,0238}{21 \cdot 70} 0,174 \frac{2+0,66}{1-0,66^2} \frac{1+0,66}{1-0,66} + \frac{0,636}{1-0,66} 0,1 - 0,66 - 0,4^3 \\ &= -107 \text{ МПа}\end{aligned}$$

Напряжения оваллизации на внутренней поверхности пальца определяется по формулам и рассчитывается в двух плоскостях:

горизонтальная;

$$\begin{aligned}\sigma_{\alpha 0^\circ} &= -\frac{15P}{d_{\text{п}}l_{\text{п}}} 0,19 \frac{1+2\alpha}{1-\alpha^2} \frac{1+\alpha}{\alpha} + \frac{1}{1-\alpha} 0,1 - \alpha - 0,4^3 \\ &= -\frac{15 \cdot 0,0238}{21 \cdot 70} 0,19 \frac{2+0,66}{1-0,66^2} \frac{1+0,66}{0,66} + \frac{1}{1-0,66} 0,1 - 0,66 - 0,4^3 \\ &= -147 \text{ МПа}\end{aligned}$$

вертикальная;

$$\begin{aligned}\sigma_{\alpha 0^\circ} &= \frac{15P}{d_{\text{п}}l_{\text{п}}} 0,174 \frac{1+2\alpha}{1-\alpha^2} \frac{1+\alpha}{\alpha} - \frac{0,636}{1-\alpha} 0,1 - \alpha - 0,4^3 \\ &= \frac{15 \cdot 0,0238}{21 \cdot 70} 0,174 \frac{2+0,66}{1-0,66^2} \frac{1+0,66}{0,66} - \frac{0,636}{1-0,66} 0,1 - 0,66 - 0,4^3 \\ &= 92 \text{ МПа}\end{aligned}$$

## 5 СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В специальной части мы сделаем расчет стандартной и расчет модернизированной системы охлаждения. В качестве модернизации мы возьмём радиатор с микроканальным теплообменником, изготовленный из алюминиевого сплава марки АВ, он же авиаль. Коэффициент теплопередачи этого материала выше чем материал стандартного радиатора на 20 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Также мы повысим эффективность системы охлаждения с микроканальным теплообменником.

Микроканальные теплообменники имеют значительные преимущества по сравнению с традиционными. Они прочнее, компактнее и при меньшем внутреннем объеме (до 77 % меньше, чем в классическом ТО) имеют более высокую эффективность. Все это достигается благодаря следующим особенностям конструкции теплообменника:

- теплообменник состоит из пластин с микроканалами (т.е. с большой суммарной площадью внутренней поверхности), к которым при помощи пайки крепится оребрение особой формы;
- коллекторы с разделительными перегородками обеспечивают наиболее эффективное распределение хладагента по микроканалам;
- теплообменник полностью изготовлен из алюминия.

В микроканальных теплообменниках полностью отсутствует риск возникновения гальванической коррозии. Дополнительным преимуществом является возможность изменения геометрической формы теплообменника. Теплообменники, изготовленные по данной технологии, широко применяются в автомобильной промышленности. Только микроканальные теплообменники способны выдержать нагрузки и тяжелые условия эксплуатации, характерные для автомобильных кондиционеров.

В настоящий момент совместное предприятие Danfoss-Sanhua производит микроканальные теплообменники с шиной микроканальной пластины 16,20 и 25 мм, максимальными габаритами 1500\*4000 мм и медными присоединительными патрубками диаметром до 15,88 мм.

В результате независимых испытаний теплообменников Danfoss-Sanhua, проведенных Университетом Иллинойса в 2007 году, были сделаны следующие заключения:

- холодильный коэффициент системы с микроканальным теплообменником при стандартных условиях ARI A на 13,1 % выше, чем у традиционных воздушных теплообменников из медных труб с алюминиевыми ламелями;
- температура конденсации ниже на 2,5<sup>0</sup> C;
- потери давления в контуре хладагента ниже на 65 % (при проведении испытаний для традиционного теплообменника потери составили 166кПа, для микроканального – 57 кПа).

Данные результаты получены для микроканального теплообменника, который на 8 % меньше классического по площади. Таким образом, используя микроканальные теплообменники в качестве воздушных конденсаторов и испарителей, вы получаете возможность производить холодильное оборудование:

- более энергоэффективное (при одновременном снижении количества хладагента в системе и общей массы изделия);
- более компактное и лёгкое (без потери эффективности);
- надёжное, удобное в обслуживании и эксплуатации.

## 5.1 Расчет стандартной системы охлаждения.

### 5.1.1 Расчет жидкостного насоса.

Для проведения расчета, воспользуемся справочной литературой для извлечения, необходимых нам, начальных данных, сведенных в таблицу 10.

Таблица 10 – Данные для расчета насоса

Теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К), $c_{ж}$	4187
Плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup> , $\rho_{ж}$	1000
Напор насоса, Па, $p_{ж}$	120000
Частота вращения насоса, об/мин <sup>-1</sup> , $n_{в.н.}$	4500
Температурный перепад жидкости, К, $\Delta T_{ж}$	10
Коэффициент подачи, $\eta$	0,83
Скорость жидкости на входе, м/с, $c_1$	1,7
Радиус ступицы, м, $r_0$	0,012
Угол $\alpha_2$	10
Угол $\beta_2$	45
Гидравлический КПД, $\eta_h$	0,66
Число лопаток, $z$	4
Толщина лопаток, м, $\delta$	0,0025
Механический КПД, $\eta_m$	0,84

$Q_b$  – значение количества теплоты отводимое от двигателя, возьмем из теплового расчета и примем равным – 62104 Дж/с.

Циркуляционный расход охлаждающей жидкости, м<sup>3</sup>/с:

$$G_{\text{ж}} = \frac{Q_{\text{в}}}{c_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \Delta T_{\text{ж}}} = \frac{62104}{4187 \cdot 1000 \cdot 10} = 0,00148$$

Производительность водяного насоса, м<sup>3</sup>/с:

$$G_{\text{ж.р.}} = \frac{G_{\text{ж}}}{\eta} = \frac{0,00148}{0,83} = 0,00179$$

Радиус входного отверстия крыльчатки насоса, м:

$$r_1 = \sqrt{\frac{V_{\text{жр}}}{(10^3 \pi C_1)} + r_0^2} = \sqrt{\frac{0,00179}{(10^3 \cdot 3,14 \cdot 1,7)} + 0,012^2} = 0,0219$$

Окружная скорость потока жидкости, м/с:

$$u_2 = \sqrt{1 + \operatorname{tg} \alpha_2 \operatorname{ctg} \beta_2} \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{ж}}}{10^3 \eta_{\text{г}} \rho_{\text{ж}}}} = \sqrt{1 + \operatorname{tg} 10 \cdot \operatorname{ctg} 45} \cdot \sqrt{\frac{120000}{10^3 \cdot 0,66 \cdot 1000}} = 14,6$$

Радиус крыльчатки, м:

$$r_2 = \frac{30 \cdot 14,6}{\pi \cdot 4500} = 0,031$$

Окружная скорость потока, м/с:

$$u_1 = u_2 \cdot \frac{r_1}{r_2} = 14,6 \cdot \frac{0,0219}{0,031} = 10,31$$

Для дальнейших расчетов, нам необходимо найти угол  $\beta_1$ :

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{c_1}{u_1} = \frac{1,7}{10,31} = 0,1649$$

Следовательно,  $\beta_1 = 9,7^\circ$

Радиальная скорость потока охлаждающей жидкости, м/с:

$$c_r = \frac{p_{\text{ж}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_2}{u_2 \eta_{\text{г}} \rho_{\text{ж}}} = \frac{120000 \cdot \operatorname{tg} 10}{14,6 \cdot 0,66 \cdot 1000} = 2,2$$

Ширина лопаток на входе и выходе соответственно, м:

$$b_{\text{вход}} = \frac{G_{\text{ж.р.}}}{(2 \cdot \pi \cdot r_1 - z \cdot \frac{\delta_1}{\sin \beta_1}) \cdot c_1} = \frac{0,00179}{(2 \cdot 3,14 \cdot 0,0219 - 4 \cdot \frac{0,0025}{\sin 9,7}) \cdot 1,7} = 0,0136$$

$$b_{\text{выход}} = \frac{G_{\text{ж.р.}}}{(2 \cdot \pi \cdot r_2 - z \cdot \frac{\delta_2}{\sin \beta_2}) \cdot c_r} = \frac{0,00179}{(2 \cdot 3,14 \cdot 0,031 - 4 \cdot \frac{0,025}{\sin 45}) \cdot 2,2} = 0,0045$$

Мощность, потребляемая насосом, кВт:

$$N_{\text{в.н.}} = G_{\text{ж.р.}} \cdot \frac{p_{\text{ж}}}{1000 \cdot \eta_{\text{м}}} = 0,00179 \cdot \frac{120000}{1000 \cdot 0,84} = 0,25$$

### 5.1.2 Расчет радиатора

Некоторые данные, требуемые для проведения расчета, будут взяты из пункта 5.1.1. Другие справочные данные, необходимые для расчёта, сведены в таблицу 11.

Таблица 11 – Исходные данные для расчета радиатора

Теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К), $c_{\text{возд.}}$	1000
Температура перепада воздуха, К, $\Delta T_{\text{возд}}$	25
Температура воздуха перед радиатором, К, $T_{\text{возд.вх}}$	310
Температура жидкости перед радиатором, К, $T_{\text{ж.вх.}}$	360
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К), К	160

Количество воздуха, пропускаемое радиатором, кг/с:

$$G'_{\text{возд}} = \frac{Q_{\text{возд}}}{c_{\text{возд}} \cdot \Delta T_{\text{возд}}} = \frac{62104}{1000 \cdot 25} = 2,48$$

Массовый расход жидкости, кг/с:

$$G'_{\text{ж}} = G_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ж}} = 0,00148 \cdot 1000 = 1,48$$

Средняя температура воздуха для охлаждения, К:

$$T_{\text{ср.возд}} = \frac{T_{\text{возд.вх}} + (T_{\text{возд.вх}} + \Delta T_{\text{возд}})}{2} = \frac{310 + (310 + 25)}{2} = 322,5$$

Средняя температура охлаждающей жидкости внутри радиатора, К:

$$T_{\text{ср.ж}} = \frac{T_{\text{ж.вх}} + (T_{\text{ж.вх}} - \Delta T_{\text{ж}})}{2} = \frac{360 + (360 - 10)}{2} = 355$$

Расчет поверхности охлаждения, м<sup>2</sup>:

$$F = \frac{Q_{\text{ж}}}{K \cdot (T_{\text{ср.ж}} - T_{\text{ср.возд}})} = \frac{62104}{160 \cdot (355 - 322,5)} = 11,94$$

### 5.1.3 Расчет вентилятора

Требуемые для расчета данные, взяты из справочной литературы и сведены в таблицу 12. Часть данных, будет взята из пункта 5.1.2.

Таблица 12 – Данные для расчета вентилятора

Напор вентилятора, Па, $\Delta p_{тр}$ .	795
Давление, Мпа, $p_0$	0,1
Газовый коэффициент, $R_B$	287
Скорость воздуха, м/с, $\omega$	20
Безразмерный лопастной коэффициент, $\Psi$	3,4
КПД вентилятора, $\eta_B$	0,39

Плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_{возд} = p_0 \cdot \frac{10^6}{R_B \cdot T_{ср.возд}} = 0,1 \cdot \frac{10^6}{287 \cdot 322,5} = 1,08$$

Производительность вентилятора, м<sup>3</sup>/с:

$$G_{возд} = \frac{G'_{возд}}{\rho_{возд}} = \frac{2,48}{1,08} = 2,29$$

Поверхность фронта радиатора, м<sup>2</sup>:

$$F_{фр.рад} = \frac{G_{возд}}{\omega_{возд}} = \frac{2,29}{20} = 0,114$$

Диаметр вентилятора, м:

$$D_{вент} = 2 \cdot \frac{F_{фр.рад}}{\pi} = 2 \cdot \frac{0,114}{3,14} = 0,383$$

Скорость, м/с:

$$u = \psi \cdot \frac{\Delta p_{тр}}{\rho_{возд}} = 3,4 \cdot \frac{795}{1,08} = 92,2$$

Частота вращения, об/мин<sup>-1</sup>:

$$n_{вент} = 60 \cdot \frac{u}{\pi \cdot D_{вент}} = 60 \cdot \frac{92,2}{3,14 \cdot 0,383} = 4603$$

Мощность, идущая на привод, кВт:

$$N_{вент} = G_{возд} \cdot \frac{\Delta p_{тр}}{1000 \cdot \eta_B} = 2,29 \cdot \frac{795}{1000 \cdot 0,39} = 4,69$$

## 5.2 Расчет модернизированной системы охлаждения.

В расчете модернизированной системе охлаждения мы возьмём радиатор с микроканальным теплообменником, изготовленный из алюминиевого сплава марки АВ.

### 5.2.1 Расчет радиатора

Некоторые данные, требуемые для проведения расчета, будут взяты из пункта 5.1.1. Другие справочные данные, необходимые для расчёта, сведены в таблицу 13.

Таблица 13 – Исходные данные для расчета радиатора

Теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К), $c_{\text{возд}}$	1000
Температура перепада воздуха, К, $\Delta T_{\text{возд}}$	25
Температура воздуха перед радиатором, К, $T_{\text{возд.вх}}$	310
Температура жидкости перед радиатором, К, $T_{\text{ж.вх}}$	360
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К), К	173

Количество воздуха, пропускаемое радиатором, кг/с:

$$G'_{\text{возд}} = \frac{Q_{\text{возд}}}{c_{\text{возд}} \cdot \Delta T_{\text{возд}}} = \frac{62104}{1000 \cdot 25} = 2,48$$

Массовый расход жидкости, кг/с:

$$G'_{\text{ж}} = G_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ж}} = 0,00148 \cdot 1000 = 1,48$$

Средняя температура воздуха для охлаждения, К:

$$T_{\text{ср.возд}} = \frac{T_{\text{возд.вх}} + (T_{\text{возд.вх}} + \Delta T_{\text{возд}})}{2} = \frac{310 + (310 + 2,48)}{2} = 322,5$$

Средняя температура охлаждающей жидкости внутри радиатора, К:

$$T_{\text{ср.ж}} = \frac{T_{\text{ж.вх}} + (T_{\text{ж.вх}} - \Delta T_{\text{ж}})}{2} = \frac{360 + (360 - 10)}{2} = 355$$

Расчет поверхности охлаждения, м<sup>2</sup>:

$$F = \frac{Q_{\text{ж}}}{K \cdot (T_{\text{ср.ж}} - T_{\text{ср.возд}})} = \frac{62104}{173 \cdot (355 - 322,5)} = 11,05$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения бакалаврской работы, была рассчитана модернизация системы охлаждения двигателя семейства ВАЗ, на примере двигателя 21127. В ходе выполнения работы были выполнены следующие этапы:

- тепловой баланс и тепловой расчет двигателя, где рассчитаны основные параметры двигателя.
- кинематический расчет, изображающий изменение кинематических параметров данного двигателя.
- динамический расчет, изображающий силу и нагрузку, действующие на кривошипно-шатунный механизм.
- расчет системы охлаждения в разделе специальной части. Анализ и оценка эффективности применения нового механизма на двигателе.
- анализ влияния на экологичность и безопасность нового устройства.

В результате модернизации системы охлаждения путём внедрения макроканального теплообменника и изменения материала радиатора на алюминиевый сплав АВ была получена уменьшенная поверхность охлаждения на 7% (с 11,94 до 11,05 м<sup>2</sup>), масса уменьшена на 13% (с 3,45 до 3 кг), габариты уменьшены на 5%.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей [Текст]/ Колчин, А.И. Демидов В.П. ; Учебное пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Высшая школа, 2016. □ 496 с.
2. Вибе, И.И. Уточненный тепловой расчет двигателя [Текст] / И.И. Вибе ; М. Машиностроение, 2015. □ 282 с.
3. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] / С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова ; – 3-е издание. – М. : Высшая школа 2011. – с. 342.
4. Davies, C.C. Electric water pumps [Electronic resource] / C.C. Davies // daviescraig.com: Article about Davies Craig’s water pumps, 2017. – p.16.
5. Wolf, A. Mechanical and Electric water pumps [Electronic resource] / A. Wolf // streetmusclemag.com: comparison electric and mechanical water pumps, March 14, 2017. – p.14.
6. Restella, M. Mercedes Benz Cooling System [Electronic resource] / M. Restella // streetdirectory.com: articles about cars maintenance, 2017. – p.35.
7. Kelkar, A. Automobile Bodies (Introduction Part) [Electronic resource] / A. Kelkar, R. Roth, J. Clark // tms.org: Automotive Materials and Economics, 2010. – p.51.
8. Wang, X. Comparison of Electrical and Mechanical Water Pump Performance in Internal Combustion Engine [Electronic resource] / Wang, X., Liang, X., Hao, Z. and Chen, R. // dspace.lboro.ac.uk: comparison electric and mechanical water pumps, 2015. – p.48.
9. Вавильев, А.М. Обзор водяных насосов для моторов Lada [Электронный ресурс] / А.М. Вавильев ; Автомобильный журнал «Движок». – М. : 2017. – с.19.

10. Сергеев, С.О. Устройство водяного насоса для ВАЗ-2107 [Электронный ресурс] / С.О. Сергеев ; autoclub.net – автомобильный форум. – М. : 2018. – с.10.
11. Спасский, К. Н. Новые насосы для малых подач и высоких напоров [Текст] / К. Н. Спасский ; М. : Машиностроение, 2009. – 160 с.
12. Михайлов, А. К. Лопастные насосы. Теория, расчет и конструирование [Текст] / А. К. Михайлов, В. В. Малюшенко ; М. : Машиностроение, 2010. – 288 с.
13. Карелин, В. Я. Насосы и насосные станции [Текст] / В. Я Карелин, А. В. Минаев ; Учебник для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Стройиздат, 2015. — 320 с, ил.
14. Ломакин А.А. Центробежные и осевые насосы 4-е изд. перераб. и доп. - М.-Л. : Машиностроение, 2015. - 364 с.
15. Зимницкий, В.А. Лопастные насосы. Справочник [Текст] / В. А. Зимницкий, А. В. Каплун, А.Н. Папир, В.А Умов ; Под общ. ред. В.А.Зимницкого и В.А.Умова. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 2015. - 334 с: ил.
16. Михайлов, А.К. Конструкции и расчет центробежных насосов высокого давления [Текст] / А.К. Михайлов, В.В. Малюшенко ; М. : Машиностроение, 2008. — 304 с.
17. Степанов А.И. Центробежные и осевые насосы М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 2010. - 468 с.
18. Анхимюк, В.Л., Опейко О.Ф. Проектирование систем автоматического управления электроприводами [Текст] / В. Л. Анхимюк, О.Ф. Опейко ; М. : Высшая школа, 2011. – с.124-128.
19. Кацман, М.М., Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических систем: Учебник для техникумов [Текст] / М.М. Кацман, Ф.М. Юферов ; Под ред. Ф.М. Юферова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 2014. – с. 261.

20. ГОСТ 7.82-2001. Библиографическая запись. Библиографическое описание электронных ресурсов. Общие требования и правила составления [Текст]. – Минск: ИПК Изда-во стандартов, 2010. – 23 с.
21. Стечкин, Б.С. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя [Текст] / Б.С. Стечкин, К.И. Генкин, В.С. Золотаревский. – М. : 2016. – 200 с.
22. ГОСТ Р 54806-2011 (ИСО 9905:1994) Насосы центробежные. Технические требования. Класс I. – М. : Стандартиформ, 2012. – 153 с.
23. Коваленко, О.Л. Электронные системы автомобилей: учебное пособие / О.Л. Коваленко; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. - Архангельск: ИПЦ САФУ, 2013. - 80 с.: ил
24. Крамарухин, Ю. Е. Приборы для измерения температуры. [Текст] / Е.Ю. Крамарухин ; М. : Машиностроение, 2010. – с.59
25. Шатров, М.Г. Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие / М.Г. Шатров, А.Л. Яковенко, Т.Ю. Кричевская. – М. : МАДИ, 2014. – 68 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при  $n = 840 \text{ мин}^{-1}$

$\varphi'1$	$\varphi'1$ рад	X1-2	$\Delta X1-2$	k1-2	$\sigma$	$\psi(\varphi'1)$	$\psi(\varphi'2)$	T1-2	T1	T2	p1	K1-2	p2
343	0	0	0		0,055834	1,279172	1,247627		732,2848	741,5807	1,835561	#ДЕЛ/0!	1,835561
344	1	0,000413	0,000827	1,368187	0,049525	1,247627	1,217917	702,3562	741,5807	760,3361	1,9059	6,432025	1,9059
345	2	0,001953	0,003905	1,372188	0,043583	1,217917	1,190055	677,1548	760,3361	792,5339	2,002011	6,373632	2,002011
346	3	0,004179	0,008359	1,370369	0,038011	1,190055	1,164055	687,6413	792,5339	840,8597	2,136309	6,400023	2,136309
347	4	0,006874	0,013749	1,368182	0,032811	1,164055	1,139929	700,6804	840,8597	906,9527	2,318494	6,432093	2,318494
348	5	0,009889	0,019778	1,365532	0,027986	1,139929	1,11769	717,2295	906,9527	991,4602	2,555819	6,471474	2,555819
349	6	0,013089	0,026178	1,362363	0,023538	1,11769	1,097348	738,194	991,4602	1094,055	2,852862	6,519325	2,852862
350	7	0,016339	0,032677	1,358666	0,01947	1,097348	1,078913	764,404	1094,055	1213,479	3,211186	6,576215	3,211186
351	8	0,019505	0,039009	1,354481	0,015783	1,078913	1,062394	796,5889	1213,479	1347,642	3,629104	6,64205	3,629104
352	9	0,022456	0,044912	1,34989	0,012479	1,062394	1,0478	835,355	1347,642	1493,772	4,101638	6,716078	4,101638
353	10	0,02507	0,05014	1,345008	0,00956	1,0478	1,035137	881,1667	1493,772	1648,598	4,620705	6,79697	4,620705
354	11	0,027241	0,054481	1,339964	0,007027	1,035137	1,024412	934,3324	1648,598	1808,566	5,175526	6,882974	5,175526
355	12	0,02888	0,057761	1,33489	0,004882	1,024412	1,015629	994,9963	1808,566	1970,036	5,75323	6,972107	5,75323
356	13	0,029929	0,059858	1,329905	0,003126	1,015629	1,008794	1063,134	1970,036	2129,482	6,339573	7,06235	6,339573
357	14	0,030356	0,060711	1,325107	0,001759	1,008794	1,003909	1138,553	2129,482	2283,65	6,919737	7,151815	6,919737
358	15	0,030161	0,060322	1,320571	0,000782	1,003909	1,000977	1220,893	2283,65	2429,686	7,479133	7,238869	7,479133
359	16	0,029375	0,058751	1,316346	0,000195	1,000977	1	1309,635	2429,686	2565,233	8,004154	7,322199	8,004154
360	17	0,028058	0,056117	1,312459	0	1	1,000977	1404,102	2565,233	2688,481	8,482839	7,400836	8,482839
361	18	0,026291	0,052583	1,308921	0,000195	1,000977	1,003909	1503,478	2688,481	2798,187	8,90539	7,47414	8,90539
362	19	0,024172	0,048345	1,305728	0,000782	1,003909	1,008794	1606,811	2798,187	2893,667	9,264523	7,541761	9,264523
363	20	0,021809	0,043618	1,302866	0,001759	1,008794	1,015629	1713,04	2893,667	2974,75	9,555643	7,603584	9,555643
364	21	0,01931	0,03862	1,300315	0,003126	1,015629	1,024412	1821,014	2974,75	3041,724	9,776819	7,65968	9,776819
365	22	0,016778	0,033557	1,298051	0,004882	1,024412	1,035137	1929,515	3041,724	3095,253	9,928605	7,710251	9,928605
366	23	0,014306	0,028612	1,296051	0,007027	1,035137	1,0478	2037,295	3095,253	3136,294	10,01372	7,755586	10,01372
367	24	0,011969	0,023938	1,29429	0,00956	1,0478	1,062394	2143,102	3136,294	3166,01	10,03663	7,79602	10,03663
368	25	0,009824	0,019648	1,292744	0,012479	1,062394	1,078913	2245,719	3166,01	3185,68	10,00307	7,831911	10,00307
369	26	0,00791	0,015821	1,291392	0,015783	1,078913	1,097348	2343,993	3185,68	3196,629	9,919607	7,863613	9,919607

370	27	0,006247	0,012495	1,290214	0,01947	1,097348	1,11769	2436,873	3196,629	3200,157	9,79317	7,891468	9,79317
371	28	0,004838	0,009677	1,289193	0,023538	1,11769	1,139929	2523,432	3200,157	3197,492	9,630693	7,915796	9,630693
372	29	0,003674	0,007348	1,288314	0,027986	1,139929	1,164055	2602,896	3197,492	3189,754	9,438813	7,936888	9,438813
373	30	0,002735	0,00547	1,287562	0,032811	1,164055	1,190055	2674,657	3189,754	3177,93	9,223665	7,955014	9,223665
374	31	0,001995	0,00399	1,286927	0,038011	1,190055	1,217917	2738,288	3177,93	3162,873	8,990754	7,970418	8,990754
375	32	0,001426	0,002852	1,286397	0,043583	1,217917	1,247627	2793,543	3162,873	3145,294	8,74489	7,983324	8,74489
376	33	0,000999	0,001998	1,285962	0,049525	1,247627	1,279172	2840,356	3145,294	3125,78	8,49019	7,993938	8,49019
377	34	0,000685	0,00137	1,285614	0,055834	1,279172	1,312534	2878,83	3125,78	3104,8	8,230113	8,002455	8,230113
378	35	0,00046	0,00092	1,285345	0,062507	1,312534	1,347699	2909,22	3104,8	3082,727	7,96752	8,009054	7,96752
379	36	0,000303	0,000605	1,285148	0,06954	1,347699	1,384649	2931,915	3082,727	3059,849	7,704745	8,013908	7,704745
380	37	0,000195	0,00039	1,285068	0,07693	1,384649	1,423366	2941,395	3059,849	3036,39	7,443665	8,015872	7,443665
381	38	0,000123	0,000245	1,285071	0,084673	1,423366	1,463832	2941,395	3036,39	3012,528	7,185782	8,015798	7,185782
382	39	7,56E-05	0,000151	1,285073	0,092766	1,463832	1,506026	2941,395	3012,528	2988,406	6,932299	8,015749	6,932299
383	40	4,56E-05	9,12E-05	1,285074	0,101205	1,506026	1,549929	2941,395	2988,406	2964,132	6,684161	8,015718	6,684161

Таблица А2 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$

$\varphi'1$	$\varphi'1$ рад	X1-2	$\Delta X1-2$	k1-2	$\sigma$	$\psi(\varphi'1)$	$\psi(\varphi'2)$	T1-2	T1	T2	p1	K1-2	p2
340	0	0	0		0,07693	1,384649	1,347699		710,5902	718,5594	1,643582		1,707594
341	1	0,00013	0,000261	1,369912	0,06954	1,347699	1,312534	691,5088	718,5594	730,061	1,707594	6,406698	1,781482
342	2	0,000693	0,001387	1,37224	0,062507	1,312534	1,279172	677,1548	730,061	747,097	1,781482	6,372884	1,870818
343	3	0,001594	0,003189	1,370475	0,055834	1,279172	1,247627	687,6413	747,097	771,2834	1,870818	6,398473	1,980652
344	4	0,002765	0,00553	1,368351	0,049525	1,247627	1,217917	700,6804	771,2834	803,9006	1,980652	6,4296	2,115515
345	5	0,004161	0,008322	1,365768	0,043583	1,217917	1,190055	717,2295	803,9006	845,9088	2,115515	6,467947	2,279322
346	6	0,005744	0,011487	1,362666	0,038011	1,190055	1,164055	738,194	845,9088	897,9389	2,279322	6,514721	2,475214
347	7	0,007473	0,014946	1,359032	0,032811	1,164055	1,139929	764,404	897,9389	960,2831	2,475214	6,57054	2,705386
348	8	0,009309	0,018618	1,354902	0,027986	1,139929	1,11769	796,5889	960,2831	1032,895	2,705386	6,635365	2,97093
349	9	0,011208	0,022416	1,350355	0,023538	1,11769	1,097348	835,355	1032,895	1115,402	2,97093	6,708503	3,271731
350	10	0,013124	0,026248	1,345501	0,01947	1,097348	1,078913	881,1667	1115,402	1207,134	3,271731	6,788688	3,606408
351	11	0,01501	0,03002	1,34047	0,015783	1,078913	1,062394	934,3324	1207,134	1307,154	3,606408	6,874234	3,972299
352	12	0,016819	0,033637	1,335389	0,012479	1,062394	1,0478	994,9963	1307,154	1414,303	3,972299	6,963216	4,365513
353	13	0,018502	0,037004	1,330379	0,00956	1,0478	1,035137	1063,134	1414,303	1527,244	4,365513	7,053662	4,781013
354	14	0,020016	0,040032	1,325536	0,007027	1,035137	1,024412	1138,553	1527,244	1644,504	4,781013	7,143712	5,212756
355	15	0,02132	0,042641	1,320938	0,004882	1,024412	1,015629	1220,893	1644,504	1764,522	5,212756	7,231735	5,653871
356	16	0,02238	0,044759	1,316636	0,003126	1,015629	1,008794	1309,635	1764,522	1885,692	5,653871	7,316396	6,096875
357	17	0,023166	0,046333	1,312663	0,001759	1,008794	1,003909	1404,102	1885,692	2006,411	6,096875	7,396673	6,533932
358	18	0,023661	0,047322	1,309031	0,000782	1,003909	1,000977	1503,478	2006,411	2125,115	6,533932	7,471848	6,95713
359	19	0,023853	0,047706	1,305741	0,000195	1,000977	1	1606,811	2125,115	2240,326	6,95713	7,541476	7,35877
360	20	0,023742	0,047484	1,302785	0	1	1,000977	1713,04	2240,326	2350,685	7,35877	7,60534	7,731659
361	21	0,023337	0,046675	1,300147	0,000195	1,000977	1,003909	1821,014	2350,685	2454,984	7,731659	7,663403	8,069375
362	22	0,022657	0,045313	1,297806	0,000782	1,003909	1,008794	1929,515	2454,984	2552,194	8,069375	7,715773	8,366495
363	23	0,021727	0,043453	1,295742	0,001759	1,008794	1,015629	2037,295	2552,194	2641,485	8,366495	7,762655	8,618777
364	24	0,020581	0,041162	1,293931	0,003126	1,015629	1,024412	2143,102	2641,485	2722,233	8,618777	7,804327	8,823272
365	25	0,019258	0,038516	1,29235	0,004882	1,024412	1,035137	2245,719	2722,233	2794,03	8,823272	7,841111	8,978374
366	26	0,017801	0,035602	1,290979	0,007027	1,035137	1,0478	2343,993	2794,03	2856,675	8,978374	7,873352	9,0838
367	27	0,016252	0,032505	1,289796	0,00956	1,0478	1,062394	2436,873	2856,675	2910,166	9,0838	7,901403	9,140505
368	28	0,014656	0,029313	1,288783	0,012479	1,062394	1,078913	2523,432	2910,166	2954,681	9,140505	7,925615	9,150545
369	29	0,013053	0,026107	1,287922	0,015783	1,078913	1,097348	2602,896	2954,681	2990,556	9,150545	7,946327	9,116904
370	30	0,011481	0,022962	1,287197	0,01947	1,097348	1,11769	2674,657	2990,556	3018,258	9,116904	7,963862	9,043286

371	31	0,009971	0,019942	1,286594	0,023538	1,11769	1,139929	2738,288	3018,258	3038,357	9,043286	7,978523	8,933913
372	32	0,00855	0,0171	1,286099	0,027986	1,139929	1,164055	2793,543	3038,357	3051,499	8,933913	7,990589	8,793309
373	33	0,007237	0,014475	1,285701	0,032811	1,164055	1,190055	2840,356	3051,499	3058,374	8,793309	8,00032	8,62611
374	34	0,006047	0,012094	1,28539	0,038011	1,190055	1,217917	2878,83	3058,374	3059,691	8,62611	8,007953	8,436898
375	35	0,004987	0,009973	1,285156	0,043583	1,217917	1,247627	2909,22	3059,691	3056,157	8,436898	8,013704	8,230066
376	36	0,004058	0,008115	1,284991	0,049525	1,247627	1,279172	2931,915	3056,157	3048,452	8,230066	8,017771	8,009705
377	37	0,003258	0,006516	1,284887	0,055834	1,279172	1,312534	2947,413	3048,452	3037,221	8,009705	8,020336	7,779542
378	38	0,00258	0,00516	1,284837	0,062507	1,312534	1,347699	2956,291	3037,221	3023,054	7,779542	8,021564	7,542887
379	39	0,002016	0,004031	1,284835	0,06954	1,347699	1,384649	2959,185	3023,054	3006,488	7,542887	8,021608	7,302627
380	40	0,001553	0,003106	1,284876	0,07693	1,384649	1,423366	2956,761	3006,488	2987,995	7,302627	8,020607	7,06122
381	41	0,00118	0,002359	1,284953	0,084673	1,423366	1,463832	2949,691	2987,995	2967,986	7,06122	8,018691	6,820723
382	42	0,000883	0,001767	1,285064	0,092766	1,463832	1,506026	2938,631	2967,986	2946,814	6,820723	8,015977	6,582822
383	43	0,000652	0,001304	1,285202	0,101205	1,506026	1,549929	2924,21	2946,814	2924,775	6,582822	8,012572	6,348866
384	44	0,000474	0,000949	1,285365	0,109986	1,549929	1,595519	2907,008	2924,775	2902,115	6,348866	8,008576	6,119913
385	45	0,00034	0,00068	1,285548	0,119104	1,595519	1,642774	2887,555	2902,115	2879,035	6,119913	8,004075	5,896767
386	46	0,00024	0,00048	1,285749	0,128555	1,642774	1,691671	2866,323	2879,035	2855,699	5,896767	7,99915	5,68002
387	47	0,000167	0,000334	1,285965	0,138334	1,691671	1,742187	2843,72	2855,699	2832,238	5,68002	7,993869	5,470086
388	48	0,000114	0,000229	1,286193	0,148437	1,742187	1,794297	2820,1	2832,238	2808,756	5,470086	7,988295	5,267235
389	49	7,72E-05	0,000154	1,286431	0,158859	1,794297	1,847978	2795,756	2808,756	2785,335	5,267235	7,982479	5,071619

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

$\varphi'1$	$\varphi'1$ рад	X1-2	$\Delta X1-2$	k1-2	$\sigma$	$\psi(\varphi'1)$	$\psi(\varphi'2)$	T1-2	T1	T2	p1	K1-2	p2
335	0	0	0		0,07693	1,384649	1,347699		674,6577	682,251	1,318501		1,372563
336	1	3,83E-05	7,66E-05	1,372874	0,06954	1,347699	1,312534	673,5426	682,251	691,1446	1,372563	6,363743	1,431008
337	2	0,00023	0,00046	1,372259	0,062507	1,312534	1,279172	677,1548	691,1446	702,2881	1,431008	6,37261	1,496055
338	3	0,00057	0,00114	1,370517	0,055834	1,279172	1,247627	687,6413	702,2881	716,5237	1,496055	6,397859	1,569903
339	4	0,001041	0,002082	1,368422	0,049525	1,247627	1,217917	700,6804	716,5237	734,5974	1,569903	6,428555	1,65473
340	5	0,001633	0,003267	1,365872	0,043583	1,217917	1,190055	717,2295	734,5974	757,1589	1,65473	6,466392	1,752665
341	6	0,002337	0,004674	1,362806	0,038011	1,190055	1,164055	738,194	757,1589	784,7555	1,752665	6,512588	1,86573
342	7	0,003143	0,006285	1,35921	0,032811	1,164055	1,139929	764,404	784,7555	817,8247	1,86573	6,567772	1,995788
343	8	0,004041	0,008081	1,355119	0,027986	1,139929	1,11769	796,5889	817,8247	856,6894	1,995788	6,631917	2,144472
344	9	0,00502	0,01004	1,35061	0,023538	1,11769	1,097348	835,355	856,6894	901,5572	2,144472	6,704343	2,313134
345	10	0,006068	0,012136	1,345793	0,01947	1,097348	1,078913	881,1667	901,5572	952,5222	2,313134	6,783808	2,502785
346	11	0,007172	0,014343	1,340794	0,015783	1,078913	1,062394	934,3324	952,5222	1009,57	2,502785	6,868646	2,714051
347	12	0,008316	0,016632	1,335741	0,012479	1,062394	1,0478	994,9963	1009,57	1072,584	2,714051	6,956965	2,947122
348	13	0,009485	0,018969	1,330752	0,00956	1,0478	1,035137	1063,134	1072,584	1141,348	2,947122	7,046823	3,201711
349	14	0,01066	0,021321	1,325924	0,007027	1,035137	1,024412	1138,553	1141,348	1215,556	3,201711	7,136398	3,477021
350	15	0,011826	0,023651	1,321332	0,004882	1,024412	1,015629	1220,893	1215,556	1294,812	3,477021	7,224092	3,771705
351	16	0,012961	0,025923	1,317028	0,003126	1,015629	1,008794	1309,635	1294,812	1378,636	3,771705	7,308601	4,083854
352	17	0,014049	0,028098	1,313042	0,001759	1,008794	1,003909	1404,102	1378,636	1466,473	4,083854	7,388927	4,410988
353	18	0,01507	0,03014	1,309388	0,000782	1,003909	1,000977	1503,478	1466,473	1557,694	4,410988	7,464372	4,750069
354	19	0,016007	0,032013	1,306068	0,000195	1,000977	1	1606,811	1557,694	1651,607	4,750069	7,534495	5,097538
355	20	0,016842	0,033683	1,303073	0	1	1,000977	1713,04	1651,607	1747,467	5,097538	7,599076	5,449379
356	21	0,01756	0,03512	1,300388	0,000195	1,000977	1,003909	1821,014	1747,467	1844,484	5,449379	7,658063	5,801202
357	22	0,018149	0,036297	1,297994	0,000782	1,003909	1,008794	1929,515	1844,484	1941,844	5,801202	7,711537	6,14835
358	23	0,018596	0,037193	1,295872	0,001759	1,008794	1,015629	2037,295	1941,844	2038,717	6,14835	7,759671	6,486031
359	24	0,018896	0,037791	1,294001	0,003126	1,015629	1,024412	2143,102	2038,717	2134,275	6,486031	7,8027	6,809458
360	25	0,019041	0,038081	1,292359	0,004882	1,024412	1,035137	2245,719	2134,275	2227,709	6,809458	7,840899	7,113994
361	26	0,01903	0,03806	1,290928	0,007027	1,035137	1,0478	2343,993	2227,709	2318,244	7,113994	7,874564	7,395303
362	27	0,018865	0,03773	1,289687	0,00956	1,0478	1,062394	2436,873	2318,244	2405,156	7,395303	7,904002	7,649485
363	28	0,018551	0,037101	1,28862	0,012479	1,062394	1,078913	2523,432	2405,156	2487,784	7,649485	7,929517	7,873195
364	29	0,018094	0,036188	1,287711	0,015783	1,078913	1,097348	2602,896	2487,784	2565,541	7,873195	7,95141	8,06374
365	30	0,017506	0,035013	1,286945	0,01947	1,097348	1,11769	2674,657	2565,541	2637,927	8,06374	7,969971	8,219151

366	31	0,016801	0,033602	1,286308	0,023538	1,11769	1,139929	2738,288	2637,927	2704,537	8,219151	7,985478	8,338211
367	32	0,015993	0,031986	1,285788	0,027986	1,139929	1,164055	2793,543	2704,537	2765,06	8,338211	7,998197	8,420472
368	33	0,0151	0,0302	1,285373	0,032811	1,164055	1,190055	2840,356	2765,06	2819,287	8,420472	8,00838	8,46622
369	34	0,01414	0,02828	1,285052	0,038011	1,190055	1,217917	2878,83	2819,287	2867,107	8,46622	8,016267	8,476428
370	35	0,013131	0,026262	1,284816	0,043583	1,217917	1,247627	2909,22	2867,107	2908,505	8,476428	8,022086	8,45268
371	36	0,012093	0,024185	1,284655	0,049525	1,247627	1,279172	2931,915	2908,505	2943,556	8,45268	8,02605	8,397079
372	37	0,011043	0,022085	1,284561	0,055834	1,279172	1,312534	2947,413	2943,556	2972,416	8,397079	8,028363	8,312148
373	38	0,009998	0,019996	1,284527	0,062507	1,312534	1,347699	2956,291	2972,416	2995,314	8,312148	8,029215	8,200717
374	39	0,008975	0,01795	1,284544	0,06954	1,347699	1,384649	2959,185	2995,314	3012,543	8,200717	8,028786	8,065824
375	40	0,007986	0,015973	1,284607	0,07693	1,384649	1,423366	2956,761	3012,543	3024,446	8,065824	8,027241	7,910609
376	41	0,007044	0,014089	1,284708	0,084673	1,423366	1,463832	2949,691	3024,446	3031,403	7,910609	8,024734	7,738221
377	42	0,006159	0,012317	1,284843	0,092766	1,463832	1,506026	2938,631	3031,403	3033,825	7,738221	8,021407	7,551745
378	43	0,005336	0,010672	1,285006	0,101205	1,506026	1,549929	2924,21	3033,825	3032,136	7,551745	8,017389	7,354129
379	44	0,004581	0,009162	1,285193	0,109986	1,549929	1,595519	2907,008	3032,136	3026,768	7,354129	8,012793	7,148135
380	45	0,003897	0,007794	1,285399	0,119104	1,595519	1,642774	2887,555	3026,768	3018,149	7,148135	8,007723	6,936299
381	46	0,003284	0,006568	1,285622	0,128555	1,642774	1,691671	2866,323	3018,149	3006,694	6,936299	8,002267	6,720909
382	47	0,002742	0,005484	1,285857	0,138334	1,691671	1,742187	2843,72	3006,694	2992,799	6,720909	7,996502	6,503992
383	48	0,002267	0,004534	1,286103	0,148437	1,742187	1,794297	2820,1	2992,799	2976,838	6,503992	7,990492	6,287308
384	49	0,001857	0,003713	1,286357	0,158859	1,794297	1,847978	2795,756	2976,838	2959,154	6,287308	7,984292	6,072359
385	50	0,001506	0,003011	1,286617	0,169596	1,847978	1,903202	2770,935	2959,154	2940,063	6,072359	7,977946	5,860403
386	51	0,001209	0,002418	1,286883	0,18064	1,903202	1,959943	2745,834	2940,063	2919,846	5,860403	7,97149	5,652468
387	52	0,000961	0,001922	1,287152	0,191989	1,959943	2,018175	2720,614	2919,846	2898,754	5,652468	7,964952	5,449372
388	53	0,000756	0,001512	1,287424	0,203635	2,018175	2,077869	2695,403	2898,754	2877,004	5,449372	7,958355	5,251751
389	54	0,000589	0,001178	1,287699	0,215574	2,077869	2,138997	2670,299	2877,004	2854,787	5,251751	7,951716	5,060074
390	55	0,000454	0,000908	1,287975	0,227799	2,138997	2,201531	2645,381	2854,787	2832,262	5,060074	7,945048	4,874671
391	56	0,000346	0,000693	1,288252	0,240306	2,201531	2,26544	2620,707	2832,262	2809,567	4,874671	7,938363	4,695753
392	57	0,000261	0,000523	1,288531	0,253088	2,26544	2,330695	2596,324	2809,567	2786,813	4,695753	7,931668	4,523432
393	58	0,000195	0,00039	1,28881	0,266139	2,330695	2,397265	2572,266	2786,813	2764,095	4,523432	7,924782	4,357735
394	59	0,000144	0,000288	1,289089	0,279453	2,397265	1,347699	2548,559	2764,095	2741,498	4,357735	7,918135	4,198643

Таблица А4 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при  $n = 5800 \text{ мин}^{-1}$ 

$\varphi'1$	$\varphi'1$ рад	X1-2	$\Delta X1-2$	k1-2	$\sigma$	$\psi(\varphi'1)$	$\psi(\varphi'2)$	T1-2	T1	T2	p1	K1-2	p2
332	0	0	0		0,148437	1,742187	1,691671		652,1511	659,4555	1,128895		1,175628
333	1	1,05702E-05	2,11404E-05	1,37481	0,138334	1,691671	1,642774	662,2893	659,4555	667,1681	1,175628	6,336037	1,224785
334	2	7,11053E-05	0,000142211	1,372265	0,128555	1,642774	1,595519	677,1548	667,1681	675,6646	1,224785	6,372515	1,277136
335	3	0,000188396	0,000376792	1,370533	0,119104	1,595519	1,549929	687,6413	675,6646	685,2813	1,277136	6,39763	1,333451
336	4	0,000360728	0,000721456	1,36845	0,109986	1,549929	1,506026	700,6804	685,2813	696,3351	1,333451	6,428142	1,394526
337	5	0,000586846	0,001173691	1,365915	0,101205	1,506026	1,463832	717,2295	696,3351	709,1209	1,394526	6,465748	1,461174
338	6	0,000865543	0,001731087	1,362867	0,092766	1,463832	1,423366	738,194	709,1209	723,9081	1,461174	6,511668	1,53421
339	7	0,0011955	0,002390999	1,35929	0,084673	1,423366	1,384649	764,404	723,9081	740,9378	1,53421	6,566529	1,614437
340	8	0,001575176	0,003150352	1,355221	0,07693	1,384649	1,347699	796,5889	740,9378	760,4212	1,614437	6,630304	1,702625
341	9	0,002002742	0,004005484	1,350735	0,06954	1,347699	1,312534	835,355	760,4212	782,5392	1,702625	6,702318	1,799499
342	10	0,002476018	0,004952035	1,345941	0,062507	1,312534	1,279172	881,1667	782,5392	807,4432	1,799499	6,781326	1,905722
343	11	0,002992426	0,005984851	1,340967	0,055834	1,279172	1,247627	934,3324	807,4432	835,2561	1,905722	6,865671	2,021877
344	12	0,003548954	0,007097908	1,335939	0,049525	1,247627	1,217917	994,9963	835,2561	866,074	2,021877	6,953465	2,148455
345	13	0,004142129	0,008284258	1,330974	0,043583	1,217917	1,190055	1063,134	866,074	899,9668	2,148455	7,042779	2,28583
346	14	0,004767998	0,009535997	1,326168	0,038011	1,190055	1,164055	1138,553	899,9668	936,9784	2,28583	7,1318	2,434245
347	15	0,005422122	0,010844243	1,321598	0,032811	1,164055	1,139929	1220,893	936,9784	977,1262	2,434245	7,218948	2,593783
348	16	0,006099576	0,012199151	1,317313	0,027986	1,139929	1,11769	1309,635	977,1262	1020,4	2,593783	7,302933	2,764346
349	17	0,00679497	0,01358994	1,313343	0,023538	1,11769	1,097348	1404,102	1020,4	1066,76	2,764346	7,382779	2,945635
350	18	0,007502474	0,015004949	1,309703	0,01947	1,097348	1,078913	1503,478	1066,76	1116,137	2,945635	7,457801	3,137122
351	19	0,00821586	0,01643172	1,306392	0,015783	1,078913	1,062394	1606,811	1116,137	1168,427	3,137122	7,527579	3,338038
352	20	0,008928551	0,017857102	1,303402	0,012479	1,062394	1,0478	1713,04	1168,427	1223,496	3,338038	7,591907	3,547359
353	21	0,009633691	0,019267383	1,300718	0,00956	1,0478	1,035137	1821,014	1223,496	1281,174	3,547359	7,65075	3,763801
354	22	0,010324223	0,020648446	1,298321	0,007027	1,035137	1,024412	1929,515	1281,174	1341,256	3,763801	7,704199	3,985828
355	23	0,010992974	0,021985947	1,296189	0,004882	1,024412	1,015629	2037,295	1341,256	1403,507	3,985828	7,752434	4,21166
356	24	0,011632754	0,023265509	1,294304	0,003126	1,015629	1,008794	2143,102	1403,507	1467,657	4,21166	7,795696	4,439307
357	25	0,012236469	0,024472939	1,292643	0,001759	1,008794	1,003909	2245,719	1467,657	1533,408	4,439307	7,834261	4,666597
358	26	0,012797226	0,025594452	1,291188	0,000782	1,003909	1,000977	2343,993	1533,408	1600,436	4,666597	7,868421	4,891223
359	27	0,013308454	0,026616908	1,289919	0,000195	1,000977	1	2436,873	1600,436	1668,393	4,891223	7,898477	5,110795
360	28	0,013764021	0,027528042	1,28882	0	1	1,000977	2523,432	1668,393	1736,913	5,110795	7,924721	5,322899
361	29	0,01415835	0,028316699	1,287876	0,000195	1,000977	1,003909	2602,896	1736,913	1805,617	5,322899	7,947441	5,525158
362	30	0,01448653	0,02897306	1,287071	0,000782	1,003909	1,008794	2674,657	1805,617	1874,117	5,525158	7,966908	5,715293

363	31	0,014744419	0,029488839	1,286394	0,001759	1,008794	1,015629	2738,288	1874,117	1942,021	5,715293	7,983383	5,891181
364	32	0,014928737	0,029857474	1,285832	0,003126	1,015629	1,024412	2793,543	1942,021	2008,941	5,891181	7,997108	6,050914
365	33	0,015037139	0,030074279	1,285375	0,004882	1,024412	1,035137	2840,356	2008,941	2074,494	6,050914	8,008316	6,192835
366	34	0,015068282	0,030136564	1,285013	0,007027	1,035137	1,0478	2878,83	2074,494	2138,313	6,192835	8,017223	6,315584
367	35	0,01502186	0,030043719	1,284737	0,00956	1,0478	1,062394	2909,22	2138,313	2200,048	6,315584	8,024035	6,418119
368	36	0,014898625	0,029797251	1,284538	0,012479	1,062394	1,078913	2931,915	2200,048	2259,369	6,418119	8,028946	6,49973
369	37	0,014700389	0,029400777	1,284408	0,015783	1,078913	1,097348	2947,413	2259,369	2315,978	6,49973	8,032141	6,560044
370	38	0,014429988	0,028859976	1,284342	0,01947	1,097348	1,11769	2956,291	2315,978	2369,602	6,560044	8,033795	6,599014
371	39	0,014091242	0,028182484	1,28433	0,023538	1,11769	1,139929	2959,185	2369,602	2420,005	6,599014	8,034072	6,616907
372	40	0,013688878	0,027377755	1,284368	0,027986	1,139929	1,164055	2956,761	2420,005	2466,985	6,616907	8,033131	6,614275
373	41	0,013228436	0,026456871	1,28445	0,032811	1,164055	1,190055	2949,691	2466,985	2510,378	6,614275	8,031117	6,591927
374	42	0,012716161	0,025432323	1,284569	0,038011	1,190055	1,217917	2938,631	2510,378	2550,059	6,591927	8,02817	6,550894
375	43	0,012158876	0,024317751	1,284721	0,043583	1,217917	1,247627	2924,21	2550,059	2585,941	6,550894	8,024417	6,492388
376	44	0,011563837	0,023127673	1,284901	0,049525	1,247627	1,279172	2907,008	2585,941	2617,976	6,492388	8,019977	6,417766
377	45	0,010938592	0,021877184	1,285105	0,055834	1,279172	1,312534	2887,555	2617,976	2646,154	6,417766	8,014957	6,328492
378	46	0,010290826	0,020581652	1,285329	0,062507	1,312534	1,347699	2866,323	2646,154	2670,499	6,328492	8,009453	6,2261
379	47	0,00962821	0,01925642	1,285569	0,06954	1,347699	1,384649	2843,72	2670,499	2691,072	6,2261	8,003553	6,112156
380	48	0,008958255	0,01791651	1,285823	0,07693	1,384649	1,423366	2820,1	2691,072	2707,965	6,112156	7,997331	5,988234
381	49	0,008288173	0,016576345	1,286088	0,084673	1,423366	1,463832	2795,756	2707,965	2721,296	5,988234	7,990853	5,855881
382	50	0,007624752	0,015249504	1,286362	0,092766	1,463832	1,506026	2770,935	2721,296	2731,21	5,855881	7,984177	5,716598
383	51	0,006974247	0,013948494	1,286642	0,101205	1,506026	1,549929	2745,834	2731,21	2737,875	5,716598	7,977349	5,57182
384	52	0,006342288	0,012684576	1,286927	0,109986	1,549929	1,595519	2720,614	2737,875	2741,476	5,57182	7,97041	5,4229
385	53	0,005733809	0,011467619	1,287216	0,119104	1,595519	1,642774	2695,403	2741,476	2742,21	5,4229	7,963393	5,271094
386	54	0,005153	0,010305999	1,287508	0,128555	1,642774	1,691671	2670,299	2742,21	2740,287	5,271094	7,956326	5,11756
387	55	0,004603274	0,009206548	1,287802	0,138334	1,691671	1,742187	2645,381	2740,287	2735,925	5,11756	7,949231	4,963346
388	56	0,004087268	0,008174536	1,288096	0,148437	1,742187	1,794297	2620,707	2735,925	2729,341	4,963346	7,942126	4,809389
389	57	0,003606851	0,007213701	1,288391	0,158859	1,794297	1,847978	2596,324	2729,341	2720,756	4,809389	7,935026	4,65652
390	58	0,003163156	0,006326312	1,288686	0,169596	1,847978	1,903202	2572,266	2720,756	2710,386	4,65652	7,927943	4,50546
391	59	0,002756632	0,005513263	1,28898	0,18064	1,903202	1,959943	2548,559	2710,386	2698,447	4,50546	7,920887	4,356835

Таблица А5 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя при  $n = 6100 \text{ мин}^{-1}$

$\varphi'1$	$\varphi'1$ рад	X1-2	$\Delta X1-2$	k1-2	$\sigma$	$\psi(\varphi'1)$	$\psi(\varphi'2)$	T1-2	T1	T2	p1	K1-2	p2
330	0	0	0		0,169596	1,847978	1,794297		643,0149	650,2013	1,011512		1,053417
331	1	3,88E-06	7,77E-06	1,375615	0,158859	1,794297	1,742187	657,7212	650,2013	657,5664	1,053417	6,324607	1,097217
332	2	2,94E-05	5,88E-05	1,372267	0,148437	1,742187	1,691671	677,1548	657,5664	665,3154	1,097217	6,37249	1,143304
333	3	8,37E-05	0,000167	1,370537	0,138334	1,691671	1,642774	687,6413	665,3154	673,6226	1,143304	6,397568	1,19205
334	4	0,000168	0,000337	1,368458	0,128555	1,642774	1,595519	700,6804	673,6226	682,6617	1,19205	6,428026	1,243853
335	5	0,000284	0,000569	1,365928	0,119104	1,595519	1,549929	717,2295	682,6617	692,6018	1,243853	6,465563	1,299132
336	6	0,000433	0,000865	1,362884	0,109986	1,549929	1,506026	738,194	692,6018	703,6051	1,299132	6,511397	1,358316
337	7	0,000613	0,001226	1,359314	0,101205	1,506026	1,463832	764,404	703,6051	715,8244	1,358316	6,566157	1,421841
338	8	0,000826	0,001653	1,355251	0,092766	1,463832	1,423366	796,5889	715,8244	729,4022	1,421841	6,629815	1,490143
339	9	0,001072	0,002145	1,350773	0,084673	1,423366	1,384649	835,355	729,4022	744,4702	1,490143	6,701693	1,563645
340	10	0,001351	0,002701	1,345988	0,07693	1,384649	1,347699	881,1667	744,4702	761,1492	1,563645	6,780549	1,642758
341	11	0,001661	0,003323	1,341022	0,06954	1,347699	1,312534	934,3324	761,1492	779,5503	1,642758	6,864724	1,727868
342	12	0,002003	0,004006	1,336003	0,062507	1,312534	1,279172	994,9963	779,5503	799,7742	1,727868	6,952332	1,819331
343	13	0,002376	0,004751	1,331047	0,055834	1,279172	1,247627	1063,134	799,7742	821,9124	1,819331	7,041443	1,917462
344	14	0,002778	0,005555	1,326251	0,049525	1,247627	1,217917	1138,553	821,9124	846,0464	1,917462	7,130249	2,022525
345	15	0,003207	0,006414	1,32169	0,043583	1,217917	1,190055	1220,893	846,0464	872,2474	2,022525	7,217171	2,134718
346	16	0,003663	0,007326	1,317414	0,038011	1,190055	1,164055	1309,635	872,2474	900,5749	2,134718	7,300924	2,254163
347	17	0,004143	0,008286	1,313453	0,032811	1,164055	1,139929	1404,102	900,5749	931,0756	2,254163	7,380533	2,380885
348	18	0,004644	0,009289	1,309822	0,027986	1,139929	1,11769	1503,478	931,0756	963,7818	2,380885	7,455323	2,5148
349	19	0,005165	0,01033	1,306519	0,023538	1,11769	1,097348	1606,811	963,7818	998,7099	2,5148	7,524874	2,655698
350	20	0,005702	0,011403	1,303537	0,01947	1,097348	1,078913	1713,04	998,7099	1035,859	2,655698	7,588988	2,803232
351	21	0,006251	0,012502	1,300859	0,015783	1,078913	1,062394	1821,014	1035,859	1075,208	2,803232	7,647634	2,956903
352	22	0,00681	0,013619	1,298467	0,012479	1,062394	1,0478	1929,515	1075,208	1116,717	2,956903	7,700908	3,116053
353	23	0,007374	0,014747	1,29634	0,00956	1,0478	1,035137	2037,295	1116,717	1160,325	3,116053	7,748995	3,279864
354	24	0,007939	0,015878	1,294458	0,007027	1,035137	1,024412	2143,102	1160,325	1205,948	3,279864	7,792139	3,447358

355	25	0,008501	0,017002	1,292799	0,004882	1,024412	1,015629	2245,719	1205,948	1253,48	3,447358	7,830622	3,617405
356	26	0,009056	0,018112	1,291344	0,003126	1,015629	1,008794	2343,993	1253,48	1302,795	3,617405	7,86474	3,788735
357	27	0,009599	0,019198	1,290074	0,001759	1,008794	1,003909	2436,873	1302,795	1353,742	3,788735	7,894793	3,959963
358	28	0,010125	0,02025	1,288972	0,000782	1,003909	1,000977	2523,432	1353,742	1406,154	3,959963	7,921079	4,129609
359	29	0,01063	0,02126	1,288023	0,000195	1,000977	1	2602,896	1406,154	1459,841	4,129609	7,943886	4,29613
360	30	0,011109	0,022217	1,287213	0	1	1,000977	2674,657	1459,841	1514,596	4,29613	7,963485	4,457955
361	31	0,011557	0,023113	1,286527	0,000195	1,000977	1,003909	2738,288	1514,596	1570,198	4,457955	7,980136	4,61352
362	32	0,01197	0,023939	1,285956	0,000782	1,003909	1,008794	2793,543	1570,198	1626,412	4,61352	7,994083	4,761306
363	33	0,012343	0,024687	1,285488	0,001759	1,008794	1,015629	2840,356	1626,412	1682,991	4,761306	8,005552	4,899872
364	34	0,012674	0,025348	1,285113	0,003126	1,015629	1,024412	2878,83	1682,991	1739,68	4,899872	8,01476	5,027892
365	35	0,012958	0,025916	1,284823	0,004882	1,024412	1,035137	2909,22	1739,68	1796,22	5,027892	8,021908	5,144179
366	36	0,013192	0,026385	1,284609	0,007027	1,035137	1,0478	2931,915	1796,22	1852,349	5,144179	8,027185	5,247714
367	37	0,013374	0,026748	1,284464	0,00956	1,0478	1,062394	2947,413	1852,349	1907,803	5,247714	8,030771	5,337661
368	38	0,013501	0,027002	1,28438	0,012479	1,062394	1,078913	2956,291	1907,803	1962,325	5,337661	8,032834	5,413379
369	39	0,013572	0,027144	1,284352	0,015783	1,078913	1,097348	2959,185	1962,325	2015,66	5,413379	8,033536	5,474429
370	40	0,013586	0,027172	1,284373	0,01947	1,097348	1,11769	2956,761	2015,66	2067,566	5,474429	8,033024	5,520575
371	41	0,013543	0,027085	1,284437	0,023538	1,11769	1,139929	2949,691	2067,566	2117,808	5,520575	8,031442	5,551773
372	42	0,013442	0,026884	1,284539	0,027986	1,139929	1,164055	2938,631	2117,808	2166,169	5,551773	8,028919	5,568167
373	43	0,013286	0,026571	1,284674	0,032811	1,164055	1,190055	2924,21	2166,169	2212,446	5,568167	8,025579	5,57007
374	44	0,013075	0,026149	1,284838	0,038011	1,190055	1,217917	2907,008	2212,446	2256,453	5,57007	8,021533	5,557949
375	45	0,012812	0,025623	1,285027	0,043583	1,217917	1,247627	2887,555	2256,453	2298,025	5,557949	8,016883	5,532406
376	46	0,0125	0,024999	1,285237	0,049525	1,247627	1,279172	2866,323	2298,025	2337,02	5,532406	8,011721	5,494155
377	47	0,012142	0,024283	1,285464	0,055834	1,279172	1,312534	2843,72	2337,02	2373,315	5,494155	8,00613	5,444006
378	48	0,011742	0,023484	1,285707	0,062507	1,312534	1,347699	2820,1	2373,315	2406,813	5,444006	8,00018	5,38284
379	49	0,011305	0,02261	1,285962	0,06954	1,347699	1,384649	2795,756	2406,813	2437,44	5,38284	7,993935	5,311592
380	50	0,010835	0,021671	1,286227	0,07693	1,384649	1,423366	2770,935	2437,44	2465,146	5,311592	7,98745	5,231232
381	51	0,010338	0,020676	1,286501	0,084673	1,423366	1,463832	2745,834	2465,146	2489,904	5,231232	7,980771	5,142746

382	52	0,009818	0,019636	1,286782	0,092766	1,463832	1,506026	2720,614	2489,904	2511,713	5,142746	7,973939	5,047125
383	53	0,009281	0,018562	1,287068	0,101205	1,506026	1,549929	2695,403	2511,713	2530,593	5,047125	7,966988	4,945346
384	54	0,008732	0,017465	1,287359	0,109986	1,549929	1,595519	2670,299	2530,593	2546,585	4,945346	7,959945	4,838364
385	55	0,008177	0,016354	1,287652	0,119104	1,595519	1,642774	2645,381	2546,585	2559,752	4,838364	7,952837	4,727101
386	56	0,00762	0,015241	1,287949	0,128555	1,642774	1,691671	2620,707	2559,752	2570,175	4,727101	7,945684	4,612436
387	57	0,007067	0,014134	1,288247	0,138334	1,691671	1,742187	2596,324	2570,175	2577,952	4,612436	7,938503	4,495201
388	58	0,006521	0,013043	1,288546	0,148437	1,742187	1,794297	2572,266	2577,952	2583,196	4,495201	7,931311	4,376175
389	59	0,005988	0,011976	1,288845	0,158859	1,794297	1,847978	2548,559	2583,196	2586,032	4,376175	7,924121	4,256076

## Приложение Б

### Таблица Б1 - Кинематические характеристики двигателя ВАЗ 21127

φ	Sx	Sp1	Sp2	Vx	Vx1	Vx2	j	jp1	jp2
0	0	0	0	0	0	0	17849	13945	3904
10	0,7338	0,574	0,1596	5,086	3,987	1,0993	17402	13733	3669
20	2,8987	2,28	0,619	9,918	7,852	2,0661	16095	13104	2991
30	6,3872	5,064	1,323	14,263	11,479	2,7836	14029	12076	1952
40	11,03	8,844	2,1865	17,923	14,758	3,1654	11360	10682	678
50	16,6081	13,503	3,1055	20,753	17,587	3,1654	8285	8963	-678
60	22,869	18,9	3,969	22,666	19,883	2,7836	5020	6972	-1952
70	29,5446	24,872	4,673	23,64	21,574	2,0661	1778	4769	-2991
80	36,3685	31,236	5,1324	23,709	22,61	1,0993	-1248	2421	-3669
90	43,092	37,8	5,292	22,959	22,959	0	-3904	0	-3904
100	49,4963	44,364	5,1324	21,511	22,61	-1,0993	-6090	-2421	-3669
110	55,4013	50,728	4,673	19,508	21,574	-2,0661	-7760	-4769	-2991
120	60,669	56,7	3,969	17,099	19,883	-2,7836	-8925	-6972	-1952
130	65,2028	62,097	3,1055	14,422	17,587	-3,1654	-9641	-8963	-678
140	68,943	66,756	2,1865	11,592	14,758	-3,1654	-10004	-10682	678
150	71,8588	70,536	1,323	8,696	11,479	-2,7836	-10124	-12076	1952
160	73,9394	73,32	0,619	5,786	7,852	-2,0661	-10113	-13104	2991
170	75,1853	75,026	0,1596	2,887	3,987	-1,0993	-10064	-13733	3669
180	75,6	75,6	0	0	0	0	-10040	-13945	3904
190	75,1853	75,026	0,1596	-2,887	-3,987	1,0993	-10064	-13733	3669
200	73,9394	73,32	0,619	-5,786	-7,852	2,0661	-10113	-13104	2991
210	71,8588	70,536	1,323	-8,696	-11,479	2,7836	-10124	-12076	1952
220	68,943	66,756	2,1865	-11,592	-14,758	3,1654	-10004	-10682	678
230	65,2028	62,097	3,1055	-14,422	-17,587	3,1654	-9641	-8963	-678
240	60,669	56,7	3,969	-17,099	-19,883	2,7836	-8925	-6972	-1952

250	55,4013	50,728	4,673	-19,508	-21,574	2,0661	-7760	-4769	-2991
260	49,4963	44,364	5,1324	-21,511	-22,61	1,0993	-6090	-2421	-3669
270	43,092	37,8	5,292	-22,959	-22,959	0	-3904	0	-3904
280	36,3685	31,236	5,1324	-23,709	-22,61	-1,0993	-1248	2421	-3669
290	29,5446	24,872	4,673	-23,64	-21,574	-2,0661	1778	4769	-2991
300	22,869	18,9	3,969	-22,666	-19,883	-2,7836	5020	6972	-1952
310	16,6081	13,503	3,1055	-20,753	-17,587	-3,1654	8285	8963	-678
320	11,03	8,844	2,1865	-17,923	-14,758	-3,1654	11360	10682	678
330	6,3872	5,064	1,323	-14,263	-11,479	-2,7836	14029	12076	1952
340	2,8987	2,28	0,619	-9,918	-7,852	-2,0661	16095	13104	2991
350	0,7338	0,574	0,1596	-5,086	-3,987	-1,0993	17402	13733	3669
360	0	0	0	0	0	0	17849	13945	3904
370	0,7338	0,574	0,1596	5,086	3,987	1,0993	17402	13733	3669
380	2,8987	2,28	0,619	9,918	7,852	2,0661	16095	13104	2991
390	6,3872	5,064	1,323	14,263	11,479	2,7836	14029	12076	1952
400	11,03	8,844	2,1865	17,923	14,758	3,1654	11360	10682	678
410	16,6081	13,503	3,1055	20,753	17,587	3,1654	8285	8963	-678
420	22,869	18,9	3,969	22,666	19,883	2,7836	5020	6972	-1952
430	29,5446	24,872	4,673	23,64	21,574	2,0661	1778	4769	-2991
440	36,3685	31,236	5,1324	23,709	22,61	1,0993	-1248	2421	-3669
450	43,092	37,8	5,292	22,959	22,959	0	-3904	0	-3904
460	49,4963	44,364	5,1324	21,511	22,61	-1,0993	-6090	-2421	-3669
470	55,4013	50,728	4,673	19,508	21,574	-2,0661	-7760	-4769	-2991
480	60,669	56,7	3,969	17,099	19,883	-2,7836	-8925	-6972	-1952
490	65,2028	62,097	3,1055	14,422	17,587	-3,1654	-9641	-8963	-678
500	68,943	66,756	2,1865	11,592	14,758	-3,1654	-10004	-10682	678
510	71,8588	70,536	1,323	8,696	11,479	-2,7836	-10124	-12076	1952
520	73,9394	73,32	0,619	5,786	7,852	-2,0661	-10113	-13104	2991
530	75,1853	75,026	0,1596	2,887	3,987	-1,0993	-10064	-13733	3669

540	75,6	75,6	0	0	0	0	-10040	-13945	3904
550	75,1853	75,026	0,1596	-2,887	-3,987	1,0993	-10064	-13733	3669
560	73,9394	73,32	0,619	-5,786	-7,852	2,0661	-10113	-13104	2991
570	71,8588	70,536	1,323	-8,696	-11,479	2,7836	-10124	-12076	1952
580	68,943	66,756	2,1865	-11,592	-14,758	3,1654	-10004	-10682	678
590	65,2028	62,097	3,1055	-14,422	-17,587	3,1654	-9641	-8963	-678
600	60,669	56,7	3,969	-17,099	-19,883	2,7836	-8925	-6972	-1952
610	55,4013	50,728	4,673	-19,508	-21,574	2,0661	-7760	-4769	-2991
620	49,4963	44,364	5,1324	-21,511	-22,61	1,0993	-6090	-2421	-3669
630	43,092	37,8	5,292	-22,959	-22,959	0	-3904	0	-3904
640	36,3685	31,236	5,1324	-23,709	-22,61	-1,0993	-1248	2421	-3669
650	29,5446	24,872	4,673	-23,64	-21,574	-2,0661	1778	4769	-2991
660	22,869	18,9	3,969	-22,666	-19,883	-2,7836	5020	6972	-1952
670	16,6081	13,503	3,1055	-20,753	-17,587	-3,1654	8285	8963	-678
680	11,03	8,844	2,1865	-17,923	-14,758	-3,1654	11360	10682	678
690	6,3872	5,064	1,323	-14,263	-11,479	-2,7836	14029	12076	1952
700	2,8987	2,28	0,619	-9,918	-7,852	-2,0661	16095	13104	2991
710	0,7338	0,574	0,1596	-5,086	-3,987	-1,0993	17402	13733	3669
720	0	0	0	0	0	0	17849	13945	3904

## Приложение В

### Таблица В1 – Силы действующие в КШМ

φ	P <sub>r</sub>	P <sub>j</sub>	P <sub>l</sub>	N	K	Z	T	Rш.ш.
0	0,08782	-12,7959	-12,7081	0	-12,7081	-12,7081	0	32,1678
10	-0,05673	-12,4755	-12,5322	-0,61408	-12,5197	-12,2314	-2,76961	31,8119
20	-0,05673	-11,5385	-11,5952	-1,11314	-11,5375	-10,5169	-5,00913	30,3922
30	-0,05673	-10,0566	-10,1134	-1,42599	-10,0132	-8,04014	-6,29052	28,2102
40	-0,05673	-8,14396	-8,2007	-1,49253	-8,07155	-5,32225	-6,41294	25,5983
50	-0,05673	-5,9395	-5,99623	-1,30718	-5,8557	-2,85421	-5,43259	22,9657
60	-0,05673	-3,59883	-3,65556	-0,90658	-3,54909	-1,04183	-3,61901	20,8185
70	-0,05673	-1,27464	-1,33138	-0,35947	-1,28511	-0,11716	-1,37398	19,6250
80	-0,05673	0,89468	0,83795	0,23798	0,80572	-0,08882	0,86644	19,5677
90	-0,05673	2,79877	2,74203	0,79244	2,63404	-0,79245	2,74203	20,437
100	-0,05673	4,36590	4,30917	1,22380	4,14343	-1,95206	4,03338	21,7884
110	-0,05673	5,56312	5,50639	1,49223	5,31505	-3,28181	4,66391	23,2149
120	-0,05673	6,39759	6,34086	1,57253	6,15618	-4,53372	4,70492	24,4504
130	-0,05673	6,91161	6,85488	1,49436	6,69422	-5,55245	4,29115	25,3776
140	-0,05673	7,17184	7,11511	1,29495	7,00306	-6,28265	3,57890	25,9900
150	-0,05673	7,25787	7,20114	1,01536	7,12984	-6,74747	2,72203	26,3482
160	-0,05673	7,24999	7,19325	0,69055	7,15747	-6,99904	1,81270	26,5208
170	-0,05673	7,21486	7,15813	0,35074	7,15097	-7,10802	0,90192	26,5830
180	-0,05673	7,19837	7,14164	0	7,14164	-7,14164	0	26,6014
190	-0,05349	7,21486	7,16136	-0,35091	7,15421	-7,11124	-1,58266	26,6181
200	-0,04353	7,24999	7,20645	-0,69182	7,17060	-7,01188	-3,11319	26,6540
210	-0,02609	7,25787	7,23178	-1,01968	7,16018	-6,77618	-4,49817	26,6187
220	0,00021	7,17184	7,17206	-1,30532	7,05912	-6,33293	-5,60856	26,3954
230	0,03761	6,91161	6,94923	-1,51493	6,78635	-5,62888	-6,296	25,8665
240	0,08952	6,39759	6,48711	-1,60881	6,29817	-4,63829	-6,42225	24,9391
250	0,16114	5,56312	5,72427	-1,54555	5,52536	-3,41167	-5,90745	23,6220

260	0,26052	4,36590	4,62643	-1,31391	4,44849	-2,09578	-4,78373	22,0799
270	0,40031	2,79877	3,19908	-0,92454	3,07309	-0,92454	-3,19909	20,6338
280	0,60093	0,89468	1,49562	-0,42476	1,43810	-0,15854	-1,39991	19,6681
290	0,89630	-1,27464	-0,37834	0,10253	-0,3652	-0,03329	0,32045	19,4956
300	1,34425	-3,59883	-2,25457	0,55913	-2,1889	-0,64255	1,67289	20,1718
310	2,04497	-5,9395	-3,89452	0,84900	-3,80325	-1,85379	2,43797	21,4525
320	3,16846	-8,14396	-4,9755	0,90554	-4,89715	-3,2291	2,50267	22,8264
330	4,96879	-10,0566	-5,08785	0,71738	-5,03748	-4,04484	1,92320	23,5831
340	6,83589	-11,5385	-4,70258	0,45144	-4,67918	-4,26524	1,18504	23,7545
350	12,3129	-12,4755	-0,16252	0,00796	-0,16236	-0,15862	0,02047	19,6183
360	22,8548	-12,7959	10,0589	0	10,0589	10,0589	0	9,40083
370	32,7054	-12,4755	20,2299	0,99126	20,2097	19,7444	4,47082	4,47988
380	33,2273	-11,5385	21,6888	2,08213	21,5809	19,6717	9,36958	9,37198
390	22,0722	-10,0566	12,0156	1,69420	11,8966	9,55243	7,47372	12,4101
400	15,5335	-8,14396	7,38960	1,34490	7,27323	4,79585	5,77867	15,7614
410	11,2304	-5,9395	5,29097	1,15343	5,16696	2,51850	4,79362	17,6064
420	8,41556	-3,59883	4,81673	1,19455	4,67644	1,37277	4,76856	18,7050
430	6,53987	-1,27464	5,26523	1,42161	5,08227	0,46334	5,43372	19,7582
440	5,25851	0,89468	6,15320	1,74750	5,91654	-0,65224	6,36241	21,0943
450	4,36169	2,79877	7,16046	2,06937	6,87844	-2,06937	7,16046	22,6886
460	3,72089	4,36590	8,08680	2,29665	7,77577	-3,66332	7,56925	24,3304
470	3,25574	5,56312	8,81887	2,38991	8,51242	-5,25605	7,46958	25,8198
480	2,91474	6,39759	9,31234	2,30946	9,04110	-6,65832	6,90975	27,0166
490	2,66419	6,91161	9,57580	2,08752	9,35137	-7,75641	5,99445	27,8685
500	2,48168	7,17184	9,65353	1,75694	9,50150	-8,52407	4,85572	28,4019
510	2,35221	7,25787	9,61009	1,35502	9,51494	-9,00466	3,63261	28,6952
520	2,26586	7,24999	9,51585	0,91352	9,46851	-9,25893	2,39799	28,8186
530	2,21636	7,21486	9,43122	0,46213	9,42180	-9,36521	1,18833	28,8494
540	2,20023	7,19837	9,39860	0	9,39860	-9,39861	0	28,8583

550	1,14402	7,21486	8,35889	-0,40959	8,35054	-8,30038	-1,84731	27,8215
560	0,08782	7,24999	7,33781	-0,70443	7,30130	-7,13969	-3,16994	26,7876
570	0,08782	7,25786	7,34570	-1,03574	7,27297	-6,88292	-4,56903	26,7359
580	0,08782	7,17184	7,25967	-1,32126	7,14534	-6,41029	-5,67706	26,4856
590	0,08782	6,91161	6,99944	-1,52588	6,83539	-5,66955	-6,34149	25,9171
600	0,08782	6,39759	6,48542	-1,60839	6,29652	-4,63708	-6,42057	24,9375
610	0,08782	5,56312	5,65095	-1,52576	5,45458	-3,36797	-5,83178	23,5608
620	0,08782	4,36590	4,45373	-1,26486	4,28243	-2,01754	-4,60516	21,9654
630	0,08782	2,79877	2,88659	-0,83423	2,77290	-0,83423	-2,8866	20,4982
640	0,08782	0,89468	0,98251	-0,27903	0,94472	-0,10415	-0,91963	19,5855
650	0,08782	-1,27464	-1,18682	0,32162	-1,14558	-0,10444	1,00523	19,5900
660	0,08782	-3,59883	-3,511	0,87072	-3,40874	-1,00064	2,60516	20,6255
670	0,08782	-5,9395	-5,85168	1,27566	-5,71453	-2,7854	3,66314	22,5447
680	0,08782	-8,14396	-8,05614	1,46621	-7,92927	-5,22843	4,05223	25,0185
690	0,08782	-10,0566	-9,96882	1,40560	-9,87012	-7,92521	3,76821	27,6430
700	0,08782	-11,5385	-11,4506	1,09926	-11,3937	-10,3857	2,88554	29,9846
710	0,08782	-12,4755	-12,3876	0,60699	-12,3753	-12,0903	1,56084	31,5886
720	0,08782	-12,7959	-12,7081	0	-12,7081	-12,7081	0	32,1678