

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ 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 водяного насоса охлаждения для двигателя  
ВАЗ-21179

Студент

К.О. Груненко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

А.Г. Егоров

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

М.И. Фесина

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

С.А. Гудкова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой

к.т.н., Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

«    »      2018 г.

Тольятти 2018

## АННОТАЦИЯ

Тема бакалаврской работы: «Модернизация водяного насоса охлаждения для двигателя ВАЗ-21179».

В двигателях внутреннего сгорания большую роль играет система охлаждения, в том числе и водяной насос, который создает напор для циркуляции жидкости. В работе представлен альтернативный вариант конструкции водяного насоса с использованием электромотора.

В бакалаврской работе за базу был взят двигатель ВАЗ-21179. Работа состоит из пояснительной записки и графической части. В пояснительной записке отражены следующие разделы:

- тепловой расчет и тепловой баланс двигателя, где просчитаны основные параметры двигателя.
- кинематический расчет, отражающий изменение кинематических параметров выбранного двигателя.
- динамический расчет, отражающий силу и нагрузку, воздействующую на кривошипно-шатунный механизм.
- расчет водяного насоса в разделе специальной части, определение его параметров и регулировочных возможностей. Анализ применения новой конструкции на двигателе и оценка его эффективности.
- анализ влияния на безопасность и экологичность новой конструкции.

Графическая часть работы содержит 8 листов формата А1. В них включены чертежи двигателя, нового водяного насоса и представлены характеристики, отражающие результаты расчетов.

## ABSTRACT

The title of the bachelor's work is «Modification of water pump for VAZ-21179 engine».

The cooling system plays an important role in the internal combustion engines including the water pump which creates a head for the circulation of the liquid. An alternative design of a water pump using an electric motor is presented. In the bachelor's work the engine VAZ-21179 was taken for the base.

The main propose of the bachelor's work is to design new water pump with electric engine. The work consists of an explanatory note and a graphic part. The explanatory note contains the following sections:

- thermal calculation and heat balance of the engine where the main engine parameters are calculated;
- kinematic calculation reflecting the change in the kinematic parameters of the selected engine;
- dynamic calculation reflecting the force and load acting on the crank mechanism;
- calculation of the water pump that determines its parameters and adjusting capabilities and analysis of the application of the new design of the engine and evaluation of its effectiveness which are represented in the special section;
- analysis of the impact on the safety and environmental friendliness of the new design is represented in the special section.

Graphical part of the work contains 8 sheets of A1 format, including drawings of the engine, new construction of water pump and presents a characteristic that shows the achieved results of the bachelor's thesis.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 Обзор патентов и иностранных источников по теме электрифицированных водяных насосов.....	9
2 Тепловой расчет двигателя ВАЗ-21179 .....	14
2.1 Исходные данные .....	14
2.2 Параметры рабочего тела .....	15
2.2 Параметры остаточных газов и атмосферы.....	17
2.3 Вычисление процесса наполнения .....	17
2.4 Параметры сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси .....	18
2.5 Термохимический расчет .....	19
2.6 Термодинамический расчет .....	20
2.7 Расчет процесса расширения и выпуска .....	22
2.8 Индикаторные показатели рабочего цикла .....	24
2.9 Эффективные показатели и параметры двигателя .....	25
3 Кинематический расчет .....	27
3.1 Исходные данные .....	27
3.2 Перемещение поршня .....	27
3.3 Скорость поршня.....	28
3.4 Ускорение поршня .....	29
4 Динамический расчет.....	30
4.1 Расчет масс кривошипно-шатунного механизма.....	30
4.2 Удельные и полные силы инерции.....	31
4.3 Суммарные силы, которые действуют в кривошипно-шатунном механизме.....	32
4.4 Расчет крутящих моментов .....	33

4.5 Силы, действующие на шатунные шейки коленчатого вала.....	34
5 Расчет водяного насоса.....	39
5.1 Расход и мощность водяного насоса.....	39
5.2 Подбор электродвигателя.....	43
5.3 Описание конструкции водяного насоса .....	44
5.4 Алгоритм работы электрического водяного насоса .....	44
6 Экологичность и безопасность проекта.....	47
6.1 Описание проектируемой конструкции.....	47
6.2 Выводы по главе экологичность и безопасность проекта .....	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	50
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	51
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Результаты теплового расчета .....	54
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Результаты кинематического расчета.....	68
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Результаты динамического расчета.....	70

## ВВЕДЕНИЕ

Двигатели внутреннего сгорания работают по принципу сжигания паров топлива, поступивших в цилиндр, для совершения полезной работы. Но этому процессу должны сопутствовать еще несколько систем для бесперебойного и долговечного функционирования. Одной из таких систем является система охлаждения.

Система охлаждения бывает воздушной и жидкостной. В современном автомобилестроении применяется жидкостное охлаждение, поскольку оно является более эффективным. Система состоит из радиатора охлаждения, термостата, водяного насоса и патрубков, соединяющих эту систему воедино.

Поскольку область автомобилестроения сейчас борется за безопасность и минимизацию вредных выбросов, то каждую систему необходимо дорабатывать до норм, установленных законодательством, а лучше и опережать их. Система охлаждения не остается в стороне, поскольку климат, в котором эксплуатируются отечественные автомобили, имеет веские перепады температур, что отражается на температуре двигателя и может составлять от -40 до +130 градусов. Поэтому улучшение данной системы – достаточно актуальный вопрос для модернизации режимов эксплуатации и более точной настройки двигателя.

Объектом исследования данного дипломного проекта является автомобильная система охлаждения. Предметом исследования выступает существующий водяной насос для двигателя ВАЗ 21179, на основе которого и будет представлена улучшенная конструкция.

Целью этой модернизации является улучшение режимов работы самого двигателя: минимизация времени прогрева двигателя, независимая работа системы от самого двигателя, улучшенная производительность и т.д.

Исходя из цели, данная работа предполагает решение следующих задач:

1. Рассчитать тепловой баланс двигателя для определения температурных данных, основа которых необходима для проработки новой конструкции.
2. Построить высокоскоростную характеристику, отражающую действующие результаты расчетов и результаты, полученные с применением модернизированного водяного насоса.
3. Определить методом расчетов характеристики новой конструкции насоса (такие как производительность, мощность и т.д.)
4. Модернизация влечет за собой применение электродвигателя, поэтому дополнительной задачей является его подбор для обеспечения функциональности всей системы в полном объеме.
5. Поскольку конструкция представляет собой комбинацию из электрических и механических устройств, необходимо проанализировать и продемонстрировать упрощенный алгоритм работы водяного насоса с электронным блоком управления двигателя.

В конечном итоге модернизированный водяной насос будет обеспечивать улучшенную работу всей системы охлаждения, посредством независимой работы от механической составляющей двигателя и точной настройкой режима работы самого водяного насоса, что позволит предотвратить возможность перегрева двигателя и контролировать точную его температуру для оптимального функционирования.

Тема электрификации водяного насоса уже появлялась среди крупных компаний автомобилестроения, но реальное применение появляется лишь в единичных случаях, для гоночных болидов с повышенными нагрузками. Поэтому для развития данного направления необходимо предложить конструкцию, которая будет адаптирована под серийное производство, не многозатратное и позволит расширить диапазон регулировок и калибровок двигателя.

Структура дипломной работы строится исходя из целей и задач.

В первой главе по исходным данным проводится расчет всего двигателя и его систем.

Во второй главе рассматривается и рассчитывается новая конструкция водяного насоса.

В заключении описаны результаты проведенной работы, делаются выводы по рассматриваемой теме.

# 1 Обзор патентов и иностранных источников по теме электрифицированных водяных насосов.

ELECTRIC WATER PUMPS	ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВОДНЫЕ НАСОСЫ
<p>The Mechanical Water Pump is one of the last mechanical components of the modern engine which has long been considered an inefficient component that was designed as an accessory from the ever first engines. A mechanical belt driven pump installed on your car engines runs at the same speed as the engine regardless of how hot the engine is.</p> <p>With an LCD EWP Controller (PATENTS: USA 6425353, EU 1133624, AUS 756453), the speed of the pump is managed by the controller, which varies the supply voltage to the pump and so varies the speed of the pump, hunting for a target temperature. When the engine reaches the target temperature the controller locks on, constantly changing the pump speed with traffic and throttle conditions, maintaining the target temperature independent of the engine speed.</p> <p>The important improvement for vehicle comes from the fact that most of the power the mechanical pump takes from the engine can be reclaimed with the use of an EWP hence the fuel savings. By removing the parasitic power losses of belt-driven water pumps, the EWP may provide up to 10kw of extra power and additional fuel savings. The engine power used by the mechanical pump increases as the cube of its speed – so when the mechanical pump speed doubles from idle speed say; 600rpm to 1200 rpm, the power it takes increases by eight times. Then another eight times going to 2400 rpm, and so on up to maximum engine speed. It is this extra power and torque that is released by deleting the mechanical pump that provides the fuel savings that is estimated to be 3.5% to 10%.</p> <p>Major European Manufacturers have implemented EWP's as standard issue on a number of their vehicles, we have documents</p>	<p>Механический водяной насос является одним из последних механических компонентов современного двигателя, который долгое время считается неэффективным компонентом, который был разработан со времен первых двигателей. Механический насос с ременным приводом, установленный на автомобильных двигателях, работает на той же скорости, что и сам двигатель, независимо от того, насколько двигатель горячий.</p> <p>С контроллером LCD EWP (Патенты: USA 6425353, EU 1133624, AUS 756453) скорость насоса управляется контроллером, который меняет напряжение питания на привод насоса и следовательно изменяет его скорость, для достижения заданной температуры. Когда двигатель достигает необходимой температуры, контроллер фиксируется, постоянно изменяя скорость насоса в условиях нагрузки и положения дроссельной заслонки, поддерживая заданную температуру независимо от частоты вращения двигателя.</p> <p>Важное усовершенствование для автомобиля связано с тем, что большая часть мощности, которую механический насос получает от двигателя, может не расходоваться с использованием EWP, следовательно, экономия топлива. Устраняя паразитные потери мощности водяных насосов с ременным приводом, EWP может обеспечить до 10 кВт дополнительной мощности и дополнительную экономию топлива. Мощность двигателя, используемая механическим насосом, увеличивается как куб его скорости - поэтому, когда скорость механического насоса удваивается от холостого хода, скажем; 600 об/мин до 1200 об/мин, потребляемая мощность увеличивается в восемь раз. Затем еще в восемь раз до 2400 об/мин и т. д. до максимальной частоты вращения двигателя. Именно эта дополнительная мощность и крутящий момент высвобождаются путем удаления механической связи с насосом, который обеспечивает экономию топлива, которая, как оценивается, составляет от 3,5% до 10%.</p> <p>Крупные европейские производители внедрили EWP в качестве стандартной оснащения на ряде своих автомобилей, у нас есть документы, которые показывают, что EWP использует на</p>

<p>show that and EWP uses 90% less energy than conventional systems, i.e.: the mechanical water pump. Other advantages will include lower emissions by virtue of faster engine warm up, better engine temperature management, eliminating engine heat soak and improved engine life.</p> <p>Weight reduction is a key requirement of any automotive manufacturer seeking fuel savings and our EWP will weight around 900 grams up to 1,151 grams (dependent on EWP Type) compared to a typical mechanical pump at 3 to 4 kg. Not only is our EWP considerably lighter when matched against the mechanical pump but we would also be replacing several outdated components with one environmentally friendly product which once again helps improve performance and fuel consumption.</p>	<p>90% меньше энергии, чем обычные системы, то есть механический водяной насос. Другие преимущества будут включать более низкие выбросы за счет более быстрого прогрева двигателя, улучшения управления температурой двигателя, устранения влажности двигателя и улучшения срока службы двигателя.</p> <p>Снижение веса является ключевым требованием любого производителя автомобилей, ищущего экономию топлива, и наша EWP будет весить около 900 граммов до 1,151 грамма (в зависимости от типа EWP) по сравнению с типичным механическим насосом от 3 до 4 кг. Не только наш EWP значительно легче, если сравнивать с механическим насосом, но мы также заменим несколько устаревших компонентов одним экологически чистым продуктом, который еще раз поможет повысить производительность и расход топлива.</p>
<p>Mechanical and Electric water pumps: Comparing And Contrasting.</p>	<p>Механические и электрические водяные помпы: сравнение и контраст.</p>
<p>Traditional mechanical water pumps have long been a reliable means of delivering water to the engine, where it circulates through cavities in the engine block and cylinder heads and returns back to the radiator. Mechanical pumps, centrifugal in design, are operated by a serpentine belt, typically directly off the crankshaft, and because the power needed to turn the pump is provided by the engine itself, there's no shortage of flow volume available — given you buy a large enough pump to meet your needs.</p> <p>For a road-going vehicle that undergoes stop-and-go driving, sometimes for hours at a time, a mechanical pump checks off all of the boxes, which is why mechanical pumps are virtually standard issue on any and all production automobiles. But for racers and those focused on the ultimate in performance</p>	<p>Традиционные механические водяные насосы уже давно являются надежным средством подачи воды в двигатель, где он циркулирует через полости в блоке цилиндров двигателя и головки цилиндров и возвращается обратно в радиатор. Механические насосы, центробежные по конструкции, управляются змеевидным ремнем, как правило, непосредственно от коленчатого вала, и поскольку мощность, необходимая для поворота насоса, обеспечивается самим двигателем, нет недостатка в объеме потока - при условии, что вы покупаете достаточно большой насос для удовлетворения ваших потребностей.</p> <p>Для дорожного транспортного средства, которое работает в режиме остановки и движения, иногда в течение нескольких часов, механический насос подходит под все типы работы, поэтому механические насосы являются практически стандартными для всех автомобилей. Однако для гонщиков и тех, кто сосредоточен на максимальной производительности без</p>

without compromise, however, there are drawbacks. Chiefly among these is that because the engine is the “motor” for the pump, there are parasitic losses in horsepower. And for some, especially for those trying to set records or achieve a specific performance goal, that’s a deal-breaker.

This number can vary, but the general rule of thumb is about 8-20 horsepower — the pumps of 25 to 30 years ago were more on the high end, while newer aftermarket pumps are often less than 12 horsepower at high RPM. And this is where electric water pumps come into the conversation. Electric pumps, as the name implies, are operated by an electric motor rather than the engine itself, eliminating any drain on horsepower. Electric pumps can also be mounted remotely, in cases where space in front of the engine block is limited. But beyond the horsepower element, the advantages for racers who see limited wide open throttle time are aplenty. For one, the pump provides an almost constant flow, and is also operational when the engine is off, allowing them to quickly cool things down in their pit area.

Schroeder and Meziere cite drag racing as the ideal application for electric pumps, as consistency in flow is a vital element for such a style of racing. Moroso’s electric pumps provide as much as 36 gallons per minute of flow, and this volume is available to the racer even after they’ve cut the engine ignition.

компромиссов, есть недостатки. Главным образом среди них является то, что двигатель является «двигателем» для насоса и присутствуют паразитные потери в лошадиных силах. И для некоторых, особенно для тех, кто пытается установить рекорд или достичь определенной цели производительности, это является проблемой.

Это число может меняться, но общее эмпирическое правило составляет около 8-20 лошадиных сил - насосы 25-30 летней давности были наиболее потребительными на высоком уровне, в то время как новые насосы современного рынка часто составляют потери менее 12 лошадиных сил при высоких оборотах. И здесь в разговор входят электрические водяные насосы. Электрические насосы, как следует из названия, управляются электродвигателем, а не самим двигателем, что исключает потери на лошадиных силах. Электрические насосы также могут монтироваться дистанционно, в тех случаях, когда пространство перед блоком двигателя ограничено. Но помимо элемента лошадиных сил, преимущества для гонщиков является то, что они в достатке замечают сокращения по времени открытия дроссельной заслонки. Во-первых, насос обеспечивает почти постоянный поток, а также работает, когда двигатель выключен, что позволяет им быстро охлаждать двигатель в своей зоне пит-стопа.

Schroeder и Meziere приводят в пример гонки по прямой, условия которых идеальны для электрических насосов, поскольку поток поступающей жидкости является жизненно важным элементом для такого стиля гонок. Электрические насосы Moroso обеспечивают до 36 галлонов в минуту потока, и этот объем

	доступен для гонщика даже после того, как он отключит зажигание двигателя.
Comparison of Electrical and Mechanical Water Pump Performance in Internal Combustion Engine.	Сравнение характеристик электрического и механического водяного насоса в двигателе внутреннего сгорания.
<p>Abstract</p> <p>This paper illustrates the differences between mechanical and electrical water pumps of internal combustion engine. Literatures have been studied in regard to engine cooling with the water pumps. Main design features of the mechanical and electrical water pumps have been illustrated. Engine dyno tests have been carried to evaluate if increased torque and power can be obtained in a common internal combustion engine (ICE) fitted with an electric water pump. Experiments were conducted to verify the effectiveness of an electrical pump over a standard mechanical pump.</p> <p>1. Introduction</p> <p>Since the invention of internal combustion engine in 1883, the process of combustion unfortunately produces an abundance of waste heat energy which needs to be removed in a RMIT University systematic manner via a cooling system to prevent damage to any mechanical components. The output of the energy as a percentage of the energy generated by the fuel in the combustion process for a modern passenger car engine when tested through a “NEDC ECE 15 EUDC” European drive cycle. Specifically, the energy generated has 13% exhaust heat losses to the wall and 18% wall heat losses which needs to be removed by a transfer mechanism to lower the engine’s temperature [Zoz, S. , Thelen, W. , Alcenius, T. and</p>	<p>Аннотация</p> <p>Настоящая работа иллюстрирует различия между механическими и электрическими водяными насосами двигателя внутреннего сгорания. Литературы изучались в отношении охлаждения двигателя водяными насосами. Были проиллюстрированы основные конструктивные особенности механических и электрических водяных насосов. Проведены испытания двигателя, чтобы оценить, может ли быть увеличен крутящий момент и мощность в общем двигателе внутреннего сгорания (ICE), оснащенном электрическим водяным насосом. Проведены эксперименты по проверке эффективности электрического насоса над стандартным механическим насосом.</p> <p>1. Введение.</p> <p>Поскольку изобретение двигателя внутреннего сгорания в 1883 году, процесс горения, к сожалению, приводит к избытку отработанной тепловой энергии, которая должна быть систематически удалена в системе RMIT University через систему охлаждения, чтобы предотвратить повреждение механических компонентов. Выход энергии в процентах от энергии, вырабатываемой топливом в процессе горения, для современного двигателя легкового автомобиля при испытании в европейском цикле «NEDC ECE 15 EUDC». В частности, генерируемая энергия имеет 13% потерь тепла от тепла к стене и 18% потерь тепла на стену, которые необходимо удалить с помощью механизма переноса для снижения температуры</p>

Wiseman, M., 2001]. Hence in this case the heat transfer medium is the coolant fluid circulated by a water pump in the engine's cooling system. When the engine power output is substantially increased, the large amount of heat generated needs to be removed in a timely manner to prevent damage to the engine components. In this case, the coolant fluid, marked in a blue colour, is required to circulate around an engine to sufficiently carry the heat away, not only from the combustion chamber but also other critical areas of the engine such as the engine block, the cylinder head, the radiator and the heater core. It is this movement and circulation of RMIT University Page 5 of 27 the coolant fluid that is studied in this paper. Hence, the water pump can be either mechanically or electrically driven to circulate the coolant fluid around the engine in this cooling system. Instead of use of water, the coolant is often mixed with water in modern vehicle engines, which prevents the coolant fluid from either freezing or boiling, because the freezing or boiling water will significantly reduce the effectiveness of heat removal.

двигателя [Zoz, S., Thelen, W., Alcenius, T. and Wiseman, M., 2001]. Следовательно, в этом случае теплоносителем является охлаждающая жидкость, циркулирующая водяным насосом в системе охлаждения двигателя. Когда мощность двигателя значительно возрастает, необходимо удалить большое количество тепла, чтобы предотвратить повреждение компонентов двигателя. В этом случае жидкость для хладагента, обозначенная синим цветом, требуется для циркуляции вокруг двигателя, чтобы в достаточной мере переносить тепло не только от камеры сгорания, но и от других критических зон двигателя, таких как блок цилиндров, головки блока цилиндров, радиатор и сердечник нагревателя. Именно это движение и циркуляция жидкостей охлаждающей жидкости изучаются в этой статье. Следовательно, водяной насос может быть с механическим или электрическим приводом для циркуляции охлаждающей жидкости вокруг двигателя в этой системе охлаждения. Вместо использования воды, хладагент часто смешивается с водой в современных автомобильных двигателях, что предотвращает замерзание или кипение охлаждающей жидкости, поскольку замерзающая или кипящая вода значительно снижает эффективность удаления тепла.

## 2 Тепловой расчет двигателя ВАЗ-21179

Тепловой расчет двигателя необходим для определения температурных режимов работы двигателя при различном значении оборотов коленчатого вала. Расчет проводится по методике Вибе (для 4х-тактных моторов).

### 2.1 Исходные данные

Исходные данные двигателя ВАЗ-21179:

$V_1 = 1,8$  л – объем двигателя;

$n_N = 6050$  мин<sup>-1</sup> – частота вращения номинальная;

$\varepsilon = 10,3$  □ степень сжатия двигателя;

$i = 4$  – количество цилиндров в двигателе;

$\tau = 4$  □ количество тактов в двигателе.

Расчет проводится для пяти различных режимов. Выбранные скоростные режимы имеют следующие значения:

$n_1 = 1000$  (мин<sup>-1</sup>);

$n_2 = 2500$  (мин<sup>-1</sup>);

$n_3 = 3700$  (мин<sup>-1</sup>);

$n_4 = 4500$  (мин<sup>-1</sup>);

$n_5 = 6050$  (мин<sup>-1</sup>).

Для начала расчета рабочего процесса, необходимо использовать перечень параметров, которые указаны в таблице 1.

Таблица 1 □ Исходные данные для расчета рабочего процесса

$\varepsilon$	$V_{л, л}$	$\alpha$	$\tau$	$D, мм$	$i$	$S, мм$
10,3	1,8	1	4	82	4	84

## 2.2 Параметры рабочего тела

При использовании двигателя с искровым зажиганием применяется бензиновое топливо, средний элементарный состав в массовых долях и молекулярная масса которого содержат:

$$C = 0,856;$$

$$H = 0,144;$$

$$m_T = 115 \text{ кг/кмоль.}$$

Низшая теплота сгорания ( $H_u$ ) жидкого топлива (в Дж/кг) определяется по формуле Менделеева

$$\begin{aligned} H_u &= 33,91C + 125,6H - 10,89(O - S) - 2,51 \cdot (9H + W) = \\ &= 33,91 \cdot 0,856 + 125,6 \cdot 0,144 - 2,51 \cdot 9 \cdot 0,144 = 43930 \text{ кДж/кг.} \end{aligned} \quad (2.1)$$

где:  $C$  □ массовое содержание углерода в бензине;

$H$  □ массовое содержание водорода в бензине;

$O$  □ массовое содержание кислорода в бензине;

$S$  □ массовое содержание серы в бензине;

$W$  □ количество влаги, содержащейся в 1 кг бензина;

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания топлива

$$L_0 = \frac{1}{0,208} \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) \frac{\text{кмоль} \cdot \text{воздуха}}{\text{кг} \cdot \text{топлива}}, \quad (2.2)$$

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \left( \frac{8}{3} \times 0,856 + 8 \times 0,144 \right) = 14,952 \frac{\text{кг} \cdot \text{воздуха}}{\text{кг} \cdot \text{топлива}}, \quad (2.3)$$

Параметр  $\alpha = 1$  для всех режимов работы двигателя, поскольку экологические требования не позволяют в полной мере рассматривать иные значения.

Расчеты проводятся по предложенным формулам по методике Вибе и результаты сводятся в таблицы.

Количество горючей смеси

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

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

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

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

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

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

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

Общее число продуктов сгорания вычисляется следующей формулой

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

Коэффициент молекулярного изменения свежей смеси

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

Результаты расчета параметров рабочего тела приведены в таблице 3.1, т.к. состав смеси одинаковый, то параметры рабочего тела (бензина) на всех режимах одинаковые, поэтому приведены одинаковые параметры.

Таблица 3.1 - Параметры используемого рабочего тела

n, мин <sup>-1</sup>	$\alpha$	M <sub>CO</sub> , кмоль CO/кг топл.	M <sub>H<sub>2</sub>O</sub> , кмоль H <sub>2</sub> O/кг топл.	M <sub>CO<sub>2</sub></sub> , кмоль CO <sub>2</sub> /кг топл.	M <sub>N<sub>2</sub></sub> , кмоль N <sub>2</sub> /кг топл.	M <sub>1</sub> , кмоль гор.см./кг топл.	M <sub>H<sub>2</sub></sub> , кмоль H <sub>2</sub> /кг топл.	M <sub>2</sub> , кмоль пр.сг./кг топл.
1000	1	0,0057	0,0725	0,0655	0,3923	0,5225	0,0029	0,5530
2500	1	0,0057	0,0725	0,0655	0,3923	0,5225	0,0029	0,5530
3750	1	0,0057	0,0725	0,0655	0,3923	0,5225	0,0029	0,5530
4500	1	0,0057	0,0725	0,0655	0,3923	0,5225	0,0029	0,5530
6050	1	0,0057	0,0725	0,0655	0,3923	0,5225	0,0029	0,5530

## 2.2 Параметры остаточных газов и атмосферы.

Задаются атмосферные условия:

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

Значения температуры и давления ( $T_r$  и  $p_r$ ) остаточных газов (ОГ):

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

## 2.3 Вычисление процесса наполнения

Температура ( $T$ ) подогрева свежего заряда выражается как  $\Delta T = 8$ .

Плотность заряда на впуске в двигатель

$$\rho_0 = \frac{z_0 \cdot 10^6}{287 \cdot T_0}; \quad (2.12)$$

В свою очередь, потери давления на этапе впуске

$$\Delta p_a = \frac{2,8 \cdot A_n^2 \cdot n^2 \cdot \rho_0 \cdot 10^{-6}}{2} \text{ (МПа)} \quad (2.13)$$

Сила, которая приложена к площади, в конце процесса впуска

$$p_a = p_0 - \Delta p_a \quad (2.14)$$

Коэффициент остаточных газов вычисляется следующим образом

$$\gamma_r = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{p_r}{\varepsilon \cdot p_a - p_r} \quad (2.15)$$

Температура ( $T$ ) в конце процесса впуска

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_r \cdot T_r}{1 + \gamma_r} \quad (2.16)$$

Нахождение коэффициента наполнения, если известен коэффициент до зарядки ( $\phi_{\text{доз}} = 1,11$ )

$$\eta_v = \frac{T_0}{T_0 + \Delta T} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{p_0} \cdot (\phi_{\text{доз}} \cdot \varepsilon \cdot p_a - p_r) \quad (2.17)$$

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.)

$$V_a = 8,314 \cdot 10^{-3} \frac{T_a}{\mu_B \cdot p_a}; \quad (2.18)$$

Полученные данные заносятся в таблицу 2.

Таблица 2 □ Данные расчета процесса наполнения цилиндров

	$n_1 = 1000$	$n_2 = 2500$	$n_3 = 3700$	$n_4 = 4500$	$n_5 = 6050$
$A_n$	0,010909	0,012231	0,014215	0,016033	0,018182
$\Delta p_a$	0,0002	0,0016	0,0047	0,0087	0,0201
$p_a$	0,0998	0,0984	0,0953	0,0913	0,0799
$\gamma_r$	0,0317	0,0337	0,0331	0,0307	0,0291
$T_a$	337,317	332,6372	329,6875	328,6954	325,8566
$\eta_v$	0,922074	0,944024	0,956012	0,983857	0,905551
$V_a$	0,972524	0,972069	0,995547	1,035321	1,173912

## 2.4 Параметры сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси

Определяем политропу сжатия

$$n^1 = 1 + \frac{8,314}{20,16 + 1,738 \cdot 10^{-3} (\varepsilon^{n_1-1} + 1)} \cdot T_a \quad (2.19)$$

Сила давления, температура и удельный объем в конце сжатия

$$p_C = p \cdot \varepsilon^{n^1}; \quad T_C = T_a \cdot \varepsilon^{n^1-1}$$

Удельный объем, давление и температура рабочего тела в момент воспламенения, если угол опережения воспламенения  $\Theta = 13 \div 30$  (град) и  $\lambda = 0,341$

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

$$P_y = \left( \frac{V_a}{V_y} \right)^{n_1} \cdot P_a; \quad (2.20)$$

$$T_y = \left( \frac{V_a}{V_y} \right)^{n_1 - 1} \cdot T_a. \quad (2.22)$$

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

	$n_1 = 1000$	$n_2 = 2500$	$n_3 = 3700$	$n_4 = 4500$	$n_5 = 6050$
$n^I$	1,372	1,374	1,375	1,376	1,376
$V_y$	0,109471	0,126251	0,140195	0,168008	0,207763
$T_c$	801,31	793,89	788,68	789,07	782,25
$P_c$	2,4415	2,42	2,3474	2,2583	1,9745
$P_y$	1,993333	1,622927	1,408254	1,114104	0,864516
$T_y$	758,5226	712,2316	686,278	650,6434	624,35
$\Theta$	14	18	24	28	31

## 2.5 Термохимический расчет

Теоретическая масса воздуха, необходимая для сгорания 1,0 килограмма жидкого топлива, при  $C = 0,856$  и  $H = 0,144$  будет равна

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \cdot \left( \frac{8}{3} \cdot C + 8H \right); l_0 = 14,957 \text{ (кмоль.возд./кг.топл)}. \quad (2.23)$$

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

$$L_0 = \frac{1}{0,208} \cdot \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} \right); L_{\lambda} = 0,516 (\text{кмоль.возд./кг.топл}) \quad (2.24)$$

Количество свежего заряда при  $\alpha = 1$

$$M_1 := \alpha \cdot L_0 + \frac{1}{m_T}; M_1 = 0,516 (\text{кмоль.гор.см./кг.топл}) \quad (2.25)$$

Общее количество элементов сгорания:

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

Коэффициент молекулярного изменения свежей смеси

$$\mu_0 = \frac{M_2}{M_1}; \mu_0 = 1,07 . \quad (2.26)$$

Коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси

$$\mu = \frac{\mu_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r}; \mu = 1,067 . \quad (2.27)$$

## 2.6 Термодинамический расчет

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

Целиком учтенная удельная теплота сгорания топлива

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

$$q_z = \frac{\zeta \cdot H_u}{(1 + \gamma_r)(\alpha \cdot l_0 + 1)} . \quad (2.28)$$

Давление газов в процессе сгорания определяется следующим образом

$$p_2 = E_2 \cdot \Delta X_{1-2} + p_1 \cdot (K_{1-2} \cdot \psi(\varphi_1) - \psi(\varphi_2)) / [K_{1-2} \cdot \psi(\varphi_1) - \psi(\varphi_1)]. \quad (2.29)$$

$$E_2 = \left( 0,002 \cdot \frac{\varepsilon}{V_a} \right) \cdot q_z. \quad (2.30)$$

Доля топлива, сгоревшего на рассматриваемом участке

$$\Delta X_{1-2} = \exp \left[ -6,908 \left[ \frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[ -6,908 \left[ \frac{\varphi_2}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right]. \quad (2.31)$$

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 воспламенения соответственно до начала или конца рассматриваемого участка;

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

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

Отношение средних теплоемкостей рабочего тела на участке 1-2, рассчитываются по уравнению

$$k_{1-2} = 1,259 + \left[ 76,7 - \left( 13,6 - \frac{14,2}{\alpha} \right) \cdot x_{1-2} \right] \cdot \frac{1}{T_{1-2}} - \left( 0,0665 - \frac{0,0245}{\alpha} \right) \cdot x_{1-2}. \quad (2.32)$$

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

$$x_{1-2} = 0,5 \left[ \exp \left[ -6,908 \left[ \frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[ -6,908 \left[ \frac{\varphi_2}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] \right]; \quad (2.33)$$

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

$$\psi(\varphi') = 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \sigma; \quad (2.34)$$

$$\sigma = \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) - \left[\cos(\varphi') + \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 (\sin(\varphi'))^2}\right]; \quad (2.35)$$

$$T_2 = \frac{T_y \cdot p_2 \cdot \psi(\varphi'_2)}{p_y \cdot \psi(\varphi'_y) \cdot \mu_{1-2}} \quad \square \text{ указанная температура газов процесса сгорания;}$$

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

$$\mu_1 = 1 + \frac{(\mu_{0\max} - 1) \left[1 - \exp\left[-6,908 \left(\frac{\varphi_1}{\varphi_Z}\right)^{m+1}\right]\right]}{1 + \gamma_r} \quad (2.36)$$

Данные  $\mu_1$  показаны в приложении А для всех 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

	$n_1 = 1000$	$n_2 = 2500$	$n_3 = 3700$	$n_4 = 4500$	$n_5 = 6050$
$q_z$	2,3211	5,5029	2,5844	2,6171	2,6478
$E_2$	49,1659	53,0418	53,4767	52,0736	46,4646

## 2.7 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

$$n^2 = 1 + \frac{8,341}{23,7 + 0,0046 \cdot 2872,74 \cdot \left(1 + \frac{1}{\delta^{n_2-1}}\right)}. \quad (2.37)$$

Значения в конце процесса расширения как политропного процесса

$$p_b = \frac{p_z}{\delta^{n_2}}; p_b; \quad (2.38)$$

$$T_b = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}}; T_b, \quad (2.39)$$

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

$$V_y = \frac{V_a}{\varepsilon} \cdot \left[ 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \left[ \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \left[ \cos(\varphi_{pm}) + \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2(\varphi_{pm})} \right] \right] \right], \quad (2.40)$$

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

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

$$T_r = \frac{T_b}{\sqrt[3]{\frac{p_b}{p_r}}}; \quad (2.41)$$

Составляется таблица 5, в которую вносятся полученные значения.

Таблица 5 □ Процесс впуска и расширения

	$n_1 = 1000$	$n_2 = 2500$	$n_3 = 3700$	$n_4 = 4500$	$n_5 = 6050$
$n^2$	1,188	1,182	1,178	1,178	1,177
$V_z$	0,16	0,17	0,19	0,2	0,2
$p_z$	8,462262	8,955109	9,08769	8,802892	7,947093
$V_y$	0,10947	0,12625	0,14019	0,16801	0,20776
$T_z$	1025	955	990	1083	1180

## 2.8 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»

$$L_{iT} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{1i} + P_{2i}}{2} |V_{2i} - V_{1i}| \quad (2.42)$$

Расчётное среднее индикаторное давление

$$P_{iT} = \frac{\varepsilon \cdot L_{iT}}{(\varepsilon - 1)V_a}, \quad \text{МПа.} \quad (2.43)$$

Индикаторный коэффициент полезного действия

$$\eta_i = 8.314 \frac{M_1 \cdot P_{iT} \cdot T_0}{P_0 \cdot \eta_V \cdot H_u} \quad (2.44)$$

Удельный индикаторный расход топлива

$$g_i = \frac{3600}{\eta_i \cdot H_u} \cdot 10^3, \quad \text{г/кВт} \cdot \text{ч} \quad (2.45)$$

Результаты расчета индикаторных показателей рабочего цикла приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Показатели индикаторные в процессе рабочего цикла

	$n_1 = 1000$	$n_2 = 2500$	$n_3 = 3700$	$n_4 = 4500$	$n_5 = 6050$
$\eta_i$	0,182283	0,303693	0,355391	0,388991	0,384827
$g_i$	450,9915	270,6944	231,3177	211,3367	213,6236
$P_{iT}$	0,57671	0,960829	1,124389	1,230695	1,217521
$L_{iT}$	0,255832	0,426229	0,498785	0,545943	0,540099

## 2.9 Эффективные показатели и параметры двигателя

Давление механических потерь при средней скорости поршня

$$v_n = \frac{S_n}{30}, \text{ м/с} \quad (2.46)$$

Среднее давление вследствие воздействия механических потерь

$$P_M = 0.034 + 0.0113 v_n, \text{ МПа} \quad (2.47)$$

Среднее эффективное давление

$$P_e = P_{iT} - P_M, \text{ МПа} \quad (2.48)$$

Механический коэффициент положительного действия

$$\eta_M = \frac{P_e}{P_{iT}} \quad (2.49)$$

Эффективный коэффициент положительного действия

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_M \quad (2.50)$$

Удельный эффективный расход топлива

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_M}, \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (2.51)$$

Расчетная эффективная мощность

$$N_e = \frac{P_e \cdot V_{\text{л}} \cdot n}{30 \tau}, \text{ кВт} \quad (2.52)$$

Расход топлива в час

$$G_T = N_e \cdot g_e, \text{ кг/ч} \quad (2.53)$$

## Крутящий момент двигателя

$$M_e = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot N_e}{\pi \cdot n}, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.54)$$

Результаты расчета эффективных показателей двигателя приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Эффективные показатели двигателя

при n =	V <sub>п.ср</sub>	p <sub>м</sub>	p <sub>е</sub>	η <sub>м</sub>	η <sub>е</sub>	g <sub>е</sub>	N <sub>е</sub>	M <sub>е</sub>	G <sub>т</sub>
1000	2,94	0,067222	0,509488	0,883439	0,161036	510,4955	7,910401	71,94169	4,038224
2500	7	0,1131	0,847729	0,882289	0,267945	306,8091	31,33812	119,7028	9,61482
3700	10,5	0,15265	0,971739	0,864237	0,307142	267,6552	53,88361	137,2135	14,42223
4500	12,6	0,17638	1,054315	0,856683	0,333242	246,692	70,155	148,8735	17,30668
6050	16,94	0,225422	0,992099	0,814852	0,313577	262,1625	88,75358	140,0883	23,26786

### 3 Кинематический расчет

Для понимания, какие нагрузки и силы воздействуют на двигатель необходимо сделать расчет на прочность. Для этого стоит начать с кинематического расчета, поскольку он показывает особенности движения кривошипно-шатунного механизма (КШМ) и дает возможность графически вывести полученные значения скорости, ускорения и перемещения.

#### 3.1 Исходные данные

В качестве исходных данных примем следующие значения:

$n = 6050 \text{ мин}^{-1}$  – номинальные обороты коленчатого вала;

$r = 42 \text{ мм}$  – радиус кривошипа;

$\lambda = 0,323$  – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна;

#### 3.2 Перемещение поршня

Рассчитаем перемещение поршня по формуле

$$S_{\partial} = r \left( \frac{1}{\lambda} + 1 - k^2 \right)^{0.5} - \cos \varphi + \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{2} \lambda k^2 + \lambda k \sin \varphi - \frac{1}{4} \lambda + \frac{1}{4} \lambda \cos 2\varphi \quad (3.1)$$

Полученные данные ускорения поршня от угла поворота коленчатого вала представлена в Приложении Б, таблице Б1. Графически зависимость показана на рисунке 1.

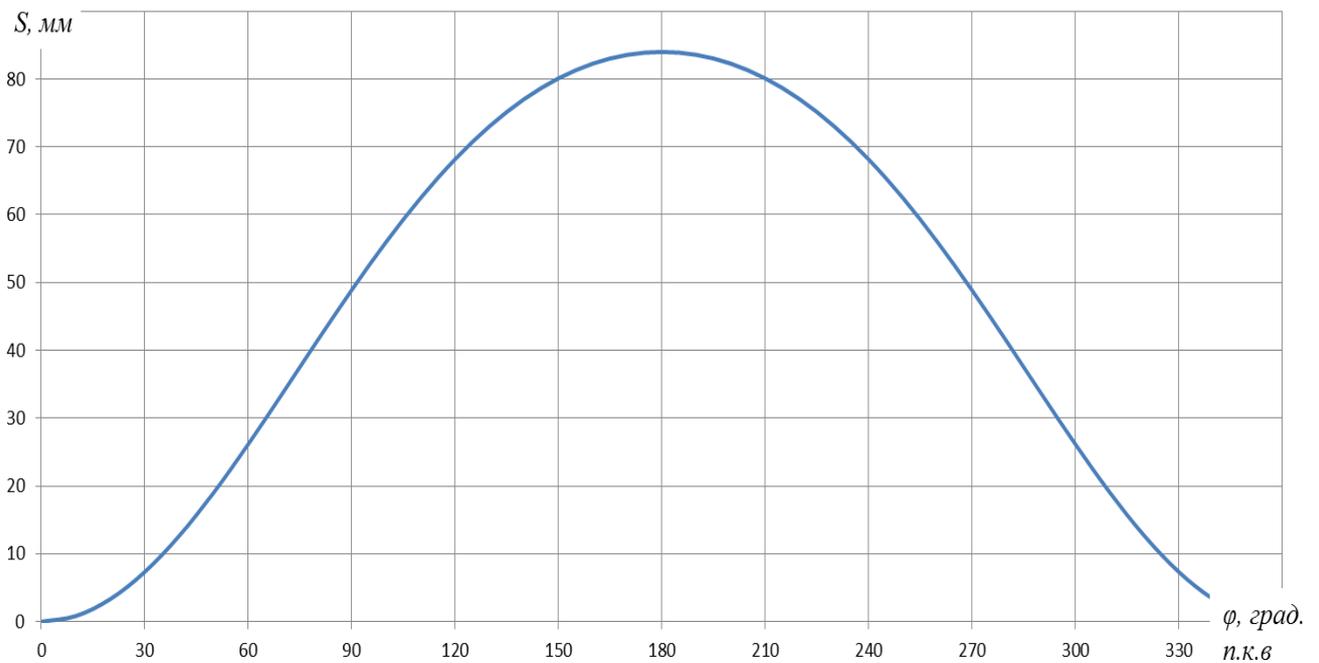


Рисунок 1 – Зависимость перемещения шатуна от угла поворота коленвала

### 3.3 Скорость поршня

Рассчитаем скорость поршня по формуле

$$u_n = r\omega \sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi - \lambda k \cos \varphi \quad (3.2)$$

Полученные данные ускорения поршня от угла поворота коленчатого вала представлена в Приложении Б, таблице Б1. Графически зависимость показана на рисунке 2.

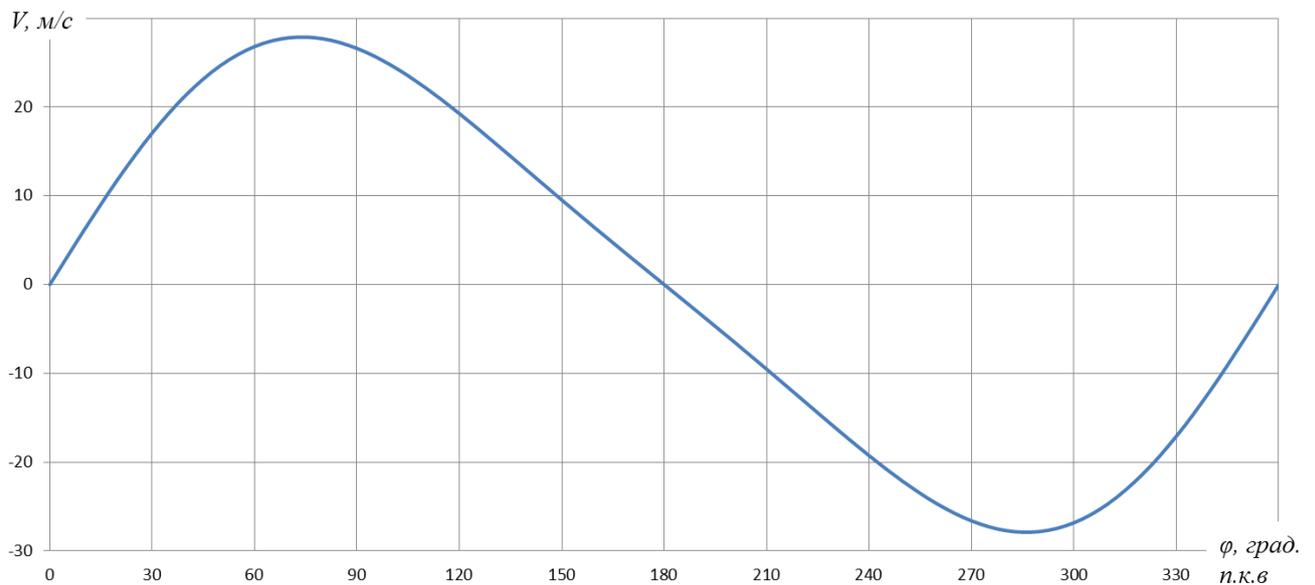


Рисунок 2 – Зависимость скорости шатуна от угла поворота коленчатого вала

### 3.4 Ускорение поршня

Расчет ускорение поршня происходит по формуле

$$j_n = r\omega^2 \cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi + \lambda k \sin \varphi \quad (3.3)$$

Полученные данные ускорения поршня от угла поворота коленчатого вала представлена в Приложении Б, таблице Б1. Графически зависимость показана на рисунке 3.

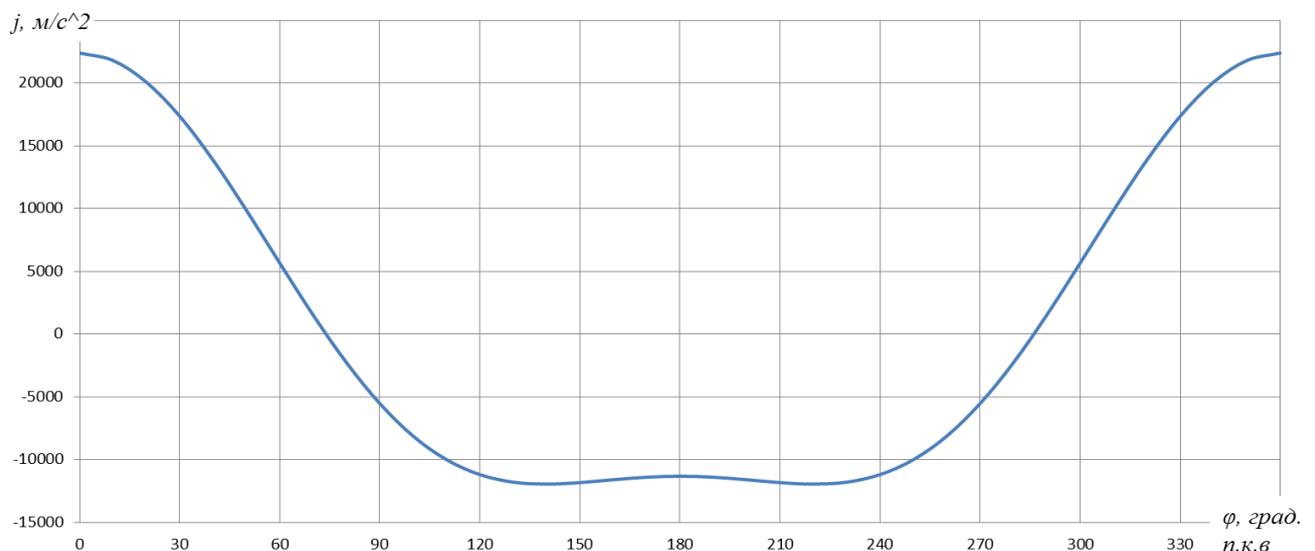


Рисунок 3 – Зависимость ускорения шатуна от угла поворота коленчатого вала

## 4 Динамический расчет

Динамический расчет необходим для определения суммарных сил и моментов, возникающих в следствии давлении газов и инерционных сил.

Исходные данные для данного расчета представлены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Данные для расчета

n	Po	L	S	R	pi	Me	λ	ω	ηм
6050	0,1	0,128	0,084	0,042	1,18	140,3	0,328	628,3	0,845

### 4.1 Расчет масс кривошипно-шатунного механизма

Масса поршневой группы определяется по формуле

$$m_n = m'_n \cdot F_{nc}; \quad (4.1)$$

Для определения массы шатуна, необходимо просчитать массу, сосредоточенную на оси поршневого пальца и на оси кривошипа.

Масса шатуна

$$m_{ш} = m'_{ш} \cdot F_{nc}; \quad (4.2)$$

Масса неуравновешанных частей одного колена вала с отсутствием противовесов

$$m_k = m'_k \cdot F_{nc}; \quad (4.3)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца

$$m_{ш.п} = 0,275 \cdot m_{ш}; \quad (4.4)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа

$$m_{ш.к} = 0,725 \cdot m_{ш}; \quad (4.5)$$

Массы, совершающие возвратно-поступательное движение

$$m_j = m_n + m_{ш.п}; \quad (4.6)$$

Массы, совершающие вращательное движение

$$m_r = m_k + m_{ш.к}; \quad (4.7)$$

Данные с результатами массы поршневой группы представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Масса поршневой группы.

$D_{п}$	$F_{п}$	$m_{п}$	$m'_{п}$
82	0,005282	0,312	59,1

В сведенной ниже таблице 4.3 представлены данные, касающиеся шатуна.

Таблица 4.3 – Массы шатуна

$m_{ш.п}$	$m_{ш.к}$	$m_{ш}$	$m'_{ш}$
0,1379	0,3637	0,502	95

Масса неуравновешенных частей без противовесов одного колена будут равны  $m_k = 0,612$  и  $m'_k = 116$ .

#### 4.2 Удельные и полные силы инерции

Силы инерции разделяются на поступательные и центробежные движущиеся массы. Сила инерции от возвратно-поступательных движущихся масс определяют по формуле

$$p_j = -jm_j/F_n \quad (4.8)$$

Далее требуется определить центробежную силу инерции вращающихся масс

$$K_R = -m_R R \omega^2 ; \quad (4.9)$$

В свою очередь центробежная сила подразделяется еще на 2: вращающиеся массы шатуна и вращающиеся массы кривошипа.

$$K_{Rш} = -m_{ш.к} R \omega^2 ; \quad (4.10)$$

$$K_{Rк} = -m_{.к} R \omega^2 . \quad (4.11)$$

Полученные данные сведены в таблицу 3.4.

Таблица 4.4 – Силы инерции

Pj	K <sub>R</sub>	K <sub>Rш</sub>	K <sub>Rк</sub>
-0,000085225	-16,1884	-6,0310	-10,1574

#### 4.3 Суммарные силы, которые действуют в кривошипно-шатунном механизме

Суммарные силы определяются сложением сил давления и возвратно-поступательных движущихся масс. Но наиболее целесообразнее брать за основу удельные силы, нежели полные. При этом суммарные силы определяют сложением удельных сил инерции и избыточного давления над поршнем.

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

Для того, чтобы построить диаграмму суммарных сил, необходимо найти еще несколько значений, такие как: N – нормальная сила, действующая перпендикулярно оси цилиндра, S – сила, действующая вдоль шатуна, K – сила, направленная по радиусу кривошипа и T – тангенциальная сила, направленная по касательной к окружности кривошипа. Эти значения выражены в МПа и рассчитываются по следующим формулам

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

$$p_s = p(1/\cos \beta) \quad (4.14)$$

$$p_k = p \cos(\varphi + \beta) / \cos \beta \quad (4.15)$$

$$p_T = p \sin(\varphi + \beta) / \cos \beta \quad (4.16)$$

Так же, необходимо определить значения средней силы тангенциальной ( $T_{cp}$ ) по формуле

$$T_{cp} = \frac{2 \cdot 10^6}{\pi \tau} p_i F_{II}; \quad (4.17)$$

$$p_{T_{cp}} = \frac{\Sigma F_1 - \Sigma F_2}{OB} M p; \quad (4.18)$$

$$T_{cp} = p_{T_{cp}} F_{II}; \quad (4.19)$$

Результаты вышеприведенных формул, показывающих удельные суммарные силы двигателя, представлены в Приложении В, таблице В1.

#### 4.4 Расчет крутящих моментов

По величине  $T$  определяют крутящий момент для каждого из цилиндров

$$M_{кр.ц} = TR \quad (4.20)$$

$$\Theta = 720 / i = 720 / 4 = 180^0 \quad (4.21)$$

Таблица 4.5 отображает результаты моментов для каждого из 4х цилиндров, суммарный момент и среднее значение моментов.

Таблица 4.5 – Крутящие моменты.

Сумма $M_{кр}$	1-й $M_{кр}$	2-й $M_{кр}$	3-й $M_{кр}$	4-й $M_{кр}$	Ср. знач.	$\varphi$
-8,68536E-16	0	2,59119E-14	-1,12036E-13	8,5255E-14	0	0
41,24082966	-95,3212	-25,02726685	188,9216963	-27,33236289	-95,3212	10
112,1993623	-171,27	-51,25766827	387,5175132	-52,79096264	-171,27	20
25,16383105	-213,096	-79,15253449	398,6206855	-81,20856668	-213,096	30
-110,4369238	-214,051	-107,7799823	321,4095017	-110,0155393	-214,051	40
-175,9737	-176,607	-134,3883764	271,2820966	-136,2600707	-176,607	50
-166,2302489	-111,226	-154,4043143	254,4933327	-155,0935732	-111,226	60
-93,56285193	-33,0953	-162,085614	262,0242092	-160,406156	-33,0953	70
22,35816372	42,08902	-151,9706182	278,5021543	-146,2623951	42,08902	80
162,1586357	101,9551	-120,9873434	290,192955	-109,0020515	101,9551	90
308,2999004	139,7403	-70,66313032	288,6694913	-49,44678061	139,7403	100
443,6316744	154,5654	-8,522786784	271,8969964	25,6920815	154,5654	110
545,588622	150,035	52,24081972	239,2342552	104,0785327	150,035	120
593,5203273	132,0381	95,32941326	196,1200872	170,0327051	132,0381	130
570,6530686	106,6506	106,1826334	149,4634095	208,3564128	106,6506	140
465,0760441	78,70008	73,36097957	104,4577204	208,5572615	78,70008	150
304,2633317	51,12863	20,90658329	64,11668123	168,1114324	51,12863	160
121,0254816	25,01151	-27,64336151	29,44603895	94,21129262	25,01151	170
2,06546E-13	2,59E-14	-1,12036E-13	8,5255E-14	2,07414E-13	2,59E-14	180

#### 4.5 Силы, действующие на шатунные шейки коленчатого вала

Для рядных двигателей результирующая сила, воздействующая на шатунную шейку, определяется по формуле

$$R_{ш.ш} = \sqrt{T^2 + P_k^2} \quad (4.22)$$

Для определения  $R_k$  применяется следующая формула

$$R_k = \sqrt{(PT_k \cdot 10^3 \cdot F_n)^2 + (K_{P_k})^2} \quad (4.23)$$

Итоговые результаты представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Силы, воздействующие на шатунную шейку

φ	Рк	Р ш.ш.	К	Т	Ср. знач.
0	-16,2091	16,21	-10,0772	0	
10	-15,7580	15,92	-9,62611	-2,26955	15,4103
20	-14,3310	14,90	-8,19909	-4,07785	14,1023
30	-12,2994	13,30	-6,16744	-5,07371	12,3038
40	-10,0886	11,30	-3,95664	-5,09645	10,2290
50	-8,1324	9,16	-2,00044	-4,20494	8,2111
60	-6,7673	7,27	-0,63535	-2,64823	6,7386
70	-6,1600	6,21	-0,02808	-0,78798	6,2888
80	-6,2880	6,37	-0,15608	1,00212	6,8764
90	-6,9751	7,39	-0,84321	2,427502	8,0087
100	-7,9650	8,63	-1,83312	3,32715	9,1790
110	-9,0029	9,73	-2,87099	3,680128	10,1242
120	-9,8975	10,52	-3,76555	3,572262	10,7648
130	-10,5488	11,01	-4,41683	3,143765	11,1206
140	-10,9432	11,23	-4,81132	2,5393	11,2595
150	-11,1284	11,29	-4,99652	1,873811	11,2659
160	-11,1806	11,25	-5,04873	1,217348	11,2192
170	-11,1757	11,19	-5,04381	0,595512	11,1796
180	-11,1676	11,17	-5,03572	6,17E-16	11,1812
190	-11,1789	11,19	-5,04699	-0,59589	11,2273
200	-11,1934	11,26	-5,06147	-1,22042	11,2875
210	-11,1572	11,32	-5,02524	-1,88458	11,3025
220	-10,9942	11,29	-4,86227	-2,56619	11,1942
230	-10,6274	11,10	-4,49545	-3,19972	10,8798
240	-10,0071	10,66	-3,87521	-3,67629	10,2924
250	-9,1426	9,92	-3,01068	-3,85918	9,4092
260	-8,1255	8,89	-1,99356	-3,61835	8,2935
270	-7,1325	7,69	-1,00061	-2,88065	7,1519
280	-6,3940	6,61	-0,26205	-1,68246	6,3698
290	-6,1247	6,13	0,007232	-0,20292	6,3388
300	-6,4303	6,55	-0,29841	1,243829	7,0550
310	-7,2117	7,56	-1,0798	2,269748	8,0204
320	-8,0947	8,48	-1,96274	2,528158	8,4591
330	-8,2551	8,44	-2,12322	1,74669	7,7940
340	-7,1328	7,15	-1,00085	0,497776	5,2773
350	-3,3403	3,40	2,791592	-0,65818	4,0796
360	4,7546	4,75	10,88649	-2,7E-15	9,2301
370	12,9465	13,71	19,07844	4,498136	14,5887
380	12,4195	15,47	18,55141	9,226607	13,1969
390	5,4050	10,92	11,53692	9,490969	9,2885
400	-0,1908	7,65	5,941115	7,652607	7,4009
410	-3,0591	7,15	3,072822	6,459098	7,4010
420	-4,6782	7,66	1,453727	6,059365	8,1242
430	-5,9096	8,59	0,222327	6,238672	9,1778
440	-7,1647	9,76	-1,03281	6,631004	10,3706
450	-8,5319	10,98	-2,40001	6,909356	11,5230
460	-9,9187	12,07	-3,78678	6,873083	12,4942
470	-11,1823	12,92	-5,05039	6,473738	13,1637
480	-12,1362	13,41	-6,00426	5,696054	13,4652
490	-12,6924	13,52	-6,56045	4,669526	13,4407
500	-12,8746	13,36	-6,74273	3,558653	13,1806

510	-12,7637	13,00	-6,63182	2,487089	12,7801
520	-12,4632	12,56	-6,33124	1,526588	12,3233
530	-12,0700	12,09	-5,93808	0,701096	11,8725
540	-11,6547	11,65	-5,52282	2,03E-15	11,6583
550	-11,6438	11,66	-5,51184	-0,65077	11,5381
560	-11,3448	11,41	-5,21288	-1,25693	11,4332
570	-11,2877	11,45	-5,15578	-1,93354	11,4261
580	-11,0950	11,40	-4,96312	-2,61942	11,2857
590	-10,6900	11,17	-4,55806	-3,24429	10,9272
600	-10,0244	10,68	-3,89251	-3,6927	10,2812
610	-9,1114	9,88	-2,97948	-3,81919	9,3255
620	-8,0506	8,77	-1,91868	-3,48244	8,1342
630	-7,0334	7,50	-0,90149	-2,59529	6,9605
640	-6,3153	6,42	-0,18337	-1,1773	6,3041
650	-6,1537	6,18	-0,0218	0,611716	6,6762
660	-6,7264	7,17	-0,59452	2,47806	8,0930
670	-8,0579	9,02	-1,92597	4,048398	10,0828
680	-9,9833	11,15	-3,85138	4,960867	12,1451
690	-12,1680	13,14	-6,03609	4,965649	13,9381
700	-14,1798	14,73	-8,0479	4,002653	15,2699
710	-15,6459	15,81	-9,51402	2,243126	16,0075
720	-16,2091	16,21	-10,0772	4,94E-15	8,1046

Силу, действующую на коренную шейку, определяют сложением сил от двух смежных колен, которые рассчитываются по следующим формулам

$$R_{к.ш1} = -0,5R_{к1} ; \quad (4.24)$$

$$R_{к.ш2} = \sqrt{T_{к2}^2 + K_{к2}^2} , \quad (4.25)$$

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

В таблице 4.7 отражены результаты сил на коренные шейки и силы на колесо вала.

Таблица 4.7 – Силы на колено вала и коренные шейки.

К pk	Рк	Т	Rk (Rk1)	Rk.ш.1	φ
-26,5366	-12,233	0	31,09544	-15,5477	0
-26,0855	-11,9309	-1,6402	30,56007	-15,28	10
-24,6585	-10,9145	-2,96107	28,81052	-14,4053	20
-22,6268	-9,45686	-3,71696	26,2486	-13,1243	30
-20,4160	-7,84961	-3,79	23,33594	-11,668	40
-18,4598	-6,39418	-3,21039	20,60536	-10,3027	50
-17,0947	-5,33148	-2,13857	18,5752	-9,2876	60
-16,4874	-4,79264	-0,81576	17,61824	-8,80912	70
-16,6154	-4,78319	0,500925	17,79372	-8,89686	80
-17,3026	-5,20221	1,598722	18,81287	-9,40644	90
-18,2925	-5,88635	2,34791	20,22688	-10,1134	100
-19,3304	-6,66145	2,711191	21,63928	-10,8196	110
-20,2249	-7,38496	2,727258	22,79843	-11,3992	120
-20,8762	-7,96881	2,479803	23,60032	-11,8002	130
-21,2707	-8,38187	2,06488	24,05503	-12,0275	140
-21,4559	-8,63737	1,56592	24,24269	-12,1213	150
-21,5081	-8,77341	1,040245	24,27111	-12,1356	160
-21,5032	-8,83316	0,516466	24,24125	-12,1206	170
-21,4951	-8,8491	5,05E-16	24,22303	-12,1115	180
-21,5064	-8,83633	-0,51687	24,24555	-12,1228	190
-21,5208	-8,78609	-1,0435	24,28843	-12,1442	200
-21,4846	-8,66575	-1,57729	24,28214	-12,1411	210
-21,3216	-8,43173	-2,09306	24,12611	-12,0631	220
-20,9548	-8,04481	-2,53796	23,71252	-11,8563	230
-20,3346	-7,48929	-2,83436	22,95981	-11,4799	240
-19,4700	-6,7916	-2,89372	21,85322	-10,9266	250
-18,4529	-6,03132	-2,64183	20,48478	-10,2424	260
-17,4600	-5,33654	-2,05187	19,07936	-9,53968	270
-16,7214	-4,85712	-1,17561	17,98108	-8,99054	280
-16,4521	-4,71567	-0,15999	17,55636	-8,77818	290
-16,7578	-4,94365	0,763552	17,9922	-8,9961	300
-17,5392	-5,41534	1,32404	19,09929	-9,54965	310
-18,4221	-5,79451	1,294639	20,28026	-10,1401	320
-18,5826	-5,35387	0,491742	20,4086	-10,2043	330
-17,4602	16,81284	4,905432	18,86752	-9,43376	340
-13,6678	8,504792	10,40208	14,08542	-7,04271	350
-5,5729	2,351924	8,597029	7,325494	-3,66275	360
2,6191	-1,00021	7,184534	13,95368	-6,97684	370
2,0920	-2,92687	6,386852	15,61252	-7,80626	380
-4,9224	-4,24687	6,103396	11,98011	-5,99005	390
-10,5182	-5,39491	6,083082	13,00893	-6,50447	400
-13,3865	-6,53079	6,080576	15,1749	-7,58745	410
-15,0056	-7,65168	5,92705	16,84549	-8,42274	420
-16,2370	-8,69201	5,558972	18,37078	-9,18539	430
-17,4922	-9,51493	4,913826	20,03196	-10,016	440
-18,8594	-10,041	4,065523	21,82221	-10,9111	450
-20,2461	-10,2722	3,133218	23,56961	-11,7848	460
-21,5097	-10,2531	2,213147	25,09228	-12,5461	470
-22,4636	-10,0491	1,368295	26,16001	-13,08	480
-23,0198	-9,72623	0,62883	26,69855	-13,3493	490
-23,2021	-9,3362	1,69E-15	26,77233	-13,3862	500

-23,0912	-9,30056	-0,57527	26,50097	-13,2505	510
-22,7906	-8,93668	-1,08223	26,02062	-13,0103	520
-22,3974	-8,79472	-1,62895	25,45235	-12,7262	530
-21,9822	-8,53044	-2,14885	24,8807	-12,4404	540
-21,9712	-8,10533	-2,58428	24,87437	-12,4372	550
-21,6722	-7,50575	-2,85126	24,49429	-12,2471	560
-21,6151	-6,76253	-2,85295	24,4615	-12,2308	570
-21,4225	-5,96366	-2,50465	24,26693	-12,1335	580
-21,0174	-5,25195	-1,76651	23,80196	-11,901	590
-20,3519	-4,80222	-0,67466	22,9853	-11,4927	600
-19,4388	-4,77895	0,642189	21,80534	-10,9027	610
-18,3780	-5,28449	1,971962	20,36399	-10,182	620
-17,3609	-6,315	3,057806	18,91041	-9,45521	630
-16,6427	-7,74112	3,658268	17,83955	-8,91977	640
-16,4812	-9,32359	3,612211	17,60316	-8,80158	650
-17,0539	-10,7625	2,888283	18,49921	-9,24961	660
-18,3853	-11,8186	1,614638	20,47778	-10,2389	670
-20,3107	-12,233	3,68E-15	23,169	-11,5845	680
-22,4955	-12,233	3,68E-15	26,05309	-13,0265	690
-24,5073			28,59536	-14,2977	700
-25,9734			30,40466	-15,2023	710
-26,5366			31,09544	-15,5477	720

## 5 Расчет водяного насоса

Получив необходимую информацию из теплового расчета, можно приступить к решению вопроса о мощности, напоре и потребляемой энергии водяного насоса.

### 5.1 Расход и мощность водяного насоса

Известно, что количество теплоты, которое отводится охлаждающей жидкостью, равно:  $Q_B = 53833 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$ ; средняя теплоемкость жидкости  $c_{\text{ж}} = 4186 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , средняя плотность жидкости  $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; напор, создаваемый насосом, принимается  $p_{\text{ж}} = 135000 \text{ Па}$ ; частота вращения насоса  $n_{\text{вн}} = 6000 \text{ мин}^{-1}$ .

Циркуляционный расход жидкости в системе охлаждения

$$G_{\text{ж}} = \frac{Q_B}{(c_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \Delta T_{\text{ж}})} = \frac{53833}{(4186 \cdot 1000 \cdot 8)} = 0,00161 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}, \quad (5.1)$$

где  $\Delta T_{\text{ж}} = 8 \text{ К}$  - температурный перепад жидкости при принудительной циркуляции.

Производительность по расчетному методу будет равна

$$G_{\text{ж.р}} = \frac{G_{\text{ж}}}{\eta} = \frac{0,00161}{0,9} = 0,00178 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}, \quad (5.2)$$

где  $\eta = 0,9$  - коэффициент подачи насоса.

Далее, радиус ( $r_1$ ) входного отверстия крыльчатки определяется как

$$r_1 = \frac{G_{\text{ж.р}}}{\pi \cdot c_1 + r_0^2} = \frac{0,00178}{3,14 \cdot 1,51 + 0,02^2} = 0,019 \text{ м}, \quad (5.3)$$

где  $c_1 = 1,51$  – это скорость жидкости на входе в водяной насос, м/с;  
 $r_0 = 0,02$  - радиус ступицы крыльчатки, м.

Окружная скорость потока жидкости на выходе из вращающегося колеса

$$u_2 = \frac{p_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} \cdot \eta_h} = \frac{135000}{(1000 \cdot 0,75)} = 15,40 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (5.4)$$

где угол  $\alpha_2 = 15^\circ$ , а угол  $\beta_2 = 40^\circ$ ;  $\eta_h = 0,75$  – гидравлический КПД насоса.

Радиус  $r_2$  крыльчатки колеса на выходе водяного насоса равен

$$r_2 = \frac{30 \cdot u_2}{\pi \cdot n_{\text{в.н}}} = \frac{30 \cdot 15,40}{3,14 \cdot 6000} = 0,0245 \text{ м.} \quad (5.5)$$

Для определения окружной скорости входа потока в водяной насос необходимо применить следующую формулу

$$u_1 = \frac{u_2 \cdot r_1}{r_2} = \frac{15,40 \cdot 0,019}{0,0245} = 11,94 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (5.6)$$

Угол между скоростями  $c_1$  и  $u_1$  принимается как  $\alpha_1 = 90^\circ$ , при этом необходимо определить  $tg\beta_1$ , который равен

$$tg\beta_1 = \frac{c_1}{u_1} = \frac{1,51}{11,94} = 0,1264, \text{ следовательно } \beta_1 = 7,24^\circ \quad (5.7)$$

Ширина лопатки крыльчатки на входе

$$b_1 = \frac{G_{\text{ж.п}}}{2\pi \cdot r_1 \frac{z \cdot \delta_1}{\sin\beta_1} \cdot c_1} = \frac{0,00178}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,019 \frac{7 \cdot 0,003}{\sin 7,24^\circ} \cdot 1,51} = 0,0254 \text{ м,} \quad (5.8)$$

где  $z=7$  – число лопаток на крыльчатке;  $\delta_1 = 0,003$  - толщина лопаток у входа в водяной насос, м.

Для определения радиальной скорости потока на выходе из колеса необходимо произвести расчет согласно следующей формуле

$$c_r = \frac{p_{ж} \cdot \operatorname{tg} \alpha_2}{\rho_{ж} \cdot \eta_h \cdot u_2} = \frac{135000 \cdot \operatorname{tg} 15^\circ}{1000 \cdot 0,75 \cdot 15,40} = 3,13 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (5.9)$$

Соответственно ширина лопатки на выходе будет равна

$$b_2 = \frac{G_{ж,р}}{2\pi \cdot r_2 \cdot \frac{z \cdot \delta_2}{\sin \beta_2} \cdot c_r} = \frac{0,00178}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0245 \cdot \frac{7 \cdot 0,003}{\sin 40^\circ} \cdot 3,13} = 0,0012 \text{ м}, \quad (5.10)$$

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

Теперь можно определить искомое значение мощности, которая потребляется водяным насосом

$$N_{в.н} = \frac{G_{ж,р} \cdot p_{ж}}{(1000 \cdot \eta_m)} = \frac{0,00178 \cdot 135000}{(1000 \cdot 0,8)} = 0,3 \text{ кВт}, \quad (5.11)$$

где  $\eta_m = 0,8$  - механический КПД жидкостного насоса.

На основные показатели (подачу, напор и мощность на валу) центробежного насоса сильно влияет скорость вращения ротора. Применяя соответствующие уравнения, определяется характеристики насоса для 5 режимов работы и строится диаграмма характеристик центробежного насоса, которая отражена в Графической части.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad (5.12)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}; \quad (5.13)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3}; \quad (5.14)$$

Соотношение этих данных называется законом пропорциональности. Выражая из этих уравнений неизвестные величины, получаем следующий вид данных уравнений

$$Q_2 = Q_1 \cdot \frac{n_2}{n_1}; \quad (5.15)$$

$$H_2 = H_1 \cdot \frac{n_2}{n_1}^2; \quad (5.16)$$

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{n_2}{n_1}^3; \quad (5.17)$$

Производительность насоса, исходя из вышеприведенных расчетов, равно 0,00178 м<sup>3</sup>/с (1780 см<sup>3</sup>/с) при 6000 мин<sup>-1</sup>. Используя эти начальные данные и приведенные выше уравнения, получаем таблицу 5.1 зависимости напора от подачи при определенных оборотах.

Таблица 5.1 - Значения подачи и напора при различных оборотах

Напор; Па	Подача; м <sup>3</sup> /с	Обороты; мин <sup>-1</sup>
135000	0,00173	6000
108000	0,00208	5000
81000	0,00260	4000
54000	0,00346	3000
23000	0,00519	2000
9000	0,01038	1000

Исходя из просчитанных данных для разных режимов вращения вала насоса, можно составить таблицу 5.2 расхода жидкости от оборотов коленчатого вала двигателя.

Таблица 5.2 □ Расход жидкости водяного насоса

Обороты коленчатого вала	Расход жидкости водяного насоса
800 об/мин	365 л/час
1100 об/мин	580 л/час
1500 об/мин	1265 л/час
2000 об/мин	2045 л/час
2500 об/мин	2520 л/час
3000 об/мин	3175 л/час
3500 об/мин	3775 л/час

## 5.2 Подбор электродвигателя

Следующим шагом для конструирования нового водяного насоса будет служить выбор самого электродвигателя, который будет приводить в действие вал насоса и вращать крыльчатку.

С точки зрения экономии, для дальнейшей реализации электронасосов необходимо подобрать электродвигатель мощностью 0,3 кВт (300 Вт) из имеющихся на рынке вариантов. Для анализа были выделены несколько электродвигателей, сравнение которых показало, что электродвигатель фирмы ОАО КЗАЕ г. Калуга для использования в отопительной системе автомобиля, отлично подходит для «совмещения» с новой конструкцией водяного насоса, так как имеет достаточную мощность и габариты, позволяющие установить его на прошлое место шкива механического привода.

Диаметр корпуса электродвигателя составляет 64 мм, длина 90 мм, толщина вала 8 мм.

Непосредственно сам электродвигатель имеет 3х проводную регулировочную и питающую систему. Схема работы представлена на рисунке 4.

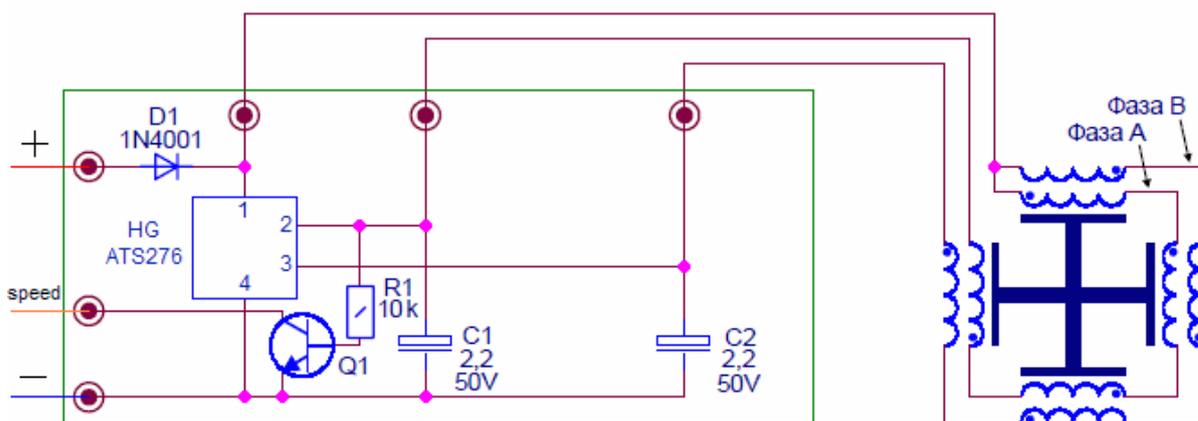


Рисунок 4 - Электрическая схема электродвигателя

Данная схема указана для источника питания в 220В, но такой же вид имеет и схема подключения в 12В.

### 5.3 Описание конструкции водяного насоса

Для использования данного электромотора, как и в случае любого другого, необходимы значительные изменения конструкции водяного насоса, в особенности корпуса водяного насоса и вала.

Новый корпус водяного насоса спроектирован для установки электромотора методом запрессовки, поскольку прочность корпуса электромотора это позволяет, и «углубляется» в корпус водяного насоса на 24 мм. Зацепа контактной поверхности хватает для удержания 2,5 Н м силы, которая может быть в пике работы электромотора.

Как упоминалось ранее, для адаптации электромотора необходимо так же усовершенствовать вал. Во-первых, длина нового вала сокращается в 3 раза и убирается шарико-роликовый подшипник, роль которого теперь выполняет сам электромотор. Во-вторых, для совмещения валов в 8 и 16 мм, в более крупном валу предусмотрено несквозное отверстие глубиной 25 мм, в которое запрессовывается малый вал. Натяг так же обеспечивает силу в 2,5Н·м и предотвращает возможность проворота одного вала, относительно второго.

### 5.4 Алгоритм работы электрического водяного насоса

Поскольку спроектированный водяной насос имеет собственный электромотор, необходимо описать алгоритм работы системы охлаждения в целом. Общий принцип работы схемы схож с работой кулера охлаждения для персонального компьютера. Его схема и легла в основу подключения.

В процессе установки водяного насоса на двигатель, производится его подключение к электронному блоку управления (ЭБУ) с помощью питающего и «sense» провода и к системе электропитания. С помощью программы для настройки ЭБУ вносятся данные об электрифицированном насосе и берется текущее значение температуры двигателя с датчика (так же подключается питающим и «sense» проводом). Каждому значению температуры соответствует скорость вращения водяного насоса. Это

позволяет быстро прогревать мотор до номинальной температуры и поддерживать ее в оптимальном состоянии. Схема подключения представлена на рисунке 5.

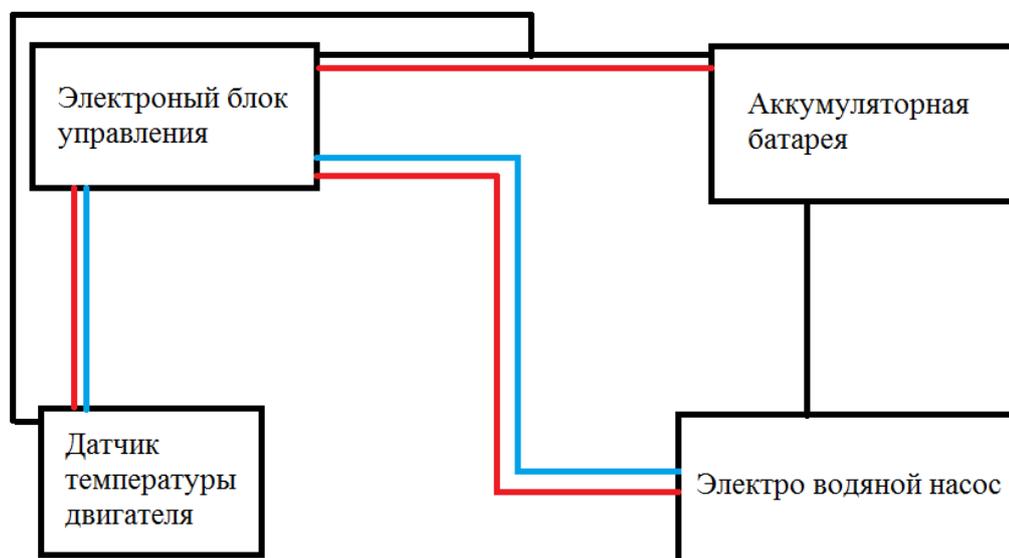


Рисунок 5 - Схема подключения водяного насоса

Рассмотрим несколько возможных ситуаций, с которыми может справиться электрифицированный водяной насос:

1. Температура мотора  $-20^{\circ}\text{C}$  (зимние условия). При запуске двигателя, ЭБУ получает данные об текущей температуре и не включает водяной насос. Охлаждающая жидкость, которая находится вокруг цилиндров прогревается максимально быстро. Для предотвращения сильно разницы температур в блоке цилиндров, ЭБУ подает команду на водяной насос, который в свою очередь начинает вращаться со скоростью меньшей, чем холостые обороты. Это позволяет быстро и равномерно прогреть двигатель до плюсовой температуры.

2. Температура двигателя начинает увеличиваться. Для предотвращения перегрева, ЭБУ считывает показания с датчика температуры и увеличивает скорость вращения водяного насоса. При использовании обычного водяного насоса, его скорость равнялась бы вращению коленчатого вала, но в случае новой конструкции – скорость можно увеличить, не смотря на работу двигателя на холостых оборотах.

3. Поддержание заданной температуры. В ЭБУ закладывается оптимальная температура двигателя (93 °С) и в случае показания датчика температуры выше или ниже данного значения, блок управления дает команду на водяной насос об увеличении или уменьшении оборотов соответственно.

Тем самым, отказавшись от классического ременного привода для водяного насоса, появилась возможность регулировки скорости вращения (а значит и интенсивности напора) и поддержание определенных температур в системе, что исключает возможность перегрева двигателя из-за необеспечения необходимого напора водяным насосом.

## 6 Экологичность и безопасность проекта

### 6.1 Описание проектируемой конструкции

Объектом данной бакалаврской работы является новый водяной насос с электроприводом, что позволяет использовать его на различных режимах работы двигателя при сохранении заданной температуры. В данной конструкции не используется ранее применяемый ролик-шариковый подшипник, поскольку его заменил электродвигатель. Так же конструктивно изменяются корпус водяного насоса и его вал. Кроме этого существует необходимость указания новых задач в блоке управления двигателем для правильной работы водяного насоса и использование для него датчика температур, расположенного на блоке цилиндров.

Поскольку температура двигателя влияет на токсичность, необходимо рассмотреть в каких случаях будет улучшение по данному направлению, особенно в случае быстрого прогрева ДВС в зимний период эксплуатации.

СН – данный компонент практически не изменяется, в отличие от базового двигателя, поскольку количество оборотов двигателя остается прежним.

NO – данный компонент уменьшает свое значение, поскольку применение электрифицированного водяного насоса позволяет более эффективно отводить охлаждающую жидкость от двигателя. Вращение вала насоса может быть больше, чем вращение коленчатого вала двигателя, что и позволяет снизить количество NO в отработавших газах.

CO – данный компонент токсичности остается неизменным, поскольку режимы работы двигателя остаются прежними и водяной насос с электродвигателем может поддерживать оптимальную температуру для сохранения количественной характеристики данного компонента.

Экономичность двигателя за счет нового водяного насоса улучшится, поскольку на режимах холостого хода или запуска будет происходить независимая циркуляция жидкости в полости блока цилиндров и головки, что

соответствует необходимым температурам, которые способствуют улучшению данного показателя.

Температурное влияние на детали двигателя отражает возможности новой системы охлаждения к отводу избыточного количества тепла от деталей и узлов, для обеспечения установленного температурного режима и безотказного и эффективного функционирования.

Температурная нагрузка двигателя и его тепловой поток останется практически неизменным, поскольку отводимое количество тепла будет в таком же количестве, а возможности нового насоса в перенагруженные моменты по температуре позволят вернуть баланс системы в прежнее состояние. Соответственно риски перегрева двигателя по «вине» электрифицированного водяного насоса исключаются.

Так же необходимо рассмотреть такой параметр как шум водяного насоса. Шум, который издает водяной насос, сильно связан с частотой вращения коленчатого вала. Модернизированная конструкция, благодаря использованию электродвигателя, будет иметь иную зависимость, и характерность шума будет снижена.

Изначально в водяном насосе для выбранного двигателя использовался шарико-роликовый подшипник фирмы ООО «ВолгаТехМаш». В результате проработки модернизированной конструкции было принято решение отказаться от данного типа подшипника, поскольку вместо него устанавливается электродвигатель с собственными подшипниками. Поскольку шум от электродвигателя ниже, чем от двигателя в целом, его показатель не скажется на общий шум, который предъявляется к автомобилю (110 дБ(А)), что так же позволяет удовлетворить требования государственного регламента и соответствует собственным техническим требованиям (ТУ), предъявляемым предприятием-изготовителем.

## 6.2 Выводы по главе экологичность и безопасность проекта

1. В сравнении с базовым двигателем, оснащенный стандартным водяным насосом, насос новой конструкции с электроприводом позволяет удерживать нормы токсичности в соответствии с нормативными документами, а тонкая настройка данного узла позволит снизить некоторые показатели, такие как NO, поскольку они сильно зависят от температуры.

2. Показатель шума остается неизменным, поскольку влияние шума электромотора незначительно, относительно автомобиля в целом и позволяет соответствовать техническим условиям и государственным регламентам.

В общей сложности, рассматриваемые показатели удовлетворяют нормам и стандартам по токсичности и шуму без применения дополнительных катализаторов, либо систем шумоизоляции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом данной квалификационной работы может служить модернизированный водяной насос охлаждения с электромотором. Основные его характеристики: максимальная частота вращения –  $6000 \text{ мин}^{-1}$ , напор имеет порядка 14 метров (135 кПа). Потребляемая мощность электромотора составляет 0,3 кВт, которые предварительно «забирались» у двигателя. Базовым двигателем, для которого предназначается данная помпа, является ВАЗ-21179, объемом 1,8 литра, мощностью 90 кВт, крутящим моментом 160 Н м при 4500 об/мин.

При использовании электрического водяного насоса, появляется возможность регулировки его скорости вращения, независимой работы от оборотов коленчатого вала двигателя и поддержание установленных температур охлаждающей жидкости.

Так же исключаются факторы повышенного шума подшипника и его заклинивания (поскольку в данной конструкции его роль выполняет электромотор). С внедрением электрифицированного водяного насоса, показатели по шуму не изменились, следовательно, компоновка модернизированного водяного насоса и двигателя выполняет все требования по шуму, предъявляемые к автомобилю.

## 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. отделение, 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. : Стандартинформ, 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 А

### Результаты теплового расчета

Таблица А1 - Результаты теплового расчета двигателя при  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$

X1-2	$\varphi'1$	$\varphi'1$ рад	$\Delta X1-2$	k1-2	$\sigma$	$\psi(\varphi'1)$	$\psi(\varphi'2)$	T1-2	T1	T2	p1	K1-2	p2
1,86598E-06	345	6,021386	9,32988E-07	1,359746	0,045084	1,209641	1,182845		758,5226	764,6662	1,99333307	6,559482	1,99334666
3,0132E-05	346	6,038839	1,5066E-05	1,359024	0,039321	1,182845	1,157836	761,3222	764,1218	770,6394	2,05500188	6,570653	2,05522586
0,000136683	347	6,056293	6,83417E-05	1,358328	0,033943	1,157836	1,13463	766,8088	769,4957	776,6282	2,11578878	6,581479	2,11682494
0,00037989	348	6,073746	0,000189945	1,357619	0,028953	1,13463	1,113236	772,1676	774,8395	782,9776	2,17585082	6,592541	2,17878439
0,000820373	349	6,091199	0,000410187	1,356842	0,024352	1,113236	1,093667	777,6772	780,5148	790,1964	2,2358248	6,604728	2,24226907
0,001519729	350	6,108652	0,000759864	1,355921	0,020143	1,093667	1,075931	783,7847	787,0546	798,9567	2,29688298	6,619221	2,30900618
0,002539166	351	6,126106	0,001269583	1,35477	0,016329	1,075931	1,060038	791,1087	795,1629	810,0882	2,36076716	6,637448	2,38129539
0,003937718	352	6,143559	0,001968859	1,353295	0,012911	1,060038	1,045995	800,4355	805,7081	824,562	2,42979315	6,660997	2,46198004
0,005769816	353	6,161012	0,002884908	1,351402	0,009892	1,045995	1,033811	812,7073	819,7066	843,4655	2,50681481	6,691488	2,55436828
0,008082118	354	6,178466	0,004041059	1,349016	0,007271	1,033811	1,023491	829,0009	838,2953	867,9627	2,59513722	6,730395	2,66209597
0,010909516	355	6,195919	0,005454758	1,346091	0,005052	1,023491	1,01504	850,4931	862,6909	899,2427	2,69837147	6,778824	2,78892924
0,014270369	356	6,213372	0,007135185	1,342623	0,003234	1,01504	1,008462	878,4132	894,1355	938,4564	2,82023059	6,837313	2,93851325
0,01816112	357	6,230825	0,00908056	1,338658	0,00182	1,008462	1,003762	913,9833	933,831	986,646	2,96427435	6,905665	3,11408244
0,022550613	358	6,248279	0,011275307	1,334286	0,000809	1,003762	1,000941	958,3477	982,8645	1044,67	3,13361962	6,982895	3,31815351
0,027374631	359	6,265732	0,013687315	1,329636	0,000202	1,000941	1	1012,498	1042,132	1113,131	3,3306385	7,067296	3,55222398
0,032531359	360	6,283185	0,01626568	1,324853	0	1	1,000941	1077,196	1112,261	1192,307	3,55666721	7,156628	3,8164973
0,037878696	361	6,300639	0,018939348	1,320084	0,000202	1,000941	1,003762	1152,901	1193,541	1282,09	3,81174661	7,248369	4,10965296

0,043234409	362	6,318092	0,021617204	1,315458	0,000809	1,003762	1,008462	1239,7	1285,86	1381,936	4,09441149	7,339988	4,42867974
0,048380206	363	6,335545	0,024190103	1,311083	0,00182	1,008462	1,01504	1337,256	1388,652	1490,831	4,40154529	7,429162	4,76879225
0,053070543	364	6,352998	0,026535271	1,307034	0,003234	1,01504	1,023491	1444,758	1500,864	1607,28	4,7283184	7,513937	5,12345394
0,057046644	365	6,370452	0,028523322	1,303361	0,005052	1,023491	1,033811	1560,902	1620,94	1729,32	5,06823048	7,592795	5,4845292
0,060055492	366	6,387905	0,030027746	1,30009	0,007271	1,033811	1,045995	1683,891	1746,841	1854,575	5,41327712	7,664665	5,84258187
0,061872688	367	6,405358	0,030936344	1,297226	0,009892	1,045995	1,060038	1811,469	1876,096	1980,343	5,75425509	7,728887	6,18732406
0,062327049	368	6,422812	0,031163525	1,294761	0,012911	1,060038	1,075931	1940,998	2005,9	2103,73	6,08120832	7,785159	6,50820029
0,061323862	369	6,440265	0,030661931	1,292677	0,016329	1,075931	1,093667	2069,572	2133,245	2221,807	6,38399814	7,833474	6,79506864
0,058863094	370	6,457718	0,029431547	1,290949	0,020143	1,093667	1,113236	2194,166	2255,088	2331,793	6,65295988	7,87406	7,03891837
0,055048809	371	6,475172	0,027524405	1,289548	0,024352	1,113236	1,13463	2311,816	2368,544	2431,243	6,87958709	7,907329	7,23254603
0,050086784	372	6,492625	0,025043392	1,288441	0,028953	1,13463	1,157836	2419,81	2471,075	2518,213	7,05716875	7,933836	7,37110547
0,044268931	373	6,510078	0,022134465	1,287595	0,033943	1,157836	1,182845	2515,871	2560,667	2591,392	7,1812999	7,954234	7,45245469
0,03794541	374	6,527531	0,018972705	1,286975	0,039321	1,182845	1,209641	2598,315	2635,963	2650,18	7,2501935	7,969238	7,47724488
0,031487825	375	6,544985	0,015743913	1,28655	0,045084	1,209641	1,238213	2666,155	2696,347	2694,69	7,26474407	7,979594	7,44873308
0,025249038	376	6,562438	0,012624519	1,286285	0,051229	1,238213	1,268546	2719,146	2741,946	2725,695	7,22832768	7,986046	7,37234252
0,019526271	377	6,579891	0,009763136	1,286151	0,057752	1,268546	1,300625	2757,758	2773,569	2744,497	7,14636394	7,989305	7,25503575
0,014533785	378	6,597345	0,007266893	1,286122	0,064651	1,300625	1,334433	2783,076	2792,582	2752,769	7,02570389	7,990026	7,10459529
0,010389525	379	6,614798	0,005194763	1,286173	0,071921	1,334433	1,369953	2796,655	2800,729	2752,364	6,87393513	7,988792	6,9289168
0,007117109	380	6,632251	0,003558554	1,286283	0,07956	1,369953	1,407168	2800,336	2799,943	2745,14	6,69870468	7,986098	6,73540915
0,004661194	381	6,649704	0,002330597	1,286436	0,087563	1,407168	1,446059	2796,053	2792,162	2732,818	6,50714869	7,982353	6,53056593
0,002911612	382	6,667158	0,001455806	1,28662	0,095927	1,446059	1,486606	2785,668	2779,174	2716,873	6,30548939	7,977874	6,31973355
0,00173034	383	6,684611	0,00086517	1,286825	0,104646	1,486606	1,528789	2770,845	2762,516	2698,495	6,09882176	7,9729	6,10706233
0,000975829	384	6,702064	0,000487915	1,287043	0,113718	1,528789	1,572587	2752,968	2743,42	2678,582	5,89107541	7,967602	5,8955981
0,000520842	385	6,719518	0,000260421	1,28727	0,123137	1,572587	1,617978	2733,12	2722,819	2657,774	5,68511009	7,962095	5,68745874
0,000262384	386	6,736971	0,000131192	1,287503	0,132899	1,617978	1,664939	2712,095	2701,371	2636,501	5,48289097	7,956453	5,48404192

0,000124406	387	6,754424	6,22029E-05	1,28774	0,142998	1,664939	1,713447	2690,444	2679,517	2615,038	5,28569228	7,950723	5,28622304
5,53546E-05	388	6,771877	2,76773E-05	1,28798	0,153429	1,713447	1,763477	2668,527	2657,537	2593,556	5,09429001	7,944932	5,09451968
2,3045E-05	389	6,789331	1,15225E-05	1,288222	0,164189	1,763477	1,815005	2646,568	2635,6	2572,155	4,90912126	7,939099	4,90921425
8,94909E-06	390	6,806784	4,47454E-06	1,288466	0,17527	1,815005	1,868006	2624,703	2613,806	2550,9	4,73040283	7,933233	4,73043794
3,23138E-06	391	6,824237	1,61569E-06	1,288711	0,186668	1,868006	1,922451	2603,01	2592,215	2529,831	4,55821193	7,927345	4,55822426
1,08144E-06	392	6,841691	5,40718E-07	1,288957	0,198377	1,922451	1,978316	2581,538	2570,861	2508,975	4,39253753	7,92144	4,39254155
3,34332E-07	393	6,859144	1,67166E-07	1,289204	0,21039	1,978316	2,035571	2560,315	2549,769	2488,355	4,2333113	7,915523	4,23331251
9,51576E-08	394	6,876597	4,75788E-08	1,289452	0,222703	2,035571	2,094189	2539,362	2528,955	2467,987	4,08042594	7,909602	4,08042628
2,48478E-08	395	6,894051	1,24239E-08	1,289701	0,235309	2,094189	2,154141	2518,694	2508,432	2447,884	3,93374635	7,903679	3,93374644
5,93155E-09	396	6,911504	2,96578E-09	1,289949	0,248202	2,154141	2,215397	2498,322	2488,211	2428,06	3,79311693	7,89776	3,79311695
1,28974E-09	397	6,928957	6,44871E-10	1,290198	0,261376	2,215397	2,277927	2478,255	2468,298	2408,522	3,65836683	7,891849	3,65836683
2,54493E-10	398	6,94641	1,27247E-10	1,290446	0,274823	2,277927	2,341701	2458,5	2448,701	2389,28	3,52931401	7,88595	3,52931401
4,53982E-11	399	6,963864	2,26991E-11	1,290695	0,288538	2,341701	2,406687	2439,063	2429,425	2370,34	3,40576863	7,880066	3,40576863
7,29299E-12	400	6,981317	3,64649E-12	1,290943	0,302513	2,406687	2,472854	2419,949	2410,473	2351,706	3,2875358	7,874201	3,2875358
1,05088E-12	401	6,99877	5,25442E-13	1,29119	0,316743	2,472854	2,540169	2401,16	2391,847	2333,383	3,17441799	7,868358	3,17441799
1,35279E-13	402	7,016224	6,76394E-14	1,291437	0,331219	2,540169	2,6086	2382,698	2373,55	2315,372	3,06621694	7,862541	3,06621694
1,54931E-14	403	7,033677	7,74656E-15	1,291683	0,345935	2,6086	2,678113	2364,565	2355,581	2297,676	2,96273532	7,856751	2,96273532
1,57201E-15	404	7,05113	7,86003E-16	1,291929	0,360884	2,678113	2,748675	2346,761	2337,94	2280,295	2,86377809	7,850991	2,86377809
1,40706E-16	405	7,068583	7,03529E-17	1,292173	0,376059	2,748675	2,820253	2329,284	2320,627	2263,229	2,76915353	7,845264	2,76915353
1,10614E-17	406	7,086037	5,53072E-18	1,292416	0,391452	2,820253	2,892811	2312,134	2303,64	2246,477	2,67867414	7,839571	2,67867414
7,60356E-19	407	7,10349	3,80178E-19	1,292658	0,407056	2,892811	2,966316	2295,308	2286,977	2230,038	2,59215733	7,833916	2,59215733
4,54941E-20	408	7,120943	2,27471E-20	1,292899	0,422864	2,966316	3,040732	2278,805	2270,634	2213,911	2,50942585	7,828299	2,50942585
2,35839E-21	409	7,138397	1,1792E-21	1,293138	0,438867	3,040732	3,116024	2262,622	2254,61	2198,091	2,43030827	7,822722	2,43030827
1,05427E-22	410	7,15585	5,27136E-23	1,293376	0,455059	3,116024	3,192156	2246,755	2238,9	2182,578	2,35463916	7,817188	2,35463916
4,04466E-24	411	7,173303	2,02233E-24	1,293613	0,471432	3,192156	3,269094	2231,201	2223,502	2167,367	2,28225928	7,811697	2,28225928

1,3252E-25	412	7,190757	6,626E-26	1,293848	0,487977	3,269094	3,346799	2215,956	2208,41	2152,455	2,21301565	7,806251	2,21301565
3,68971E-27	413	7,20821	1,84485E-27	1,294081	0,504688	3,346799	3,425238	2201,016	2193,622	2137,839	2,14676159	7,80085	2,14676159
8,68597E-29	414	7,225663	4,34298E-29		0,521557	3,425238	3,504372	2186,377	2179,132	0	2,08335664		
1,71998E-30	415	7,243116	8,59992E-31		0,538575	3,504372	1		0				

Таблица А2 - Результаты теплового расчета двигателя при  $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$

X1-2	$\varphi'1$	$\varphi'1 \text{ рад}$	$\Delta X1-2$	k1-2	$\sigma$	$\psi(\varphi'1)$	$\psi(\varphi'2)$	T1-2	T1	T2	p1	K1-2	p2
5,0545E-07	340	5,934119	2,52725E-07	1,36618	0,07956	1,369953	1,334433		712,23	719,1173	1,6229	6,461795	1,62290357
8,78426E-06	341	5,951573	4,39213E-06	1,365182	0,071921	1,334433	1,300625	715,6185	719,007	725,9164	1,68221019	6,476714	1,68227365
4,1711E-05	342	5,969026	2,08555E-05	1,364215	0,064651	1,300625	1,268546	722,3402	725,6735	732,679	1,74225559	6,491262	1,74256398
0,000119723	343	5,986479	5,98614E-05	1,363264	0,057752	1,268546	1,238213	728,9776	732,2818	739,5181	1,80295667	6,505636	1,80386199
0,000265047	344	6,003933	0,000132523	1,362308	0,051229	1,238213	1,209641	735,6143	738,9468	746,6128	1,86437369	6,520161	1,86642194
0,000501166	345	6,021386	0,000250583	1,361318	0,045084	1,209641	1,182845	742,399	745,8512	754,2117	1,92673803	6,535295	1,93069231
0,000852438	346	6,038839	0,000426219	1,360255	0,039321	1,182845	1,157836	749,5502	753,2493	762,6343	1,9904797	6,551616	1,99733906
0,001343731	347	6,056293	0,000671866	1,359078	0,033943	1,157836	1,13463	757,3587	761,468	772,2714	2,05625029	6,569816	2,0672627
0,001999996	348	6,073746	0,000999998	1,357739	0,028953	1,13463	1,113236	766,1878	770,9075	783,5821	2,12493887	6,590671	2,14160623
0,002845742	349	6,091199	0,001422871	1,356188	0,024352	1,113236	1,093667	776,4728	782,0381	797,0892	2,19767833	6,615014	2,22175066
0,003904381	350	6,108652	0,001952191	1,354379	0,020143	1,093667	1,075931	788,7166	795,3952	813,37	2,27583842	6,643677	2,30929467
0,005197404	351	6,126106	0,002598702	1,352272	0,016329	1,075931	1,060038	803,4828	811,5704	833,0447	2,36100257	6,677437	2,40601575
0,006743387	352	6,143559	0,003371693	1,349838	0,012911	1,060038	1,045995	821,3849	831,1994	856,7603	2,45492566	6,716939	2,51381088
0,008556808	353	6,161012	0,004278404	1,347064	0,009892	1,045995	1,033811	843,0721	854,9448	885,1705	2,55947153	6,762622	2,63461706
0,010646697	354	6,178466	0,005323348	1,343958	0,007271	1,033811	1,023491	869,2106	883,4764	918,913	2,67653077	6,814656	2,77031352
0,013015123	355	6,195919	0,006507561	1,340548	0,005052	1,023491	1,01504	900,462	917,4475	958,5847	2,80792117	6,872891	2,92260983
0,015655601	356	6,213372	0,0078278	1,336879	0,003234	1,01504	1,008462	937,4586	957,4697	1004,715	2,95527569	6,936845	3,09292545
0,018551465	357	6,230825	0,009275732	1,333016	0,00182	1,008462	1,003762	980,7775	1004,085	1057,74	3,11992373	7,005719	3,28226718
0,02167434	358	6,248279	0,01083717	1,329031	0,000809	1,003762	1,000941	1030,913	1057,74	1117,974	3,30277247	7,078455	3,49111112
0,024982844	359	6,265732	0,012491422	1,325002	0,000202	1,000941	1	1088,249	1118,758	1185,587	3,50419505	7,15381	3,71929555
0,028421688	360	6,283185	0,014210844	1,321004	0	1	1,000941	1153,036	1187,313	1260,581	3,72393154	7,230453	3,96593081

0,031921378	361	6,300639	0,015960689	1,317105	0,000202	1,000941	1,003762	1225,36	1263,407	1342,764	3,96100844	7,307056	4,22933216
0,035398701	362	6,318092	0,017699351	1,313363	0,000809	1,003762	1,008462	1305,128	1346,848	1431,743	4,21368216	7,382369	4,50698194
0,038758205	363	6,335545	0,019379102	1,309824	0,00182	1,008462	1,01504	1392,04	1437,232	1526,899	4,47941158	7,455288	4,79552695
0,041894812	364	6,352998	0,020947406	1,306519	0,003234	1,01504	1,023491	1485,581	1533,931	1627,394	4,75486511	7,524881	5,0908172
0,044697656	365	6,370452	0,022348828	1,303471	0,005052	1,023491	1,033811	1585,009	1636,088	1732,166	5,03596702	7,59041	5,38799045
0,047055128	366	6,387905	0,023527564	1,300692	0,007271	1,033811	1,045995	1689,355	1742,621	1839,948	5,31798669	7,65133	5,681605
0,04886097	367	6,405358	0,024430485	1,298184	0,009892	1,045995	1,060038	1797,429	1852,238	1949,29	5,59567239	7,707269	5,96581998
0,050021133	368	6,422812	0,025010567	1,295945	0,012911	1,060038	1,075931	1907,848	1963,459	2058,605	5,86342823	7,758014	6,23461792
0,050460909	369	6,440265	0,025230455	1,293967	0,016329	1,075931	1,093667	2019,063	2074,666	2166,214	6,11552904	7,803488	6,48206021
0,050131739	370	6,457718	0,025065869	1,292239	0,020143	1,093667	1,113236	2129,405	2184,145	2270,41	6,3463637	7,843722	6,70256109
0,049016968	371	6,475172	0,024508484	1,290747	0,024352	1,113236	1,13463	2237,15	2290,154	2369,528	6,55069364	7,878841	6,89116225
0,047135812	372	6,492625	0,023567906	1,289476	0,028953	1,13463	1,157836	2340,575	2390,995	2462,014	6,72390947	7,909044	7,04378769
0,044544847	373	6,510078	0,022272424	1,288409	0,033943	1,157836	1,182845	2438,039	2485,083	2546,501	6,86226671	7,934587	7,15745744
0,04133653	374	6,527531	0,020668265	1,287531	0,039321	1,182845	1,209641	2528,053	2571,023	2621,871	6,96308129	7,955772	7,23044106
0,037634539	375	6,544985	0,018817269	1,286823	0,045084	1,209641	1,238213	2609,349	2647,674	2687,304	7,02486689	7,972935	7,26233553
0,033586108	376	6,562438	0,016793054	1,286269	0,051229	1,238213	1,268546	2680,938	2714,202	2742,315	7,04740053	7,986435	7,25405857
0,029351938	377	6,579891	0,014675969	1,285851	0,057752	1,268546	1,300625	2742,157	2770,112	2786,771	7,03170836	7,996644	7,20775647
0,02509464	378	6,597345	0,01254732	1,285553	0,064651	1,300625	1,334433	2792,691	2815,269	2820,873	6,97997144	8,003942	7,12663405
0,020966951	379	6,614798	0,010483475	1,28536	0,071921	1,334433	1,369953	2832,576	2849,882	2845,136	6,89535899	8,0087	7,01472258
0,017101059	380	6,632251	0,00855053	1,285255	0,07956	1,369953	1,407168	2862,18	2874,478	2860,332	6,78180443	8,01128	6,87660788
0,013600287	381	6,649704	0,006800144	1,285224	0,087563	1,407168	1,446059	2882,162	2889,847	2867,428	6,64374538	8,012025	6,71714469
0,010534048	382	6,667158	0,005267024	1,285256	0,095927	1,446059	1,486606	2893,412	2896,977	2867,514	6,48585207	8,011253	6,54118354
0,007936527	383	6,684611	0,003968264	1,285337	0,104646	1,486606	1,528789	2896,98	2896,984	2861,727	6,31276905	8,009251	6,35333325
0,005808994	384	6,702064	0,002904497	1,285458	0,113718	1,528789	1,572587	2894,006	2891,029	2851,186	6,12889169	8,006273	6,15777613
0,004125106	385	6,719518	0,002062553	1,285611	0,123137	1,572587	1,617978	2885,643	2880,256	2836,935	5,93819349	8,002539	5,95814505
0,002838203	386	6,736971	0,001419101	1,285786	0,132899	1,617978	1,664939	2872,994	2865,731	2819,901	5,74411243	7,998233	5,75746318
0,001889373	387	6,754424	0,000944686	1,28598	0,142998	1,664939	1,713447	2857,065	2848,4	2800,872	5,54949689	7,993505	5,55813971
0,001215155	388	6,771877	0,000607577	1,286185	0,153429	1,713447	1,763477	2838,733	2829,067	2780,49	5,35660474	7,988475	5,36200998
0,000753947	389	6,789331	0,000376974	1,2864	0,164189	1,763477	1,815005	2818,726	2808,385	2759,256	5,16714402	7,983231	5,17040505

0,000450592	390	6,806784	0,000225296	1,286622	0,17527	1,815005	1,868006	2797,625	2786,864	2737,544	4,98234155	7,977843	4,98423662
0,000258988	391	6,824237	0,000129494	1,286847	0,186668	1,868006	1,922451	2775,875	2764,885	2715,625	4,8030253	7,972359	4,80408445
0,000142932	392	6,841691	7,14659E-05	1,287075	0,198377	1,922451	1,978316	2753,803	2742,721	2693,686	4,62970895	7,966811	4,63027738
7,56168E-05	393	6,859144	3,78084E-05	1,287306	0,21039	1,978316	2,035571	2731,64	2720,56	2671,853	4,4626698	7,961225	4,46296226
3,82836E-05	394	6,876597	1,91418E-05	1,287537	0,222703	2,035571	2,094189	2709,545	2698,53	2650,208	4,30201496	7,955615	4,30215897
1,85165E-05	395	6,894051	9,25827E-06	1,28777	0,235309	2,094189	2,154141	2687,62	2676,71	2628,804	4,14773391	7,949994	4,14780167
8,54067E-06	396	6,911504	4,27033E-06	1,288003	0,248202	2,154141	2,215397	2665,932	2655,154	2607,675	3,9997378	7,944368	3,99976821
3,74991E-06	397	6,928957	1,87496E-06	1,288237	0,261376	2,215397	2,277927	2644,523	2633,892	2586,842	3,85788738	7,938745	3,85790037
1,56438E-06	398	6,94641	7,82192E-07	1,28847	0,274823	2,277927	2,341701	2623,419	2612,946	2566,318	3,72201203	7,933128	3,7220173
6,18922E-07	399	6,963864	3,09461E-07	1,288704	0,288538	2,341701	2,406687	2602,636	2592,326	2546,115	3,59192231	7,927522	3,59192434
2,3177E-07	400	6,981317	1,15885E-07	1,288937	0,302513	2,406687	2,472854	2582,184	2572,042	2526,237	3,46741809	7,921931	3,46741883
8,19885E-08	401	6,99877	4,09942E-08	1,28917	0,316743	2,472854	2,540169	2562,07	2552,098	2506,69	3,34829381	7,916357	3,34829406
2,73429E-08	402	7,016224	1,36714E-08	1,289402	0,331219	2,540169	2,6086	2542,298	2532,498	2487,476	3,23434197	7,910805	3,23434205
8,57905E-09	403	7,033677	4,28952E-09	1,289634	0,345935	2,6086	2,678113	2522,87	2513,243	2468,598	3,12535552	7,905277	3,12535555
2,52712E-09	404	7,05113	1,26356E-09	1,289865	0,360884	2,678113	2,748675	2503,788	2494,333	2450,055	3,02112959	7,899774	3,0211296
6,97392E-10	405	7,068583	3,48696E-10	1,290095	0,376059	2,748675	2,820253	2485,051	2475,769	2431,849	2,9214627	7,894301	2,9214627
1,79906E-10	406	7,086037	8,99528E-11	1,290324	0,391452	2,820253	2,892811	2466,659	2457,55	2413,977	2,82615778	7,888858	2,82615778
4,32877E-11	407	7,10349	2,16439E-11	1,290552	0,407056	2,892811	2,966316	2448,612	2439,673	2396,44	2,73502286	7,883449	2,73502286
9,69291E-12	408	7,120943	4,84645E-12	1,290779	0,422864	2,966316	3,040732	2430,905	2422,137	2379,233	2,64787162	7,878074	2,64787162
2,01518E-12	409	7,138397	1,00759E-12		0,438867	3,040732	3,116024	2413,539	2404,94	0	2,56452382		
3,88082E-13	410	7,15585	1,94041E-13		0,455059	3,116024	1		0				

Таблица А3 - Результаты теплового расчета двигателя при  $n = 3750 \text{ мин}^{-1}$

X1-2	$\varphi'1$	$\varphi'1 \text{ рад}$	$\Delta X1-2$	k1-2	$\sigma$	$\psi(\varphi'1)$	$\psi(\varphi'2)$	T1-2	T1	T2	p1	K1-2	p2
1,56064E-07	337	5,88176	7,80319E-08	1,370194	0,104646	1,486606	1,446059		686,278	693,3417	1,40825435	6,402568	1,40825538
2,91812E-06	338	5,899213	1,45906E-06	1,36908	0,095927	1,446059	1,407168	689,7832	693,2884	700,3642	1,46264266	6,418876	1,46266248
1,45018E-05	339	5,916666	7,2509E-06	1,367997	0,087563	1,407168	1,369953	696,7641	700,2399	707,3544	1,5182906	6,434834	1,51839151
4,29786E-05	340	5,934119	2,14893E-05	1,366939	0,07956	1,369953	1,334433	703,6901	707,1404	714,3451	1,57510109	6,450499	1,57540743

9,75115E-05	341	5,951573	4,87558E-05	1,365899	0,071921	1,334433	1,300625	710,5815	714,0227	721,3969	1,63301095	6,465987	1,63372257
0,000188094	342	5,969026	9,40471E-05	1,364865	0,064651	1,300625	1,268546	717,4852	720,9478	728,6005	1,69200453	6,481472	1,69340909
0,000325389	343	5,986479	0,000162694	1,363822	0,057752	1,268546	1,238213	724,4778	728,0078	736,0782	1,75212667	6,497189	1,75461115
0,000520598	344	6,003933	0,000260299	1,362751	0,051229	1,238213	1,209641	731,6675	735,3273	743,9858	1,81349521	6,51343	1,81755624
0,000785346	345	6,021386	0,000392673	1,361628	0,045084	1,209641	1,182845	739,1964	743,0654	752,5131	1,87631254	6,530544	1,8825652
0,001131544	346	6,038839	0,000565772	1,36043	0,039321	1,182845	1,157836	747,2408	751,4162	761,884	1,94087575	6,548927	1,95006009
0,001571246	347	6,056293	0,000785623	1,35913	0,033943	1,157836	1,13463	756,0126	760,609	772,3561	2,00758432	6,569017	2,02056875
0,002116465	348	6,073746	0,001058232	1,3577	0,028953	1,13463	1,113236	765,7582	770,9074	784,2184	2,07694433	6,591275	2,09472501
0,002778955	349	6,091199	0,001389477	1,356115	0,024352	1,113236	1,093667	776,7577	782,608	797,7893	2,14956807	6,616169	2,17326332
0,003569951	350	6,108652	0,001784975	1,354349	0,020143	1,093667	1,075931	789,3226	796,0372	813,412	2,22616778	6,644152	2,25700655
0,004499856	351	6,126106	0,002249928	1,352383	0,016329	1,075931	1,060038	803,7922	811,5471	831,4489	2,30754253	6,675635	2,34684642
0,005577873	352	6,143559	0,002788937	1,350204	0,012911	1,060038	1,045995	820,5286	829,51	852,2755	2,39455751	6,710955	2,44371581
0,006811585	353	6,161012	0,003405792	1,347805	0,009892	1,045995	1,033811	839,9106	850,3112	876,2717	2,48811543	6,750352	2,54855336
0,008206474	354	6,178466	0,004103237	1,345188	0,007271	1,033811	1,023491	862,3261	874,341	903,8129	2,58912036	6,793936	2,66226097
0,009765401	355	6,195919	0,0048827	1,342368	0,005052	1,023491	1,01504	888,163	901,985	935,2596	2,69843508	6,841675	2,78565584
0,011488037	356	6,213372	0,005744019	1,339364	0,003234	1,01504	1,008462	917,7994	933,6138	970,9468	2,81683348	6,893376	2,91941895
0,013370283	357	6,230825	0,006685141	1,336208	0,00182	1,008462	1,003762	951,593	969,5722	1011,173	2,94495025	6,948694	3,06404253
0,015403673	358	6,248279	0,007701836	1,332937	0,000809	1,003762	1,000941	989,8696	1010,167	1056,188	3,08323049	7,007141	3,21977905
0,017574821	359	6,265732	0,008787411	1,329592	0,000202	1,000941	1	1032,912	1055,657	1106,184	3,23188162	7,068107	3,38659457
0,019864926	360	6,283185	0,009932463	1,326217	0	1	1,000941	1080,947	1106,238	1161,281	3,39083049	7,130897	3,5641287
0,022249379	361	6,300639	0,011124689	1,322853	0,000202	1,000941	1,003762	1134,138	1162,038	1221,519	3,55968759	7,194765	3,75166359
0,024697531	362	6,318092	0,012348765	1,319543	0,000809	1,003762	1,008462	1192,57	1223,101	1286,85	3,73772066	7,258948	3,94810388
0,027172671	363	6,335545	0,013586336	1,31632	0,00182	1,008462	1,01504	1256,239	1289,377	1357,124	3,92383904	7,322706	4,15196903
0,029632258	364	6,352998	0,014816129	1,313217	0,003234	1,01504	1,023491	1325,047	1360,717	1432,087	4,11659012	7,385347	4,36139966
0,032028464	365	6,370452	0,016014232	1,310258	0,005052	1,023491	1,033811	1398,791	1436,865	1511,373	4,31416886	7,446249	4,57417852
0,034309071	366	6,387905	0,017154536	1,307462	0,007271	1,033811	1,045995	1477,157	1517,45	1594,503	4,51444084	7,504875	4,78776684
0,036418742	367	6,405358	0,018209371	1,304842	0,009892	1,045995	1,060038	1559,716	1601,982	1680,884	4,71497923	7,560778	4,99935585
0,038300674	368	6,422812	0,019150337	1,302407	0,012911	1,060038	1,075931	1645,921	1689,859	1769,811	4,91311532	7,613605	5,20593282
0,039898615	369	6,440265	0,019949308	1,300161	0,016329	1,075931	1,093667	1735,112	1780,365	1860,482	5,10600201	7,66309	5,40436028

0,041159188	370	6,457718	0,020579594	1,298105	0,020143	1,093667	1,113236	1826,523	1872,68	1952,003	5,29068864	7,709049	5,59146607
0,042034428	371	6,475172	0,021017214	1,296236	0,024352	1,113236	1,13463	1919,287	1965,894	2043,412	5,46420537	7,751371	5,76414117
0,04248441	372	6,492625	0,021242205	1,29455	0,028953	1,13463	1,157836	2012,459	2059,024	2133,696	5,62365415	7,790009	5,9194416
0,04247981	373	6,510078	0,021239905	1,293042	0,033943	1,157836	1,182845	2105,03	2151,037	2221,82	5,76630285	7,82497	6,05468985
0,042004199	374	6,527531	0,0210021	1,291702	0,039321	1,182845	1,209641	2195,956	2240,876	2306,757	5,88967862	7,856308	6,16757098
0,041055885	375	6,544985	0,020527943	1,290524	0,045084	1,209641	1,238213	2284,183	2327,491	2387,517	5,99165609	7,884115	6,25621836
0,039649094	376	6,562438	0,019824547	1,289498	0,051229	1,238213	1,268546	2368,68	2409,87	2463,18	6,07053568	7,908513	6,31928415
0,037814328	377	6,579891	0,018907164	1,288615	0,057752	1,268546	1,300625	2448,471	2487,072	2532,926	6,12510774	7,929653	6,35599011
0,035597768	378	6,597345	0,017798884	1,287865	0,064651	1,300625	1,334433	2522,666	2558,26	2596,066	6,15469841	7,947705	6,36615523
0,033059674	379	6,614798	0,016529837	1,287238	0,071921	1,334433	1,369953	2590,494	2622,727	2652,064	6,15919398	7,962857	6,35019791
0,030271804	380	6,632251	0,015135902	1,286726	0,07956	1,369953	1,407168	2651,326	2679,925	2700,554	6,13904169	7,975308	6,30911192
0,027313987	381	6,649704	0,013656993	1,286317	0,087563	1,407168	1,446059	2704,701	2729,477	2741,349	6,09522615	7,985267	6,24441704
0,02427006	382	6,667158	0,01213503	1,286002	0,095927	1,446059	1,486606	2750,334	2771,192	2774,448	6,02922229	7,992948	6,15808699
0,021223469	383	6,684611	0,010611734	1,285773	0,104646	1,486606	1,528789	2788,13	2805,068	2800,026	5,94292726	7,998567	6,05245906
0,018252885	384	6,702064	0,009126442	1,285619	0,113718	1,528789	1,572587	2818,174	2831,28	2818,416	5,83857518	8,002341	5,93013093
0,015428202	385	6,719518	0,007714101	1,285532	0,123137	1,572587	1,617978	2840,726	2850,171	2830,096	5,71864009	8,004481	5,79385128
0,012807256	386	6,736971	0,006403628	1,285503	0,132899	1,617978	1,664939	2856,198	2862,225	2835,649	5,58573312	8,005192	5,64641109
0,010433535	387	6,754424	0,005216768	1,285524	0,142998	1,664939	1,713447	2865,132	2868,039	2835,741	5,44250036	8,00467	5,49054225
0,008335057	388	6,771877	0,004167528	1,285588	0,153429	1,713447	1,763477	2868,166	2868,294	2831,083	5,29152761	8,003099	5,32882914
0,00652445	389	6,789331	0,003262225	1,285688	0,164189	1,763477	1,815005	2866,003	2863,713	2822,398	5,13525739	8,000651	5,16363766
0,005000156	390	6,806784	0,002500078	1,285817	0,17527	1,815005	1,868006	2859,374	2855,036	2810,392	4,97592248	7,99748	4,9970644
0,003748549	391	6,824237	0,001874274	1,285971	0,186668	1,868006	1,922451	2849,009	2842,983	2795,729	4,81549822	7,993727	4,83090652
0,00274668	392	6,841691	0,00137334	1,286143	0,198377	1,922451	1,978316	2835,608	2828,233	2779,01	4,6556747	7,989513	4,6666516
0,001965319	393	6,859144	0,00098266	1,28633	0,21039	1,978316	2,035571	2819,816	2811,399	2760,767	4,4978475	7,984943	4,50548485
0,001371965	394	6,876597	0,000685982	1,286529	0,222703	2,035571	2,094189	2802,212	2793,024	2741,447	4,34312498	7,980106	4,34831005
0,000933537	395	6,894051	0,000466769	1,286735	0,235309	2,094189	2,154141	2783,293	2773,563	2721,422	4,19234851	7,975073	4,19578027
0,000618562	396	6,911504	0,000309281	1,286948	0,248202	2,154141	2,215397	2763,479	2753,395	2700,985	4,04612191	7,969902	4,0483341
0,000398724	397	6,928957	0,000199362	1,287165	0,261376	2,215397	2,277927	2743,108	2732,82	2680,366	3,90484608	7,96464	3,90623363
0,000249781	398	6,94641	0,000124891	1,287384	0,274823	2,277927	2,341701	2722,445	2712,069	2659,732	3,76875528	7,95932	3,76960127

0,000151915	399	6,963864	7,59577E-05	1,287606	0,288538	2,341701	2,406687	2701,692	2691,314	2639,209	3,63795217	7,953968	3,63845305
8,96064E-05	400	6,981317	4,48032E-05	1,287828	0,302513	2,406687	2,472854	2680,998	2670,681	2618,883	3,51243957	7,948603	3,51272725
5,12041E-05	401	6,99877	2,56021E-05	1,28805	0,316743	2,472854	2,540169	2660,468	2650,255	2598,811	3,39214769	7,943238	3,3923078
2,83153E-05	402	7,016224	1,41576E-05	1,288272	0,331219	2,540169	2,6086	2640,176	2630,096	2579,031	3,27695635	7,937884	3,2770426
1,51356E-05	403	7,033677	7,5678E-06	1,288494	0,345935	2,6086	2,678113	2620,168	2610,241	2559,568	3,16671232	7,932547	3,16675725
7,81165E-06	404	7,05113	3,90582E-06	1,288716	0,360884	2,678113	2,748675	2600,477	2590,713	2540,436	3,06124234	7,927232	3,06126495
3,88813E-06	405	7,068583	1,94406E-06	1,288936	0,376059	2,748675	2,820253	2581,119	2571,526	2521,642	2,96036246	7,921943	2,96037343
1,86412E-06	406	7,086037	9,32062E-07		0,391452	2,820253	2,892811	2562,106	2552,686	0	2,86388446		
8,59837E-07	407	7,10349	4,29918E-07		0,407056	2,892811	1		0				

Таблица А4 - Результаты теплового расчета двигателя при  $n = 4500 \text{ мин}^{-1}$

X1-2	$\varphi'1$	$\varphi'1$ рад	$\Delta X1-2$	k1-2	$\sigma$	$\psi(\varphi'1)$	$\psi(\varphi'2)$	T1-2	T1	T2	p1	K1-2	p2
5,25922E-08	332	5,794493	2,62961E-08	1,376245	0,153429	1,713447	1,664939		650,6434	657,7137	1,11410378	6,315685	1,11410408
1,05774E-06	333	5,811946	5,2887E-07	1,374987	0,142998	1,664939	1,617978	654,1854	657,7273	664,8133	1,15902225	6,333513	1,15902842
5,50045E-06	334	5,8294	2,75023E-06	1,373753	0,132899	1,617978	1,572587	661,2787	664,83	671,9413	1,20553648	6,351123	1,20556939
1,68304E-05	335	5,846853	8,41521E-06	1,372542	0,123137	1,572587	1,528789	668,3896	671,9493	679,1064	1,25363159	6,368528	1,25373486
3,91301E-05	336	5,864306	1,95651E-05	1,371349	0,113718	1,528789	1,486606	675,5213	679,0933	686,3296	1,30329827	6,385766	1,30354448
7,69871E-05	337	5,88176	3,84936E-05	1,370171	0,104646	1,486606	1,446059	682,6878	686,2824	693,6451	1,35453749	6,402904	1,35503411
0,000135416	338	5,899213	6,77081E-05	1,369001	0,095927	1,446059	1,407168	689,9164	693,5504	701,1017	1,40736508	6,420039	1,40826034
0,000219802	339	5,916666	0,000109901	1,36783	0,087563	1,407168	1,369953	697,2485	700,9465	708,7641	1,46181627	6,437298	1,46330499
0,000335853	340	5,934119	0,000167926	1,366647	0,07956	1,369953	1,334433	704,7412	708,5358	716,7132	1,51795039	6,454837	1,52027966
0,000489553	341	5,951573	0,000244777	1,365441	0,071921	1,334433	1,300625	712,468	716,4003	725,0474	1,57585539	6,472842	1,57932996
0,000687118	342	5,969026	0,000343559	1,364198	0,064651	1,300625	1,268546	720,52	724,6397	733,8823	1,63565226	6,491524	1,64063947
0,000934943	343	5,986479	0,000467472	1,362903	0,057752	1,268546	1,238213	729,0057	733,3717	743,3514	1,697499	6,511115	1,70443289
0,001239544	344	6,003933	0,000619772	1,361541	0,051229	1,238213	1,209641	738,0521	742,7324	753,6056	1,76159378	6,531869	1,77097813
0,001607486	345	6,021386	0,000803743	1,360098	0,045084	1,209641	1,182845	747,8039	752,8755	764,8127	1,82817708	6,554049	1,84058702
0,002045304	346	6,038839	0,001022652	1,358556	0,039321	1,182845	1,157836	758,424	763,9726	777,1565	1,89753227	6,577924	1,91361398
0,002559404	347	6,056293	0,001279702	1,356903	0,033943	1,157836	1,13463	770,092	776,2115	790,8354	1,96998421	6,603757	1,9904524

0,003155949	348	6,073746	0,001577975	1,355126	0,028953	1,13463	1,113236	783,0034	789,7952	806,0601	2,04589547	6,631797	2,0715282
0,003840725	349	6,091199	0,001920362	1,353216	0,024352	1,113236	1,093667	797,3675	804,9398	823,0515	2,12565978	6,662263	2,15729036
0,004618988	350	6,108652	0,002309494	1,351164	0,020143	1,093667	1,075931	813,4056	821,8715	842,0376	2,20969236	6,695337	2,24819809
0,005495295	351	6,126106	0,002747648	1,34897	0,016329	1,075931	1,060038	831,3479	840,8243	863,2496	2,29841716	6,731147	2,34470478
0,006473303	352	6,143559	0,003236652	1,346635	0,012911	1,060038	1,045995	851,43	862,0357	886,9184	2,39225081	6,769761	2,44723888
0,007555561	353	6,161012	0,00377778	1,344165	0,009892	1,045995	1,033811	873,8893	885,7429	913,2695	2,4915839	6,811172	2,5561822
0,008743275	354	6,178466	0,004371638	1,341571	0,007271	1,033811	1,023491	898,9604	912,178	942,5188	2,59675987	6,855302	2,67184632
0,010036071	355	6,195919	0,005018036	1,338869	0,005052	1,023491	1,01504	926,8706	941,5633	974,8672	2,70805238	6,901989	2,79444803
0,011431737	356	6,213372	0,005715868	1,336078	0,003234	1,01504	1,008462	957,8347	974,1061	1010,495	2,82564211	6,950998	2,92408498
0,01292597	357	6,230825	0,006462985	1,333221	0,00182	1,008462	1,003762	992,0497	1009,993	1049,559	2,94959408	7,002027	3,06071249
0,014512137	358	6,248279	0,007256069	1,330321	0,000809	1,003762	1,000941	1029,69	1049,386	1092,181	3,07983661	7,054711	3,20412295
0,016181044	359	6,265732	0,008090522	1,327405	0,000202	1,000941	1	1070,9	1092,414	1138,452	3,21614299	7,108643	3,35392876
0,017920742	360	6,283185	0,008960371	1,324497	0	1	1,000941	1115,792	1139,17	1188,417	3,35811691	7,163385	3,50954994
0,019716387	361	6,300639	0,009858193	1,321622	0,000202	1,000941	1,003762	1164,437	1189,705	1242,078	3,50518251	7,218486	3,67020719
0,021550148	362	6,318092	0,010775074	1,318802	0,000809	1,003762	1,008462	1216,864	1244,023	1299,385	3,65657966	7,273496	3,83492095
0,023401212	363	6,335545	0,011700606	1,316057	0,00182	1,008462	1,01504	1273,05	1302,078	1360,233	3,81136492	7,327979	4,00251703
0,025245875	364	6,352998	0,012622938	1,313405	0,003234	1,01504	1,023491	1332,921	1363,763	1424,459	3,9684184	7,381528	4,17163879
0,027057756	365	6,370452	0,013528878	1,31086	0,005052	1,023491	1,033811	1396,341	1428,918	1491,839	4,12645655	7,433771	4,34076588
0,028808132	366	6,387905	0,014404066	1,308434	0,007271	1,033811	1,045995	1463,116	1497,315	1562,084	4,28405065	7,484377	4,50823918
0,030466416	367	6,405358	0,015233208	1,306135	0,009892	1,045995	1,060038	1532,989	1568,663	1634,845	4,43965061	7,533063	4,67229133
0,032000785	368	6,422812	0,016000392	1,30397	0,012911	1,060038	1,075931	1605,636	1642,609	1709,707	4,59161359	7,579591	4,83108231
0,033378939	369	6,440265	0,01668947	1,301943	0,016329	1,075931	1,093667	1680,67	1718,732	1786,198	4,73823672	7,623772	4,98273885
0,034569008	370	6,457718	0,017284504	1,300054	0,020143	1,093667	1,113236	1757,641	1796,551	1863,789	4,87779319	7,665458	5,12539685
0,035540561	371	6,475172	0,017770281	1,298305	0,024352	1,113236	1,13463	1836,04	1875,529	1941,903	5,0085706	7,704545	5,25724547
0,036265706	372	6,492625	0,018132853	1,296693	0,028953	1,13463	1,157836	1915,303	1955,077	2019,922	5,12891079	7,740965	5,37657157
0,036720229	373	6,510078	0,018360115	1,295217	0,033943	1,157836	1,182845	1994,822	2034,566	2097,197	5,23724985	7,774683	5,48180321
0,036884731	374	6,527531	0,018442365	1,293872	0,039321	1,182845	1,209641	2073,95	2113,335	2173,064	5,33215723	7,805695	5,57155064
0,036745685	375	6,544985	0,018372843	1,292653	0,045084	1,209641	1,238213	2152,018	2190,702	2246,851	5,41237269	7,834021	5,64464354
0,036296377	376	6,562438	0,018148189	1,291558	0,051229	1,238213	1,268546	2228,343	2265,984	2317,901	5,47683988	7,859703	5,70016306

0,035537629	377	6,579891	0,017768814	1,290579	0,057752	1,268546	1,300625	2302,246	2338,507	2385,579	5,52473526	7,882803	5,73746731
0,034478266	378	6,597345	0,017239133	1,289712	0,064651	1,300625	1,334433	2373,065	2407,623	2449,297	5,55549136	7,903399	5,75620938
0,033135266	379	6,614798	0,016567633	1,288951	0,071921	1,334433	1,369953	2440,175	2472,727	2508,521	5,56881315	7,92158	5,75634692
0,031533532	380	6,632251	0,015766766	1,28829	0,07956	1,369953	1,407168	2503,001	2533,274	2562,792	5,56468691	7,93745	5,73814259
0,029705294	381	6,649704	0,014852647	1,287723	0,087563	1,407168	1,446059	2561,032	2588,791	2611,732	5,54338076	7,951121	5,7021553
0,02768912	382	6,667158	0,01384456	1,287244	0,095927	1,446059	1,486606	2613,841	2638,891	2655,061	5,50543679	7,962711	5,64922223
0,025528575	383	6,684611	0,012764288	1,286848	0,104646	1,486606	1,528789	2661,087	2683,284	2692,598	5,45165463	7,972346	5,58043226
0,02327059	384	6,702064	0,011635295	1,286527	0,113718	1,528789	1,572587	2702,534	2721,784	2724,268	5,38306711	7,980156	5,49709167
0,020963608	385	6,719518	0,010481804	1,286276	0,123137	1,572587	1,617978	2738,047	2754,311	2750,1	5,30090868	7,986276	5,40068356
0,018655646	386	6,736971	0,009327823	1,286089	0,132899	1,617978	1,664939	2767,603	2780,895	2770,226	5,20657793	7,99084	5,29282271
0,016392349	387	6,754424	0,008196174	1,28596	0,142998	1,664939	1,713447	2791,28	2801,665	2784,87	5,10159565	7,993983	5,17520769
0,014215207	388	6,771877	0,007107604	1,285884	0,153429	1,713447	1,763477	2809,258	2816,851	2794,339	4,9875604	7,995841	5,04957254
0,012160016	389	6,789331	0,006080008	1,285855	0,164189	1,763477	1,815005	2821,807	2826,763	2799,009	4,86610339	7,996546	4,91763999
0,010255699	390	6,806784	0,005127849	1,285868	0,17527	1,815005	1,868006	2829,274	2831,785	2799,308	4,73884474	7,996227	4,78107828
0,008523565	391	6,824237	0,004261782	1,285918	0,186668	1,868006	1,922451	2832,07	2832,354	2795,703	4,60735307	7,995009	4,6414634
0,006977026	392	6,841691	0,003488513	1,286	0,198377	1,922451	1,978316	2830,65	2828,945	2788,678	4,47311001	7,99301	4,50024795
0,005621782	393	6,859144	0,002810891	1,286109	0,21039	1,978316	2,035571	2825,499	2822,052	2778,722	4,33748086	7,990343	4,35873773
0,004456434	394	6,876597	0,002228217	1,286241	0,222703	2,035571	2,094189	2817,113	2812,174	2766,31	4,20169257	7,987111	4,21807638
0,003473436	395	6,894051	0,001736718	1,286393	0,235309	2,094189	2,154141	2805,984	2799,795	2751,893	4,06681913	7,98341	4,07923787
0,002660306	396	6,911504	0,001330153	1,286561	0,248202	2,154141	2,215397	2792,585	2785,375	2735,885	3,93377445	7,979326	3,94302643
0,002000967	397	6,928957	0,001000483	1,286741	0,261376	2,215397	2,277927	2777,357	2769,339	2718,661	3,80331224	7,974936	3,81008283
0,001477111	398	6,94641	0,000738556	1,286931	0,274823	2,277927	2,341701	2760,703	2752,068	2700,548	3,67603185	7,970307	3,68089578
0,001069484	399	6,963864	0,000534742	1,28713	0,288538	2,341701	2,406687	2742,981	2733,894	2681,825	3,55238905	7,965495	3,55581706
0,000758995	400	6,981317	0,000379497	1,287334	0,302513	2,406687	2,472854	2724,498	2715,102	2662,723	3,43271031	7,960549	3,43507903
0,000527614	401	6,99877	0,000263807	#ДЕЛ/0!	0,316743	2,472854	2,540169	2705,516	2695,929	0	3,31720931		
0,000359013	402	7,016224	0,000179507	#ДЕЛ/0!	0,331219	2,540169	1		0				

Таблица А5 - Результаты теплового расчета двигателя при  $n = 6050 \text{ мин}^{-1}$

X1-2	$\varphi'1$	$\varphi'1$ рад	$\Delta X1-2$	k1-2	$\sigma$	$\psi(\varphi'1)$	$\psi(\varphi'2)$	T1-2	T1	T2	p1	K1-2	p2
3,43883E-08	329	5,742133	1,71942E-08	1,38117	0,186668	1,868006	1,815005		624,35	631,2393	0,86451589	6,247005	0,86451606
7,43731E-07	330	5,759587	3,71865E-07	1,379831	0,17527	1,815005	1,763477	627,8144	631,2788	638,1867	0,89957851	6,265494	0,8995821
4,04642E-06	331	5,77704	2,02321E-06	1,378512	0,164189	1,763477	1,713447	634,7687	638,2586	645,1924	0,93605392	6,283842	0,93607399
1,27821E-05	332	5,794493	6,39107E-06	1,377212	0,153429	1,713447	1,664939	641,7736	645,2886	652,2646	0,97396105	6,302057	0,97402608
3,04513E-05	333	5,811946	1,52257E-05	1,375927	0,142998	1,664939	1,617978	648,8326	652,3765	659,4223	1,01332477	6,320175	1,01348367
6,11031E-05	334	5,8294	3,05516E-05	1,374654	0,132899	1,617978	1,572587	655,9586	659,5408	666,6966	1,05417985	6,338256	1,05450684
0,000109265	335	5,846853	5,46326E-05	1,373386	0,123137	1,572587	1,528789	663,1765	666,8123	674,1322	1,09657478	6,356389	1,09717438
0,000179891	336	5,864306	8,99457E-05	1,372114	0,113718	1,528789	1,486606	670,5241	674,2358	681,7888	1,14057575	6,374694	1,14158781
0,000278319	337	5,88176	0,000139159	1,370829	0,104646	1,486606	1,446059	678,0536	681,8714	689,7415	1,18627068	6,393321	1,18787549
0,000410227	338	5,899213	0,000205113	1,369519	0,095927	1,446059	1,407168	685,8333	689,7952	698,0827	1,23377329	6,412447	1,23619662
0,000581596	339	5,916666	0,000290798	1,36817	0,087563	1,407168	1,369953	693,9478	698,1005	706,9215	1,28322711	6,432279	1,2867452
0,000798662	340	5,934119	0,000399331	1,366768	0,07956	1,369953	1,334433	702,4994	706,8983	716,3852	1,33480934	6,453044	1,33975336
0,001067863	341	5,951573	0,000533932	1,365297	0,071921	1,334433	1,300625	711,6081	716,3179	726,6186	1,38873412	6,474993	1,39549421
0,001395782	342	5,969026	0,000697891	1,363743	0,064651	1,300625	1,268546	721,4123	726,5066	737,7841	1,44525521	6,498389	1,45428356
0,001789068	343	5,986479	0,000894534	1,362089	0,057752	1,268546	1,238213	732,0682	737,6298	750,0606	1,50466747	6,523501	1,51648025
0,002254352	344	6,003933	0,001127176	1,360322	0,051229	1,238213	1,209641	743,75	749,8701	763,6431	1,56730698	6,550596	1,58248472
0,002798142	345	6,021386	0,001399071	1,358428	0,045084	1,209641	1,182845	756,6482	763,4263	778,7402	1,63354919	6,579928	1,65273526
0,003426703	346	6,038839	0,001713352	1,356397	0,039321	1,182845	1,157836	770,9689	778,5115	795,5728	1,70380488	6,611726	1,72770178
0,004145909	347	6,056293	0,002072955	1,354222	0,033943	1,157836	1,13463	786,9313	795,3511	814,3703	1,7785134	6,646181	1,80787645
0,004961082	348	6,073746	0,002480541	1,3519	0,028953	1,13463	1,113236	804,7655	814,1799	835,3684	1,85813306	6,683432	1,89376139
0,005876804	349	6,091199	0,002938402	1,349433	0,024352	1,113236	1,093667	824,7094	835,2389	858,8045	1,94312835	6,723557	1,98585298
0,006896707	350	6,108652	0,003448353	1,346827	0,020143	1,093667	1,075931	847,0049	858,771	884,9138	2,03395419	6,766565	2,08462319
0,008023243	351	6,126106	0,004011621	1,344093	0,016329	1,075931	1,060038	871,8941	885,0171	913,9245	2,13103726	6,812383	2,19049815
0,009257436	352	6,143559	0,004628718	1,341247	0,012911	1,060038	1,045995	899,6143	914,2114	946,0528	2,23475495	6,86086	2,30383455
0,010598617	353	6,161012	0,005299309	1,338308	0,009892	1,045995	1,033811	930,3934	946,5755	981,4975	2,34541249	6,911767	2,42489463
0,012044154	354	6,178466	0,006022077	1,335301	0,007271	1,033811	1,023491	964,4448	982,314	1020,435	2,46321916	6,964798	2,55382068
0,013589176	355	6,195919	0,006794588	1,332249	0,005052	1,023491	1,01504	1001,961	1021,608	1063,012	2,58826455	7,019588	2,69061021

0,015226314	356	6,213372	0,007613157	1,329179	0,003234	1,01504	1,008462	1043,11	1064,611	1109,344	2,72049582	7,07572	2,83509283
0,016945457	357	6,230825	0,008472728	1,326118	0,00182	1,008462	1,003762	1088,026	1111,441	1159,504	2,85969731	7,132746	2,98691016
0,01873355	358	6,248279	0,009366775	1,323091	0,000809	1,003762	1,000941	1136,809	1162,177	1213,522	3,00547341	7,190197	3,14549987
0,020574443	359	6,265732	0,010287221	1,320123	0,000202	1,000941	1	1189,513	1216,85	1271,376	3,15723574	7,247606	3,31008495
0,02244881	360	6,283185	0,011224405	1,317233	0	1	1,000941	1246,147	1275,443	1332,992	3,31419566	7,304517	3,47966924
0,024334165	361	6,300639	0,012167082	1,314441	0,000202	1,000941	1,003762	1306,663	1337,882	1398,232	3,47536273	7,360502	3,6530399
0,026204983	362	6,318092	0,013102491	1,311761	0,000809	1,003762	1,008462	1370,958	1404,033	1466,898	3,63954967	7,415168	3,82877733
0,028032952	363	6,335545	0,014016476	1,309207	0,00182	1,008462	1,01504	1438,864	1473,695	1538,726	3,80538421	7,468168	4,00527295
0,029787374	364	6,352998	0,014893687	1,306786	0,003234	1,01504	1,023491	1510,149	1546,603	1613,384	3,9713277	7,519199	4,18075448
0,031435711	365	6,370452	0,015717855	1,304506	0,005052	1,023491	1,033811	1584,513	1622,423	1690,472	4,13570047	7,56801	4,35331863
0,032944303	366	6,387905	0,016472152	1,302371	0,007271	1,033811	1,045995	1661,586	1700,749	1769,524	4,29671328	7,614396	4,52097016
0,03427924	367	6,405358	0,01713962	1,300381	0,009892	1,045995	1,060038	1740,93	1781,112	1850,014	4,45250421	7,658202	4,68166657
0,035407371	368	6,422812	0,017703685	1,298538	0,012911	1,060038	1,075931	1822,043	1862,975	1931,355	4,60117999	7,699314	4,83336672
0,036297444	369	6,440265	0,018148722	1,296839	0,016329	1,075931	1,093667	1904,36	1945,745	2012,915	4,74086049	7,737658	4,9740822
0,036921322	370	6,457718	0,018460661	1,295282	0,020143	1,093667	1,113236	1987,261	2028,777	2094,023	4,86972523	7,773194	5,10192938
0,03725523	371	6,475172	0,018627615	1,293862	0,024352	1,113236	1,13463	2070,083	2111,388	2173,978	4,98606012	7,805915	5,21518051
0,037280978	372	6,492625	0,018640489	1,292576	0,028953	1,13463	1,157836	2152,126	2192,864	2252,07	5,08830305	7,835841	5,31231175
0,036987086	373	6,510078	0,018493543	1,291417	0,033943	1,157836	1,182845	2232,672	2272,48	2327,591	5,17508668	7,863012	5,39204655
0,036369731	374	6,527531	0,018184866	1,290381	0,039321	1,182845	1,209641	2310,996	2349,512	2399,851	5,24527673	7,887491	5,4533923
0,035433449	375	6,544985	0,017716725	1,289463	0,045084	1,209641	1,238213	2386,383	2423,255	2468,2	5,29800438	7,909356	5,49566893
0,034191511	376	6,562438	0,017095756	1,288654	0,051229	1,238213	1,268546	2458,148	2493,042	2532,041	5,33269129	7,9287	5,51852804
0,032665922	377	6,579891	0,016332961	1,287951	0,057752	1,268546	1,300625	2525,651	2558,261	2590,847	5,34906615	7,945627	5,52196158
0,030886999	378	6,597345	0,015443499	1,287346	0,064651	1,300625	1,334433	2588,316	2618,371	2644,176	5,34717189	7,960252	5,50629966
0,028892512	379	6,614798	0,014446256	1,286833	0,071921	1,334433	1,369953	2645,644	2672,917	2691,685	5,32736293	7,972697	5,47219715
0,026726413	380	6,632251	0,013363206	1,286406	0,07956	1,369953	1,407168	2697,231	2721,545	2733,136	5,29029248	7,983093	5,42060981
0,024437184	381	6,649704	0,012218592	1,286059	0,087563	1,407168	1,446059	2742,777	2764,009	2768,405	5,2368901	7,991574	5,35276055
0,022075906	382	6,667158	0,011037953	1,285785	0,095927	1,446059	1,486606	2782,094	2800,179	2797,481	5,16833043	7,998278	5,27009749
0,01969414	383	6,684611	0,00984707	1,285578	0,104646	1,486606	1,528789	2815,109	2830,04	2820,465	5,08599421	8,003345	5,17424551
0,017341766	384	6,702064	0,008670883	1,285432	0,113718	1,528789	1,572587	2841,866	2853,692	2837,562	4,99142347	8,006917	5,06695363

0,015064915	385	6,719518	0,007532458	1,285342	0,123137	1,572587	1,617978	2862,519	2871,345	2849,073	4,8862727	8,009135	4,95004058
0,012904134	386	6,736971	0,006452067	1,285301	0,132899	1,617978	1,664939	2877,323	2883,302	2855,377	4,77225829	8,010136	4,82534112
0,010892916	387	6,754424	0,005446458	1,285304	0,142998	1,664939	1,713447	2886,626	2889,95	2856,919	4,65110876	8,010057	4,69465547
0,009056688	388	6,771877	0,004528344	1,285346	0,153429	1,713447	1,763477	2890,846	2891,743	2854,187	4,5245177	8,009027	4,55970422
0,007412317	389	6,789331	0,003706158	1,285422	0,164189	1,763477	1,815005	2890,46	2889,178	2847,696	4,39410178	8,007172	4,42209021
0,005968151	390	6,806784	0,002984075	1,285526	0,17527	1,815005	1,868006	2885,981	2882,783	2837,971	4,26136534	8,004608	4,2832689
0,00472456	391	6,824237	0,00236228	1,285655	0,186668	1,868006	1,922451	2877,938	2873,092	2825,524	4,12767274	8,001446	4,14452777
0,003674902	392	6,841691	0,001837451	1,285805	0,198377	1,922451	1,978316	2866,861	2860,63	2810,846	3,9942292	7,997785	4,00697478
0,002806805	393	6,859144	0,001403403	1,285971	0,21039	1,978316	2,035571	2853,264	2845,898	2794,391	3,86207022	7,993717	3,87153547
0,002103648	394	6,876597	0,001051824	1,286151	0,222703	2,035571	2,094189	2837,629	2829,36	2776,567	3,73205889	7,989321	3,73895759
0,001546083	395	6,894051	0,000773041	1,286341	0,235309	2,094189	2,154141	2820,396	2811,432	2757,733	3,60489046	7,984669	3,60982194
0,001113494	396	6,911504	0,000556747	1,28654	0,248202	2,154141	2,215397	2801,958	2792,483	2738,198	3,48110271	7,97982	3,48455785
0,000785287	397	6,928957	0,000392644	1,286746	0,261376	2,215397	2,277927	2782,654	2772,826	2718,216	3,36109059	7,974825	3,36346156
0,000541921	398	6,94641	0,00027096		0,274823	2,277927	2,341701	2762,773	2752,721	0	3,24512374		
0,000365666	399	6,963864	0,000182833		0,288538	2,341701	1		0				

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Результаты кинематического расчета

Таблица Б1 – Перемещение, скорость и ускорение

$\varphi$ , град п.к.в	$S$ , мм	$u_n$ , м/с	$j_n$ , м/с <sup>2</sup>
0	0	0	22390,11
10	0,845	6,11	21800,39
20	3,339	11,91	20079,26
30	7,349	17,09	17365,67
40	12,673	21,40	13874,88
50	19,046	24,68	9875,828
60	26,168	26,83	5663,381
70	33,719	27,81	1528,416
80	41,389	27,70	-2270,64
90	48,890	26,61	-5531,67
100	55,976	24,71	-8125,51
110	62,449	22,20	-10003,4
120	68,168	19,26	-11195,1
130	73,040	16,08	-11797
140	77,020	12,80	-11953,7
150	80,095	9,52	-11834
160	82,273	6,29	-11604,2

170	83,569	3,13	-11404,2
180	84	0	-11326,8
190	83,569	-3,13	-11404,2
200	82,273	-6,29	-11604,2
210	80,095	-9,52	-11834
220	77,020	-12,80	-11953,7
230	73,040	-16,08	-11797
240	68,168	-19,26	-11195,1
250	62,449	-22,20	-10003,4
260	55,976	-24,71	-8125,51
270	48,890	-26,61	-5531,67
280	41,389	-27,70	-2270,64
290	33,719	-27,81	1528,416
300	26,168	-26,83	5663,381
310	19,046	-24,68	9875,828
320	12,673	-21,40	13874,88
330	7,349	-17,09	17365,67
340	3,339	-11,91	20079,26
350	0,845	-6,11	21800,39
360	0	0	22390,11

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Результаты динамического расчета

Таблица В1 - Удельные суммарные силы двигателя

φ	Рг	ΔРг	j	β	рj	р	р к	р N	р s	р Т	Т	Среднее значен.
0	0,1000	0,0000	22390,11001	0	-1,9082	-1,9082	-1,9082	0	-1,9082	0	0	
10	0,0882	-0,0118	21800,39171	0,057009	-1,85794	-1,8697	-1,82278	-0,10671	-1,87275	-0,42976	-2,26955326	-0,214878418
20	0,0882	-0,0118	20079,256	0,112462	-1,71125	-1,7230	-1,55256	-0,1946	-1,73398	-0,77217	-4,077845713	-0,600963666
30	0,0882	-0,0118	17365,67076	0,164808	-1,47999	-1,4918	-1,16785	-0,2481	-1,51225	-0,96074	-5,073708411	-0,866457511
40	0,0882	-0,0118	13874,87619	0,212511	-1,18249	-1,1943	-0,74922	-0,25768	-1,22174	-0,96505	-5,096450094	-0,962897679
50	0,0882	-0,0118	9875,828481	0,254083	-0,84167	-0,8534	-0,3788	-0,22163	-0,88175	-0,79624	-4,204936893	-0,880643496
60	0,0882	-0,0118	5663,380767	0,288135	-0,48266	-0,4944	-0,12031	-0,14654	-0,51569	-0,50146	-2,648230812	-0,648849207
70	0,0882	-0,0118	1528,416308	0,313444	-0,13026	-0,1420	-0,00532	-0,04604	-0,14931	-0,14921	-0,787983122	-0,325336367
80	0,0882	-0,0118	-2270,636811	0,329046	0,193515	0,1817	-0,02956	0,062058	0,192047	0,189759	1,002119589	0,020274168
90	0,0882	-0,0118	-5531,674237	0,334318	0,471437	0,4597	-0,15967	0,159668	0,486607	0,459666	2,427501802	0,324712194
100	0,0882	-0,0118	-8125,510111	0,329046	0,692497	0,6807	-0,34712	0,23244	0,719316	0,630021	3,327150476	0,544843162
110	0,0882	-0,0118	-10003,43293	0,313444	0,852543	0,8408	-0,54364	0,272518	0,883834	0,69686	3,680128172	0,663440235
120	0,0882	-0,0118	-11195,055	0,288135	0,954099	0,9423	-0,71304	0,27929	0,982844	0,676434	3,572262246	0,686647105
130	0,0882	-0,0118	-11796,95878	0,254083	1,005396	0,9936	-0,83636	0,25804	1,026584	0,595295	3,143764804	0,635864904
140	0,0882	-0,0118	-11953,74589	0,212511	1,018758	1,0070	-0,91106	0,217276	1,030161	0,480835	2,539300309	0,53806538
150	0,0882	-0,0118	-11833,99653	0,164808	1,008552	0,9968	-0,94613	0,165781	1,010473	0,35482	1,87381149	0,417827815
160	0,0882	-0,0118	-11604,23938	0,112462	0,988971	0,9772	-0,95601	0,110364	0,983412	0,230514	1,217348448	0,292667093
170	0,0882	-0,0118	-11404,24479	0,057009	0,971927	0,9602	-0,95508	0,054797	0,961718	0,112765	0,59551218	0,17163934
180	0,0882	-0,0118	-11326,76153	4,02E-17	0,965323	0,9536	-0,95355	3,83E-17	0,953552	1,17E-16	6,16951E-16	0,056382336
190	0,0888	-0,0112	-11404,24479	-0,05701	0,971927	0,9608	-0,95569	-0,05483	0,962324	-0,11284	-0,595887306	-0,056417853
200	0,0907	-0,0093	-11604,23938	-0,11246	0,988971	0,9797	-0,95843	-0,11064	0,985894	-0,2311	-1,220420673	-0,171965731
210	0,0940	-0,0060	-11833,99653	-0,16481	1,008552	1,0025	-0,95157	-0,16673	1,016282	-0,35686	-1,884584155	-0,29397791
220	0,0989	-0,0011	-11953,74589	-0,21251	1,018758	1,0177	-0,92071	-0,21958	1,041069	-0,48593	-2,566190055	-0,421393644
230	0,1059	0,0059	-11796,95878	-0,25408	1,005396	1,0113	-0,85125	-0,26263	1,044857	-0,60589	-3,199723247	-0,545909342
240	0,1157	0,0157	-11195,055	-0,28813	0,954099	0,9698	-0,7338	-0,28742	1,011467	-0,69613	-3,676293198	-0,651012496
250	0,1291	0,0291	-10003,43293	-0,31344	0,852543	0,8817	-0,57009	-0,28578	0,926836	-0,73076	-3,859181285	-0,713449145
260	0,1478	0,0478	-8125,510111	-0,32905	0,692497	0,7403	-0,3775	-0,25278	0,782271	-0,68516	-3,618348052	-0,707962972
270	0,1740	0,0740	-5531,674237	-0,33432	0,471437	0,5455	-0,18947	-0,18947	0,577443	-0,54547	-2,880651033	-0,615316972
280	0,2116	0,1116	-2270,636811	-0,32905	0,193515	0,3051	-0,04962	-0,10419	0,322427	-0,31859	-1,682455484	-0,432029124
290	0,2668	0,1668	1528,416308	-0,31344	-0,13026	0,0366	0,001369	-0,01186	0,038449	-0,03843	-0,202923495	-0,178505285
300	0,3504	0,2504	5663,380767	-0,28813	-0,48266	-0,2322	-0,05651	0,068828	-0,24221	0,235528	1,243829041	0,098551614

310	0,4810	0,3810	9875,828481	-0,25408	-0,84167	-0,4607	-0,20447	0,119634	-0,47595	0,429794	2,269747935	0,332661002
320	0,6901	0,5901	13874,87619	-0,21251	-1,18249	-0,5924	-0,37166	0,127827	-0,60606	0,478726	2,528157938	0,454259629
330	1,0664	0,9664	17365,67076	-0,16481	-1,47999	-0,5136	-0,40205	0,085413	-0,52061	0,330749	1,74668999	0,404737168
340	1,6009	1,5009	20079,256	-0,11246	-1,71125	-0,2103	-0,18952	0,023754	-0,21166	0,094258	0,497775793	0,212503167
350	2,5002	2,4002	21800,39171	-0,05701	-1,85794	0,5422	0,528609	-0,03095	0,543102	-0,12463	-0,658175274	-0,015186419
360	4,0696	3,9696	22390,11001	-8E-17	-1,9082	2,0614	2,061437	-1,7E-16	2,061437	-5,1E-16	-2,66751E-15	-0,062315198
370	5,6636	5,5636	21800,39171	0,057009	-1,85794	3,7057	3,612645	0,211486	3,711697	0,851756	4,498135627	0,425877763
380	5,7098	5,6098	20079,256	0,112462	-1,71125	3,8985	3,512848	0,440298	3,923334	1,747127	9,226607457	1,299441228
390	4,3705	4,2705	17365,67076	0,164808	-1,47999	2,7905	2,184602	0,464107	2,828845	1,797186	9,490968702	1,772156317
400	3,0757	2,9757	13874,87619	0,212511	-1,18249	1,7932	1,124994	0,386926	1,834514	1,449078	7,652607184	1,623131972
410	2,2526	2,1526	9875,828481	0,254083	-0,84167	1,3109	0,581862	0,340448	1,354431	1,223078	6,459097537	1,336078264
420	1,7140	1,6140	5663,380767	0,288135	-0,48266	1,1313	0,275274	0,335299	1,179945	1,147386	6,059365064	1,185232125
430	1,3548	1,2548	1528,416308	0,313444	-0,13026	1,1245	0,042099	0,364481	1,182089	1,181339	6,238671647	1,164362482
440	1,1091	1,0091	-2270,636811	0,329046	0,193515	1,2026	-0,19557	0,410636	1,270769	1,25563	6,631003673	1,218484499
450	0,9369	0,8369	-5531,674237	0,334318	0,471437	1,3083	-0,45446	0,45446	1,385021	1,308338	6,909356071	1,281984048
460	0,8137	0,7137	-8125,510111	0,329046	0,692497	1,4062	-0,71706	0,480164	1,485931	1,30147	6,873083126	1,304903823
470	0,7265	0,6265	-10003,43293	0,313444	0,852543	1,4790	-0,95633	0,479389	1,554758	1,225851	6,47373801	1,263660059
480	0,6485	0,5485	-11195,055	0,288135	0,954099	1,5026	-1,13695	0,445334	1,567168	1,07859	5,696053695	1,152220408
490	0,5705	0,4705	-11796,95878	0,254083	1,005396	1,4759	-1,24227	0,383275	1,524815	0,88421	4,669525886	0,981399898
500	0,4925	0,3925	-11953,74589	0,212511	1,018758	1,4112	-1,27679	0,304497	1,443698	0,673857	3,558652607	0,779033348
510	0,4145	0,3145	-11833,99653	0,164808	1,008552	1,3230	-1,25578	0,220039	1,341189	0,470949	2,487088582	0,57240309
520	0,3365	0,2365	-11604,23938	0,112462	0,988971	1,2254	-1,19887	0,138399	1,233226	0,289071	1,526587648	0,380009763
530	0,2585	0,1585	-11404,24479	0,057009	0,971927	1,1304	-1,12442	0,064513	1,13223	0,132758	0,701096165	0,210914272
540	0,1805	0,0805	-11326,76153	1,21E-16	0,965323	1,0458	-1,04579	1,26E-16	1,045787	3,84E-16	2,02988E-15	0,066378894
550	0,1773	0,0773	-11404,24479	-0,05701	0,971927	1,0492	-1,04371	-0,05988	1,050957	-0,12323	-0,650770545	-0,061614128
560	0,1200	0,0200	-11604,23938	-0,11246	0,988971	1,0090	-0,9871	-0,11395	1,015386	-0,23801	-1,256927682	-0,180618443
570	0,1200	0,0200	-11833,99653	-0,16481	1,008552	1,0286	-0,97628	-0,17106	1,042681	-0,36613	-1,933537302	-0,302069169
580	0,1200	0,0200	-11953,74589	-0,21251	1,018758	1,0388	-0,9398	-0,22413	1,062663	-0,49601	-2,619417602	-0,431067983
590	0,1200	0,0200	-11796,95878	-0,25408	1,005396	1,0254	-0,8631	-0,26629	1,059409	-0,61433	-3,244287398	-0,555168135
600	0,1200	0,0200	-11195,055	-0,28813	0,954099	0,9741	-0,73708	-0,28871	1,015982	-0,69924	-3,692704123	-0,656785539
610	0,1200	0,0200	-10003,43293	-0,31344	0,852543	0,8725	-0,56419	-0,28282	0,917233	-0,72319	-3,819194191	-0,711216983
620	0,1200	0,0200	-8125,510111	-0,32905	0,692497	0,7125	-0,36332	-0,24329	0,752888	-0,65943	-3,482437978	-0,691309252
630	0,1200	0,0200	-5531,674237	-0,33432	0,471437	0,4914	-0,1707	-0,1707	0,52024	-0,49144	-2,595286941	-0,575431269
640	0,1200	0,0200	-2270,636811	-0,32905	0,193515	0,2135	-0,03472	-0,07291	0,225619	-0,22293	-1,1773043	-0,357184143
650	0,1200	0,0200	1528,416308	-0,31344	-0,13026	-0,1103	-0,00413	0,035738	-0,11591	0,115833	0,611716226	-0,05354916
660	0,1200	0,0200	5663,380767	-0,28813	-0,48266	-0,4627	-0,11258	0,137125	-0,48255	0,469239	2,478060303	0,292536114
670	0,1200	0,0200	9875,828481	-0,25408	-0,84167	-0,8217	-0,3647	0,213384	-0,84892	0,766594	4,04839774	0,617916751
680	0,1200	0,0200	13874,87619	-0,21251	-1,18249	-1,1625	-0,72929	0,250828	-1,18924	0,939377	4,96086697	0,85298573
690	0,1200	0,0200	17365,67076	-0,16481	-1,47999	-1,4600	-1,14298	0,24282	-1,48004	0,940283	4,965649083	0,939829921

700	0,1200	0,0200	20079,256	-0,11246	-1,71125	-1,6913	-1,52393	0,191008	-1,70201	0,757932	4,002653153	0,849107455
710	0,1100	0,0100	21800,39171	-0,05701	-1,85794	-1,8479	-1,80155	0,105464	-1,85095	0,424753	2,243126015	0,591342432
720	0,1000	0,0000	22390,11001	-1,6E-16	-1,9082	-1,9082	-1,9082	3,07E-16	-1,9082	9,35E-16	4,93844E-15	0,21237632