

Институт энергетики и электротехники
(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))

на тему Улучшение экологических показателей бензинового двигателя
добавкой водорода в условиях городского цикла

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт энергетики и электротехники
(наименование института полностью)
Кафедра «Энергетические машины и системы управления»
(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой ЭМСУ

_____ Д.А. Павлов
(подпись) (И.О. Фамилия)

« ____ » _____ 2017г

ЗАДАНИЕ

на выполнение бакалаврской работы

Студент Жадаев Дмитрий Сергеевич

1. Тема Улучшение экологических показателей бензинового двигателя добавкой
водорода в условиях городского цикла

2. Срок сдачи студентом законченной бакалаврской работы 16-22 июня 2017 года,

3. Исходные данные к бакалаврской работе Двигатель ВАЗ с добавкой водорода,
 $iV_h=1,5$ л, частота вращения $n = 5600$ об/мин. Степень сжатия $\varepsilon = 9,8$.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке
вопросов, разделов) Тепловой расчет двигателя, Расчет кинематики и динамики двигателя,
Расчет поршневой группы, Описание конструкции спроектированной двигателя,
Безопасность и экологичность проекта

5. Ориентировочный перечень графического и иллюстративного материала
Продольный и поперечный разрез двигателя, Лист диаграмм теплового расчета
Лист диаграмм ВСХ, Лист диаграмм кинематического и динамического расчета
Лист спец части

6. Консультанты по разделам – д.т.н., профессор Егоров А.Г.
к.т.н., профессор Фесина М.И.

7. Дата выдачи задания « ____ » _____ 201__ г.

Руководитель бакалаврской работы

_____ (подпись)

В.В. Смоленский
(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

_____ (подпись)

Д.С. Жадаев
(И.О. Фамилия)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт энергетики и электротехники
(наименование института полностью)
Кафедра «Энергетические машины и системы управления»
(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой ЭМиСУ

_____ Д.А. Павлов
(подпись) (И.О. Фамилия)

« ____ » _____ 2017г

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
выполнения бакалаврской работы**

Студента Жадаева Дмитрия Сергеевича

по теме Улучшение экологических показателей бензинового двигателя добавкой
водорода в условиях городского цикла

Наименование раздела работы	Плановый срок выполнения раздела	Фактический срок выполне- ния раздела	Отметка о вы- полнении	Подпись руко- водителя
Лит. обзор по теме работы	30 апреля 2017 г.			
Тепловой расчет двигателя	5 мая 2017 г.			
Расчет кинематики двигателя	11 мая 2017 г.			
Расчет динамики двигателя	15 мая 2017 г.			
Описание кон- струкции спроек- тированного ДВС	20 мая 2017 г.			
Безопасность и экологичность	30 мая 2017 г.			
Предварительная защита и коррек- тировка ВКР	30-13 июня 2017			
Защита перед ГИК	26-29 июня 2017			

Руководитель бакалаврской работы

_____ (подпись)

В.В. Смоленский

_____ (И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

_____ (подпись)

Д.С. Жадаев

_____ (И.О. Фамилия)

АННОТАЦИЯ

Повышение эффективности рабочего процесса в бензиновых двигателях в условиях городского цикла является значимой и актуальной задачей. Многими исследователями показано, что основными режимами снижающими эффективность работы двигателя являются режимы глубокого дросселирования. По этому в бакалаврской работе представлен способ повышения эффективности рабочего процесса в условиях городского цикла с помощью применения добавки водорода, позволяющей активировать процесс сгорания и повысить его эффективность при глубоком дросселировании.

По этому в данном бакалаврской работе представлены результаты проектирования бензинового двигателя с системой подачи водорода для повышения эффективности процесса сгорания на режимах глубокого дросселирования. Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки и графической части. Пояснительная записка состоит из следующих разделов:

- Обоснование эффективности применения добавки водорода в бензиновых двигателях на режимах глубокого дросселирования.
- Тепловой расчет и тепловой баланс двигателя, где проведен расчет основных параметров проектируемого двигателя.
- Кинематический расчет показывает изменение кинематических

Increasing the efficiency of the combustion process of a gas piston engine is a significant and urgent task. The bachelor's work presents a way to increase the efficiency of the working process by using the hydrogen additive, which allows to activate the combustion process and increase its efficiency at partial loads. As many researchers have shown, the efficiency of the combustion process increases when the work process shifts to a region with a poor mixture.

Therefore, this bachelor's work presents the results of designing a gas piston engine with the addition of hydrogen to the main fuel, compressed natural gas, to increase the efficiency of the combustion process. Bachelor's work consists of an explanatory note and a graphic part. The explanatory memorandum consists of the following sections:

- Substantiation of the effectiveness of the use of the hydrogen additive in gasoline engines.
- Thermal calculation and heat balance of the engine, where the calculation of the main parameters of the engine being designed.
- Kinematic calculation shows the change in the kinematic parameters of the piston group.
- Dynamic calculation, where the forces and loads acting in the crank mechanism are determined, as well as the conditions for balancing the engine.
- Calculation of the main engine parts,

параметров поршневой группы. – Динамический расчет, где определяются силы и нагрузки действующие в кривошипно-шатунном механизме, а также условия для уравнивания двигателя. – Расчет основных деталей двигателя, состоящий из расчета наиболее нагруженных элементов ДВС, а именно из расчета поршневой группы, расчет шатунной группы и расчета коленчатого вала. – Расчет систем двигателя, состоящий из расчета системы охлаждения и расчета системы смазки. – В разделе специальной части, проведен анализ эффективности применения водорода при его добавках на режимах глубокого дросселирования. Графическая часть работы содержит 8 листов формата А1 иллюстрирующих материал представленный в пояснительной записке.	consisting of the calculation of the most loaded elements of ICE, namely from the calculation of the piston group, the calculation of the crank group and the calculation of the crankshaft. – Calculation of engine systems, consisting of calculating the cooling system and calculating the lubrication system. – In the section of the special section, an analysis is made of the effectiveness of the use of various hydrogen additives and the rationale for choosing the most optimal additive for obtaining the required composite gas fuel directly at the filling station. The graphic part of the work contains 8 sheets of A1 format illustrating the material presented in the explanatory note.
---	---

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 Анализ состояния вопроса.....	8
1.1 Особенности сгорания ТВС при добавке водорода.....	9
1.2 Обзор иностранных источников по теме бакалаврской работы.....	10
2 Тепловой расчет двигателя	22
3 Тепловой баланс двигателя.....	35
4 Кинематический расчет	37
5 Динамический расчет двигателя	38
6 Безопасность и экологичность бакалаврской работы	44
7 Специальная часть.....	47
7.1 Оценка влияния добавки водорода в ТВС на эффективность процес- са сгорания	47
7.2 Оценка влияния добавки водорода в ТВС на снижение токсичности ОГ	50
7.2.1 Влияния добавки водорода в ТВС на концентрацию несгорев- ших углеводородов в ОГ.....	50
7.2.2 Влияния добавки водорода в ТВС на концентрацию оксидов азота в ОГ.....	51
Заключение	53
Список использованных источников.....	54
Приложение А	56
Приложение Б	74
Приложение В	76

ВВЕДЕНИЕ

Регулярное ужесточение законодательных требований к выделению автомобилями вредных веществ служит стимулом для постоянных исследований в этом направлении. Основными токсичными компонентами продуктов сгорания являются оксид углерода (CO), несгоревшие углеводороды (CH), оксиды азота (NO). Наиболее сложен комплекс мер, направленных на снижение выделения CH, как продукта неполного сгорания, совместно с оксидами азота. Поэтому снижение токсичности при соблюдении современных норм образования углеводородов и оксидов азота в цилиндре двигателя внутреннего сгорания (ДВС) весьма актуально.

В современном автомобилестроении существуют различные тенденции решения проблем экологической безопасности. Разрабатываются автомобили с электроприводом, однако в настоящее время электропривод, как силовой агрегат автомобиля, не заменит традиционный ДВС в силу недостаточного уровня потребительских качеств. Применение альтернативных топлив не решает полностью проблем токсичности автомобильных двигателей и сдерживается проблемами, связанными с инфраструктурой и дороговизной этих технологий. Широко распространенные системы каталитической нейтрализации ОГ с использованием благородных металлов являются дорогостоящими и снижают эффективность работы двигателя.

Наиболее эффективные методы снижения токсичности ДВС связаны с комплексным воздействием как на рабочий процесс, т.е. непосредственно на причины образования токсичных веществ, так и направленные на очистку выхлопных газов. Такие способы связаны с осуществлением рабочего процесса на бедных смесях при различных способах интенсификации сгорания и сохранении эффективности. В частности, применением добавок водорода в бензиновоздушную смесь. Этот способ не требует значительного усложнения конструкции автомобиля и не ухудшает безопасность.

1 Анализ состояния вопроса

1.1 Особенности сгорания ТВС при добавке водорода

Существует экспериментальный материал зарубежных авторов [15, 16, 17, 18, 19], на основании которых можно сделать вывод: добавка H_2 , является наиболее эффективным методом управления процессом горения в тепловых двигателях работающих на жидких топливах, это обеспечит повышение экономичности и экологичности, снижению ОГ.

В следствии того, что водород имеет низкую энергию воспламенения и высокую реакционную способность, что позволяет направленно влиять на свойства и процесс горения топлива, с определенным количеством водорода, следовательно это более качественно регулирует рабочий процесс и сохраняет энергетическую эффективность, значительно сокращая токсичность в сравнении с жидким топливом [7, 14, 20].

Проведенные исследования показали [18, 19], что при равных условиях, увеличение добавки водорода - увеличивает максимальное давление в цикле, это заметно в бедных смесях. Устраняется по мере обогащения топлива. Чем больше доля водорода, тем меньше межцикловая нестабильность, невысокая добавка водорода может увеличить тепловыделение и повысить полноту сгорания что заметно при обеднении смеси.

На данный момент, ведутся работы по уменьшению токсичности и увеличению экономичности двигателя на КГТ [15].

Добавка водорода значительно влияет на процесс горения:

- уменьшает задержку воспламенения
- расширяет пределы устойчивости
- увеличивает скорость распространения ламени
- снижает токсичность ОГ

1.2 Обзор иностранных источников по теме бакалаврской работы

Comparative thermodynamics analysis of gasoline and hydrogen fuelled Internal Combustion Engines	Сравнительный термодинамический анализ двигателей внутреннего сгорания, работающих на бензине и водороде
<u>Abstract</u> Comparative thermodynamics models for naturally aspirated gasoline and hydrogen fuelled spark ignition internal combustion engines were developed according to the first and second law of thermodynamics. Analysis of mean effective pressure, power, torque, energy due to heat transfer, energy due to work, and irreversibility were made. Thermodynamics model was developed according to Ideal Otto cycle. Assumptions were made according to air standard assumptions. First law efficiency, mean effective pressure, power, and torque of hydrogen fuelled engine are higher than gasoline fuelled engine due to higher compression ratio associated with hydrogen fuelled engine, 14.5:1 compared to 8:1 of gasoline fueled engine. Hydrogen fueled internal combustion engine can have higher compression ratio because of higher auto-ignition temperature, 858°C compared to 300-450°C for gasoline fuel. A second law analysis shown that hydrogen fuelled engine had higher second law efficiency of 69.40% compared to 60.49% for a gasoline fuelled engine due to significantly lower irreversibilities and lower specific fuel consumption. The greater heat transfer exergy of hydrogen fuelled occurs due to a greater amount of heat generated from hydrogen combustion. However, the high available thermal energy of hydrogen fuelled engine needs higher cooling load which decreases the power of the engine. Keywords: Thermodynamics; 1st and 2nd law analysis; hydrogen fuel; internal combustion engine . <u>Introduction</u> Demand and usage of energy is increasing throughout the world. Pollution increased. Current energy sources are depleting. In recent years, the economy of Malaysia grew rapidly. The private vehicle populations grew rather in an escalating manner. This phenomenal rise of vehicles number has increased energy consumption, especially fossil fuels. Consequently air pollution has increased to a remarkable extent. In 2002, the transportation sector of Malaysia used about 40% of the total energy consumed [1]. Valero and Valero [2] indicate that there might not be enough available resources to satisfy the predicted future mineral demand. The changing of fuel from gasoline to hydrogen de-	<u>Аннотация</u> В рамках первого и второго принципов термодинамики были разработаны модели сравнительной термодинамики для двигателей внутреннего сгорания с искровым зажиганием, работающих на бензине и водороде с искровым зажиганием. Был выполнен анализ среднего эффективного давления, мощности, крутящего момента, энергии из-за теплопередачи, энергии из-за работы и необратимости. Модель термодинамики была разработана в соответствии с циклом IdealOtto. Предположения сделаны в соответствии с допущениями о воздушном стандарте. Первая эффективность закона, среднее эффективное давление, мощность и крутящий момент двигателя, работающего на водороде, выше, чем у бензинового двигателя из-за более высокой степени сжатия, связанной с двигателем, работающим на водороде, 14,5: 1 по сравнению с 8: 1 бензиновым двигателем. Двигатель внутреннего сгорания с водородным топливом может иметь более высокую степень сжатия из-за более высокой температуры самовоспламенения, 858 ° С по сравнению с 300-450 ° С для бензинового топлива. Второй анализ закона показал, что водородный двигатель имел более высокий коэффициент полезного действия второго закона 69,40% по сравнению с 60,49% для двигателя с бензиновым двигателем из-за значительно меньших необратимых расходов и более низкого удельного расхода топлива. Большая экспрессия теплопередачи водорода, используемого в качестве топлива, происходит из-за большего количества тепла, выделяемого при сгорании водорода. Однако высокая доступная тепловая энергия двигателя, работающего на водороде, требует более высокой охлаждающей нагрузки, которая снижает мощность двигателя. Ключевые слова: Термодинамика; 1-й и 2-й анализ законов; Водородное топливо; двигатель внутреннего сгорания. <u>Введение.</u> Во всем мире растет спрос и использование энергии. Загрязнение увеличилось. Текущие источники энергии истощаются. В последние годы экономика Малайзии росла быстрыми темпами. Население частных транспортных средств росло довольно эскалирующим образом. Этот феноменальный рост числа автомобилей увеличил потребление энергии, особенно ископаемого топлива. Следовательно, загрязнение воздуха в значительной степени увеличилось. В 2002 году транспортный сектор Малайзии использовал около 40% всей потребляемой энергии [1]. Валеро и Валеро [2] указывают, что может быть недостаточно ресурсов для удовлетворения прогнозируемого будущего спроса на минеральные ресурсы. Изменение топлива от

mands a thermodynamic analysis to determine and predict changes in performance and efficiency. Exergy is an effective method using the conversion of mass and conversion of energy principles together with the second law of thermodynamics for the design and analysis of energy system [3]. Analysis of mean effective pressure, power, torque, exergy due to heat transfer, exergy due to work, and irreversibilities will be provided. First and second law efficiencies for both gasoline and hydrogen fuelled will be derived from this analysis. Studies had been made applying the second law of thermodynamics to internal combustion engines to diagnose losses and suggest solutions for improving engine performance and efficiency. A lot of work has been done for alternative fueled engines. Bayraktar [4] has developed and validated an engine simulator to compare performance and emission characteristics of an engine working on LPG and gasoline. Mustafi, Miraglia [5], in their work compared power-gas with gasoline and natural gas (NG). Rakopoulos and Giakoumis [6] shown that exergy of methane and methanol is lower than dodecane but the pollutant emissions decreased. Caton [7], stated that the destruction of the fuel's available energy due to the combustion process decreases for operation at higher temperatures. The highest availability was found to exist for the unreacted fuel. This represents a maximum potential to perform work. When this chemical energy is transformed into thermal energy, some portion (which depends on the final temperature) of the original availability is destroyed. Hydrogen, being highly reactive, offers wide range of advantages in performance. One of the principal advantages that hydrogen has as a fuel is the wide flammability limits (see Table 1). These wide limits allow that the combustion occurs with different equivalence ratios, in particular with slight mixtures, which makes relatively easy to operate an engine with hydrogen [8]. The minimum ignition energy and the wide range of flammability of hydrogen allow the presence of combustion at lower equivalence ratios than those with gasoline, and it can obtain a higher power at specific equivalence ratios. The higher power output of the engine, running with hydrogen, was about 80% of the power reached with gasoline. From the experiment conducted by Hari Ganesh, Subramanian [10], volumetric efficiency was plotted versus power output and thermal efficiency versus equivalence ratio. In the first case, a higher volumetric efficiency, compared with that of gasoline, with a power output between 2 and 7 kW, was observed. In

бензина к водороду требует термодинамического анализа для определения и прогнозирования изменений в производительности и эффективности. Эксергия - эффективный метод, использующий преобразование массы и преобразование принципов энергии вместе со вторым законом термодинамики для проектирования и анализа энергетической системы [3]. Будет представлен анализ среднего эффективного давления, мощности, крутящего момента, эксергии из-за теплопередачи, эксергии из-за работы и необратимости. Первый и второй коэффициенты полезного действия как для бензина, так и для водорода будут получены из этого анализа. Были проведены исследования с применением второго закона термодинамики к двигателям внутреннего сгорания для диагностики потерь и предложения решений для повышения эффективности работы двигателя и его эффективности. Для двигателей с альтернативным топливом проделана большая работа. Bayraktar [4] разработал и утвердил симулятор двигателя для сравнения характеристик и эмиссионных характеристик двигателя, работающего на СНГ и бензине. Мустафите, Miraglia [5] в своей работе сравнил энергетический газ с бензином и природным газом (NG). Ракопулос и Гиакумис [6] показали, что эксергия метана и метанола ниже додекана, но выбросы загрязняющих веществ снижаются. Катон [7] заявил, что разрушение доступной энергии топлива из-за процесса горения уменьшается для работы при более высоких температурах. Было обнаружено, что самая высокая доступность существует для непрореагировавшего топлива. Это представляет максимальный потенциал для выполнения работы. Когда эта химическая энергия преобразуется в тепловую энергию, часть (которая зависит от конечной температуры) исходной доступности разрушается. Водород, будучи высоко-реактивным, обладает широким спектром преимуществ в производительности. Одним из основных преимуществ, которыми обладает водород, является широкий предел воспламеняемости (см. Таблицу 1). Эти широкие пределы допускают, что горение происходит с различными коэффициентами эквивалентности, в частности с небольшими смесями, что делает относительно легким эксплуатацию двигателя с водородом [8]. Минимальная энергия воспламенения и широкий диапазон воспламеняемости водорода позволяют обеспечить сгорание при более низких коэффициентах эквивалентности, чем у бензина, и он может получить более высокую мощность при определенных коэффициентах эквивалентности. Более высокая выходная мощность двигателя, работающего на водороде, составляла около 80% от мощности, достигнутой с бензином. Из эксперимента, проведенного ХариГанешем, Субраманианом [10], была построена объемная эффективность по сравнению с выходной мощностью и тепловой эффективностью по отношению к эквивалентности. В первом случае наблюдался более высо-

the case of thermal efficiency, it was reached a maximum of about 27%, at different speeds, over that with gasoline which is about 25%. Yousufuddin and Masood [11], made experimental and computational work on a hydrogen diesel dual fuel engine, with hydrogen presence from 10 to 80% Vol. It was noticed that with the increase of hydrogen load the pressure increases at high compression ratios due to the high flammability and rate of combustion of hydrogen. Moreover, hydrogen has a major flame velocity at stoichiometric conditions, which makes the engine getting closer to the thermodynamically ideal engine. Hydrogen injection during compression stroke prevents knocking, increases thermal efficiency and maximizes the power output [12]. Knock, or spark knock, is defined as autoignition of the hydrogen-air end-gas ahead of the flame front that has originated from the spark. The high autoignition temperature, finite ignition delay and the high flame velocity of hydrogen means that knock, as defined, is less likely for hydrogen relative to gasoline, and hence the higher research octane number (RON) for hydrogen (RON>120) [13], in comparison to gasoline (RON=91–99) [14].

Analysis

Thermodynamic analyses for both gasoline and hydrogen fuelled engine are going to be made based on air-standard Ideal Otto cycle [21] at 3000 RPM. Both engines will be four-cylinder, 2-liter, spark ignition, square engine. Combustion efficiency is assumed as 100%. It can be assumed that the initial conditions in the cylinder before compression stroke are 100 kPa and 30°C. Pressure in the cylinder of an engine is continuously changing during the cycle. An average or mean effective pressure (mep) for both gasoline and hydrogen fuelled engine is defined by [21]. Power is defined as the rate of work of the engine. If n = number of revolutions per cycle and N = engine speed, then [21]. Torque is a good indicator of an engine's ability to do work. It is defined as force acting at a moment distance and has units of N-m. Torque τ is related to power by [21]. Exergy by heat transfer is the work potential of the energy transferred from a heat source in a system taken from its initial temperature to temperature of the environment or dead state. Heat is a form of disorganized energy, and thus only a portion of it can be converted to work, which is a form of organized energy (the second law). Work can always be produced from heat at a temperature above the environment temperature by transferring it to a heat engine that rejects the waste heat to the environment. Therefore, heat transfer is always ac-

кий объемный КПД по сравнению с бензином с выходной мощностью от 2 до 7 кВт. В случае термической эффективности он был достигнут максимум на 27%, с разной скоростью, по сравнению с бензином, который составляет около 25%. Юсуфуддин и Масуд [11] провели экспериментальные и вычислительные работы на водородном дизельном двухтопливном двигателе с содержанием водорода от 10 до 80% об. Было отмечено, что с увеличением нагрузки водорода давление возрастает при высоких степенях сжатия из-за высокой воспламеняемости и скорости горения водорода. Кроме того, водород имеет большую скорость пламени в стехиометрических условиях, что делает двигатель более близким к термодинамически идеальному двигателю. Инжекция водорода во время такта сжатия предотвращает стук, повышает тепловую эффективность и максимизирует выходную мощность [12]. Стук, или искровой разряд, определяется как самовоспламенение конечного газа водород-воздух впереди фронта пламени, возникшего из искры. Высокая температура самовоспламенения, конечная задержка воспламенения и высокая скорость пламени водорода означает, что детонация, как определено, менее вероятна для водорода по отношению к бензину и, следовательно, более высокое октановое число (RON) для водорода (RON> 120) [13], По сравнению с бензином (RON = 91-99) [14].

Анализ

Термодинамические анализы для бензиновых двигателей и двигателей, работающих на водороде, будут производиться на основе стандартного авиационного цикла IdealOtto [21] при 3000 об / мин. Оба двигателя будут четырехцилиндровыми, 2-литровыми, с искровым зажиганием, квадратным двигателем. Эффективность горения считается 100%. Можно предположить, что начальные условия в цилиндре до хода сжатия составляют 100 кПа и 30 ° С. Давление в цилиндре двигателя непрерывно изменяется во время цикла. Среднее или среднее эффективное давление (тер) как для бензинового, так и для водородного топливного двигателя определено в [21]. Мощность определяется как скорость работы двигателя. Если n = число оборотов за цикл и N = частота вращения двигателя, тогда [21] Крутящий момент - хороший показатель способности двигателя выполнять работу. Она определяется как сила, действующая на моментном расстоянии и имеющая единицы N-m. Крутящий момент τ связан с мощностью [21]. Энергия за счет теплопередачи представляет собой рабочий потенциал энергии, передаваемой от источника тепла в системе, взятой из ее начальной температуры, к температуре окружающей среды или мертвого состояния. Тепло является одной из форм дезорганизованной энергии, и поэтому только часть ее может быть преобразована в работу, которая является формой организованной энергии (второй закон). Работа всегда может быть произведена из тепла при температуре выше температуры окружающей сре-

accompanied by exergy transfer. Heat transfer Q at a location at thermodynamic temperature T is always accompanied by exergy transfer X_{heat} in the amount of [15]: Work exergy is defined as the availability of the system to do actual work on the changing control volume against its surroundings. With respect to a piston-cylinder device, boundary work is the work required to move the piston against the boundary conditions and change the cylinder volume. The compression and expansion processes are assumed to be polytropic and as a function of cylinder volume [21]. Finally the exergy due to work can be given by: Any difference between the reversible work W_{rev} and the useful work W_u is due to their irreversibilities present during the process, and this difference is called irreversibility I . The amount of the availability that is destroyed increases for lower final temperatures. During the combustion process, the availability destroyed by combustion is about 18.9%, and the availability destroyed by the heat transfer is about 12.0% [22]. In almost all situations, the major source of irreversibilities is the internal thermal energy exchange associated with high temperature gradients caused by heat release in combustion reactions. The primary way of keeping the exergy destruction in a combustion process within a reasonable limit is to reduce the irreversibility in heat conduction through proper control of physical processes and chemical reactions resulting in a high value of flame temperature but lower values of temperature gradients within the system. First Law efficiency is a measure of the performance of a heat engine according to the fraction of the heat input that is converted to net-work output. The 1st Law efficiency of an engine can be expressed as ... Second-law efficiency η_{II} is defined as the ratio of the actual thermal efficiency to the maximum possible (reversible) thermal efficiency under the same condition. From irreversibility equation (3.19), the second-law efficiency can be expressed as the ratio of the useful work output and the maximum possible (reversible) work output...Based on the above models, the first and second law efficiency can be calculated for both hydrogen and gasoline fueled engines.

Results and Discussion

Figure 1 shown that mep for hydrogen fuelled engine is higher, 2740 kPa compared to gasoline, 2040 kPa. This result was due to higher work output associated with hydrogen fuelled engine. The higher work output of hydrogen fuelled engine was caused by higher heat energy input from combustion because of higher heat-

ды, путем передачи ее тепловому двигателю, который откачивает отходящее тепло в окружающую среду. Поэтому передача тепла всегда сопровождается переносом эксергии. Теплоотдача Q в месте с термодинамической температурой T всегда сопровождается переносом эксергии X_{heat} в количестве [15]: эксергия работы определяется как доступность системы для выполнения фактической работы по изменению объема контроля против ее окружения. Что касается поршневого цилиндра, то граничные работы - это работа, необходимая для перемещения поршня относительно граничных условий и изменения объема цилиндра. Процессы сжатия и расширения предполагаются политропными и в зависимости от объема цилиндра [21]. Наконец, эксергия, связанная с работой, может быть дана следующим образом: любое различие между обратимой работой W_{rev} и полезной работой W_u связано с необратимостью, существующей в процессе, и эта разница называется необратимостью I . Количество разрушаемой готовности увеличивается для более низких конечных температур. В процессе сжигания доступность, разрушенная при сгорании, составляет около 18,9%, а доступность, разрушенная за счет теплопередачи, составляет около 12,0% [22]. Почти во всех ситуациях основным источником необратимости является внутренний обмен тепловой энергией, связанный с высокими градиентами температуры, вызванными тепловыделением в реакциях горения. Основной способ сохранения разрушения эксергии в процессе горения в разумных пределах состоит в уменьшении необратимости теплопроводности путем правильного управления физическими процессами и химическими реакциями, приводящими к высокому значению температуры пламени, но меньшим значениям температурных градиентов в системе, Эффективность первого закона является показателем производительности теплового двигателя в соответствии с долей тепловой нагрузки, которая преобразуется в выходную мощность сети. Эффективность 1-го закона двигателя может быть выражена как ... Коэффициент полезного действия η_{II} второго порядка определяется как отношение фактического теплового к максимально возможному (обратимому) тепловому КПД при тех же условиях. Из уравнения необратимости (3.19) эффективность второго закона может быть выражена как отношение полезного выхода работы и максимально возможного (обратимого) выхода работы ... На основе вышеуказанных моделей можно вычислить коэффициент эффективности первого и второго закона Для двигателей, работающих на водороде и бензине.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показано, что mep для водородного двигателя выше, 2740 кПа по сравнению с бензином, 2040 кПа. Этот результат был обусловлен более высокой производительностью работы, связанной с двигателем, работающим на водороде. Более высокая производительность двигателя, работающего на водороде,

ing value of hydrogen fuel, 120 MJ/kg compared to gasoline fuel, 44 MJ/kg [9]. Figure 2 illustrate that hydrogen has higher power output, 183.7 hp compared to gasoline, 136.76 hp. The results are relatively consistent with report from Sørensen [23], which also indicated that hydrogen can have higher power output than gasoline. Higher horsepower also means that the torque will be higher. Figure 3 shown that torque of hydrogen fuelled engine is higher, 436 N-m compared to 325 N-m associated with gasoline fuelled engine. Higher compression ratio [16] and higher pressure due to combustion of hydrogen fuelled engine are the major factors for the higher torque of hydrogen engine. Figure 4 shown that greater heat exergy for hydrogen engine compared to gasoline engine was due to higher combustion temperature associated with the hydrogen fuelled engine [15]. However, the high available thermal energy or thermal exergy of hydrogen fuelled internal combustion engine needs higher cooling load which decreases the power of hydrogen fuelled internal combustion engine [24]. The results obtained were consistent with studies by Nieminen and Dincer [3] which illustrate the variation of exergy due to heat transfer as a function of crank angle. Figure 5 shown that hydrogen have higher exergy due to work than gasoline fuelled engine due to higher temperature and pressure from combustion of hydrogen fuel [15]. However, Nieminen and Dincer [3] in his studies stated that hydrogen has lower work exergy due to higher compression stroke associated with hydrogen fuelled engine. The transfer of exergy via compression work is the reason for the negative value of exergy. An irreversibility analysis is done for both gasoline and hydrogen combustion reactions using the approach from eq. 18. It was found that the combustion of hydrogen is less irreversible than the combustion of gasoline. The results are consistent with results reported by Nieminen and Dincer [3]. Figure 7 shown that both 1st law and second law efficiency for hydrogen engine is higher than gasoline engine 65.64, 69.4 % and 56.4, 60.5 % respectively. Nieminen and Dincer [3] also found that the hydrogen fuelled engine had a greater proportion of its chemical exergy converted into work, indicating a second law efficiency of 41.37% as opposed to 35.74% for a gasoline fuelled engine. The higher first law efficiency of hydrogen engine was due to higher compression ratio [16] and the higher second law efficiency associated with hydrogen engine is due to significantly lower irreversibilities of hydrogen engine

была вызвана более высокой тепловой энергией сгорания из-за более высокой теплотворной способности водородного топлива - 120 МДж / кг по сравнению с бензиновым топливом, 44 МДж / кг [9]. Рисунок 2 иллюстрирует, что водород имеет более высокую выходную мощность, 183,7 л.с. по сравнению с бензином, 136,76 л.с. Результаты относительно соответствуют отчету Sørensen [23], который также показал, что водород может иметь более высокую выходную мощность, чем бензин. Более высокая мощность также означает, что крутящий момент будет выше. На рисунке 3 показано, что крутящий момент двигателя, работающего на водороде, выше, 436 Н-м по сравнению с 325 Н-м, связанным с бензиновым двигателем. Более высокая степень сжатия [16] и более высокое давление из-за сгорания топлива, работающего на водороде, являются основными факторами для более высокого крутящего момента водородного двигателя. На рисунке 4 показано, что более высокая тепловая эксергия для водородного двигателя по сравнению с бензиновым двигателем была обусловлена более высокой температурой сгорания, связанной с двигателем, работающим на водороде [15]. Однако высокая доступная тепловая энергия или тепловая эксергия работающих на водороде двигателей внутреннего сгорания требуют более высокой охлаждающей нагрузки, что снижает мощность двигателя внутреннего сгорания, работающего на водороде [24]. Полученные результаты согласуются с исследованиями Nieminen и Dincer [3], которые иллюстрируют изменение эксергии за счет теплопередачи в зависимости от угла поворота коленчатого вала. На рисунке 5 показано, что водород обладает большей эксергией из-за работы, чем бензиновый двигатель, благодаря более высокой температуре и давлению от сгорания водородного топлива [15]. Тем не менее, Nieminen и Dincer [3] в своих исследованиях заявили, что водород имеет более низкий уровень эксергии работы из-за более высокого такта сжатия, связанного с двигателем, работающим на водороде. Причиной отрицательного значения эксергии является передача эксергии посредством сжатия. Анализ необратимости проводится для реакций горения бензина и водорода, используя подход из уравнения 18. Было установлено, что сжигание водорода является менее необратимым, чем сжигание бензина. Результаты согласуются с результатами, представленными Nieminen и Dincer [3]. На рисунке 7 показано, что и первый закон, и эффективность второго закона для водородного двигателя выше, чем у бензинового двигателя 65,64, 69,4% и 56,4, 60,5% соответственно. Nieminen и Dincer [3] также обнаружили, что водородный топливный двигатель имел большую часть своей химической эксергии, превращенной в работу, что указывает на эффективность второго закона в 41,37% против 35,74% на бензиновый двигатель. Более высокая первая эффективность закона водородного двигателя была обусловлена более высокой степе-

[15] <u>Conclusions</u> This comparative thermodynamics analysis between gasoline and hydrogen fuelled internal combustion engines has indicated that a hydrogen fuelled engine is more efficient than a gasoline fuelled engine from the first law perspective, 65.64% to 56.4% and the second law efficiency, 69.4% to 60.5% respectively. The reasons include higher compression ratio and lower irreversibility associated with hydrogen engine. Finally, the analysis conducted in this study shows that a hydrogen fuelled engine gives higher mean effective pressure, torque, power output, heat exergy and work exergy compared to gasoline engine because of higher temperature and pressure from hydrogen combustion.	ную сжатия [16], а более высокая эффективность второго закона, связанная с водородным двигателем, объясняется значительно меньшими необратимостями водородного двигателя [15] <u>Выводы</u> Этот сравнительный термодинамический анализ между двигателями внутреннего сгорания, работающими на бензине и водороде, показал, что двигатель с водородным топливом является более эффективным, чем бензиновый двигатель с точки зрения первого закона, с 65,64% до 56,4% и с коэффициентом полезного действия второго закона - 69,4% 60,5% соответственно. Причины включают более высокую степень сжатия и меньшую необратимость, связанную с водородным двигателем. Наконец, анализ, проведенный в этом исследовании, показывает, что двигатель, работающий на водороде, дает более высокое среднее эффективное давление, крутящий момент, выходную мощность, тепловыделение и эксергию работы по сравнению с бензиновым двигателем из-за более высокой температуры и давления от сгорания водорода.
A Review on the Application of Hydrogen Rich Gas as Fuel Supplement in CI and SI Internal Combustion Engine <u>Introduction</u> Hydrogen is the lightest chemical element with the symbol H and having molecular formula H₂. Hydrogen is a renewable, carbon free and non-polluting fuel, producing only water during combustion. It is the most abundant resource in the universe. The ability of hydrogen blended fuels to burn more effectively is due to its special combustion factors such as low ignition, the high diffusivity, energy high flame speed and wide flammability limits¹. The properties of hydrogen in comparison to hydrocarbon fuels are given in Table-12. When hydrogen is used as additional fuel, because of its high diffusivity it easily combines with both the fuel and air, forming a highly uniform combustible mixture¹. On ignition by spark plug or compression, combustion occurs inside the engine cylinder at a much higher velocity than in ordinary fuel/air combustion. The high combustion velocity enables the fuel mixture to burn more efficiently. The combustion of the hydrogen fuel mixture provides more force to the piston by enabling the fuel mixture to burn completely from inside out and at the same time reduces the release of unburnt hydrocarbons in the atmosphere. Therefore, hydrogen increases combustion efficiency by forcing the engine to burn hydrocarbon fuel more completely and efficiently. Moreover the wide flammability range of hydrogen allows ultra-lean combustion which dramatically reduces specific fuel consumption³. Ricardo (1920) and Burstall (1925) experimented on the use of hy-	Обзор применения богатого водородом газа в качестве топливной добавки в двигателях внутреннего сгорания CI и SI <u>Введение</u> Водород - самый легкий химический элемент с символом H и имеющий молекулярную формулу H₂. Водород является возобновляемым, не содержащим углерода и не загрязняющим окружающую среду топливом, производящим только воду во время сгорания. Это самый распространенный ресурс во Вселенной. Способность водорода, смешанного топлива, сжигать более эффективно, обусловлена его особыми факторами сгорания, такими как низкое зажигание, высокая диффузность, высокая скорость пламени и широкие пределы воспламеняемости¹. Свойства водорода по сравнению с углеводородным топливом приведены в таблице 12. Когда водород используется в качестве дополнительного топлива, из-за его высокой диффузионности он легко сочетается как с топливом, так и с воздухом, образуя очень однородную горючую смесь¹. При прокаливании свечей зажигания или сжатию сгорание происходит внутри цилиндра двигателя со значительно большей скоростью, чем при обычном сжигании топлива / воздуха. Высокая скорость горения позволяет топливной смеси гореть более эффективно. Сжигание водородной топливной смеси обеспечивает большее усилие для поршня, позволяя топливной смеси полностью сгорать изнутри и одновременно уменьшает выделение несгоревших углеводородов в атмосфере. Поэтому водород повышает эффективность сгорания, заставляя двигатель сжигать углеводородное топливо более полно и эффективно. Кроме того, широкий диапазон воспламеняемости водорода позволяет осуществлять ультра-сухое сгорание, что резко снижает удельный расход топлива³. Рикардо (1920) и Берсталл (1925) провели экспе-

drogen as fuel supplement and both reported increased in thermal efficiencies of more than 40%. They reported the problem of firing back or backflash, which of course limited the performance. About the same time, Rudolph Erren from Germany devised a method called "Errenizing" to overcome the problem of backflash. In Errenizing meant injecting slightly pressurized hydrogen into air or oxygen inside the combustion chamber rather than feeding the air fuel mixture via a carburetor into the engine that result in violent backfiring⁴. However the biggest problems in using hydrogen as a fuel supplement are i. the high cost of hydrogen gas processing from production to compression and ii. the danger involved in carrying compressed hydrogen gas and iii. increase emission of nitrogen oxides (NO_x).

Methodology

The simplest and most conventional method for on-board generation of hydrogen is water electrolysis⁵. With this process, hydrogen can be generated on demand basis avoiding the potential danger of storing the gas. KOH and NaCl are often used as electrolytes. The most common type of electrolyzer design used in this application has multi-electrodes structure and, the gas output is the 2:1 stoichiometric mixture of H₂ and O₂ commonly known as Brown's gas or oxy-hydrogen (HHO) gas. The HHO gas produced from electrolysis is directly injected into the combustion engine. This system can be used for both SI and CI internal combustion engines.

Results and Discussion

The concept of using an electrolysis unit on-board a vehicle to improve combustion is almost 100 years old. The first ever known popular work on hydrogen as fuel was conducted by Reverend Cecil in 1820. His main idea was to develop an engine in which hydrogen gas when mixed with atmospheric pressure produce a large imperfect vacuum on explosion during ignition enough to provide a moving force. However, it was only after the production of Stuart electrolyzers at around 1920 that the method of injecting hydrogen into combustion engine becomes possible⁴. Many reports have shown that the electrodes material, the space between the electrodes, the type of electrolytes used contribute a significant role in increasing the electrolysis efficiency. Platinum (Pt) and gold, even though they highly increase the efficiency, are not suitable for both industrial and commercial purposes because of their high price. The most commonly used electrodes are aluminum, cobalt and nickel. These materials have high resistance to corrosion, high chemical stability and suitable

рименты по использованию водорода в качестве топливной добавки, и оба сообщили об увеличении тепловой эффективности более чем на 40%. Они сообщили о проблеме стрельбы или обратного удара, что, конечно же, ограничило производительность. Примерно в то же время Рудольф Эррен из Германии разработал метод под названием «Errenizing», чтобы преодолеть проблему обратной вспышки. В Эррижинге подразумевалось впрыскивание слегка сжатого водорода в воздух или кислород внутри камеры сгорания, а не подача воздушно-топливной смеси через карбюратор в двигатель, что приводило к сильному обстрелу⁴. Однако самыми большими проблемами при использовании водорода в качестве топливной добавки являются: i. Высокая стоимость переработки газообразного водорода от производства до сжатия и ii. Опасность, связанная с переносом сжатого газообразного водорода и iii. Увеличить выбросы оксидов азота (NO_x).

Методология

Простейшим и наиболее общепринятым методом для водородной генерации водорода является электролиз воды⁵. С помощью этого процесса водород может быть получен по требованию, избегая потенциальной опасности хранения газа. KOH и NaCl часто используются в качестве электролитов. Наиболее распространенный тип конструкции электролизера, используемый в этой заявке, имеет структуру с множеством электродов, а выход газа представляет собой стехиометрическую смесь H₂ и O₂ 2: 1, обычно известную как газ Брауна или кислородно-водородный газ (HHO). Газ HHO, полученный при электролизе, непосредственно впрыскивается в двигатель внутреннего сгорания. Эта система может использоваться для двигателей внутреннего сгорания SI и CI.

Результаты и обсуждение

Концепция использования электролизера на борту транспортного средства для улучшения сгорания насчитывает почти 100 лет. Впервые известная популярная работа по водороду в качестве топлива была проведена преподобным Сесилом в 1820 году. Его основная идея заключалась в разработке двигателя, в котором газообразный водород при смешивании с атмосферным давлением создавал бы большой несовершенный вакуум при взрыве во время зажигания, чтобы обеспечить движущую силу. Однако только после производства электролизеров Стюарта около 1920 г. стало возможным введение водорода в двигатель внутреннего сгорания⁴. Многие сообщения показали, что материал электродов, пространство между электродами, тип используемых электролитов вносят значительный вклад в повышение эффективности электролиза. Платина (Pt) и золото, хотя они и значительно повышают эффективность, не подходят как для промышленных, так и для коммерческих целей из-за их высокой цены. Наиболее часто используемые

cost and greatly increase the efficiency⁶. The efficiency is also influenced by the nature of the reaction between the electrodes and the electrolytes. Pt reacts much better with KOH electrolyte than Molybdenum (Mo), while 1-butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate (BMI.BF₄) reacts better with Mo than Pt at temperature below ca. 333 K⁷. Kandah reported that higher production of HHO gas is seen with potassium hydroxide (KOH) electrolyte when compared with sodium carbonate⁸. When the electrodes are placed close to each other at low current density, the electrical resistance and the formation of bubbles called void fraction decreases, thereby increasing the efficiency. However at higher current density, the void fraction increases which caused the efficiency of electrolysis to decrease^{9,10}. Moreover, since bubbles formation occurs in upper parts of electrodes, greater height of electrode causes more power dissipation in a cell⁷. The formation of bubbles also increases when using a separator in a cell causing the electrical resistance to increase three to five times when used without a separator^{10,11}. Hydroxy gas has been widely reported to increase the performance of both petrol and diesel engine, at the same time reduce the emissions of unburnt hydrocarbons. The parameters used to define the engine performances are mainly engine torque, specific fuel consumption, brake thermal efficiency and exhaust emissions. These studies show that presence of only small quantity hydrogen or Brown gas can have significant improvement in the performances and emission characteristics of both spark ignition (SI) and compression ignition (CI) engines. The application of hydrogen energy in the form of Brown's gas or Hydroxy gas has been reported to improve the combustion speed, lean burn ability and flame quenching distance of hydrocarbon combustion in the cylinder^{3,12}. Hydrogen blended fuel have been reported to decrease fuel consumption. Reduction in fuel consumption from 20% to 40% had been obtained in gasoline SI engines^{5,13}, while for diesel operated engines the improvement in fuel consumption is around 13% after hydrogen enrichment^{2,14,15}. With increase in H₂/O₂, the air – fuel ratio increases as more air is being continuously displaced by H₂/O₂^{14,16}. Increase in brake thermal efficiency was also reported which varied depending on the type of engine, electrolytes used and other conditions^{16,17,18,19}. The heat release rate is higher with hydrogen rich gas fuel as compared to neat fuel, due to higher combustion rate of hydrogen, resulting in higher release of energy

электроды - алюминий, кобальт и никель. Эти материалы обладают высокой коррозионной стойкостью, высокой химической стабильностью и приемлемыми затратами и значительно повышают эффективность⁶. Эффективность также зависит от характера реакции между электродами и электролитами. Pt реагирует гораздо лучше с KOH электролитом, чем с молибденом (Mo), тогда как тетрафторборат 1-бутил-3-метилимидазолия (BMI.BF₄) лучше реагирует с Mo, чем Pt при температуре ниже примерно 333 K⁷. Канда сообщил, что более высокое производство газа ННО наблюдается с электролитом калия (KOH) по сравнению с карбонатом натрия⁸. Когда электроды располагаются близко друг к другу при малой плотности тока, электрическое сопротивление и образование пузырьков, называемых пористой фракцией, уменьшается, тем самым повышая эффективность. Однако при более высокой плотности тока увеличивается доля пустот, что приводит к снижению эффективности электролиза^{9,10}. Более того, поскольку образование пузырьков происходит в верхних частях электродов, большая высота электрода вызывает большее рассеивание мощности в ячейке⁷. Образование пузырьков также увеличивается при использовании сепаратора в ячейке, что приводит к увеличению электрического сопротивления в 3-5 раз при использовании без разделителя^{10,11}. Широко сообщалось, что гидроксигаз повышает производительность как бензинового, так и дизельного двигателей, в то же время уменьшает выбросы несгоревших углеводородов. Параметры, используемые для определения характеристик двигателя, в основном, это крутящий момент двигателя, удельный расход топлива, тепловая эффективность тормоза и выбросы выхлопных газов. Эти исследования показывают, что присутствие только небольшого количества водорода или газа Брауна может иметь значительное улучшение характеристик и эмиссионных характеристик как двигателей с искровым зажиганием (СИ), так и двигателей с воспламенением от сжатия (КИ). Сообщалось о применении энергии водорода в виде газа Брауна или Окси-газа для улучшения скорости сгорания, обедненной способности к сгоранию и огневого гашения на угле сжигания углеводородов в цилиндре^{3,12}. Сообщается, что топливо, смешанное с водородом, уменьшает расход топлива. Снижение потребления топлива с 20% до 40% было получено в двигателях с бензиновым двигателем SI, ^{5,13}, в то время как для двигателей с дизельным двигателем улучшение потребления топлива составило около 13% после обогащения водородом ^{2,14,15}. При увеличении содержания H₂ / O₂ соотношение воздуха и топлива возрастает по мере того, как большее количество воздуха непрерывно вытесняется H₂ / O₂^{14,16}. Сообщалось также об увеличении тепловой эффективности тормоза, которая варьировалась в зависимости от типа двигателя, используемых электролитов и других условий^{16,17,18,19}. Скорость высвобождения

thereby increasing the efficiency of engine¹⁸. Significant improvements in engine emissions are also noticed as a result of hydrogen addition in both types of engines. Many reports shows that experiments done so far on hydrogen rich fuel results in decreased in CO and HC emissions. The decrease in CO emission is about 7%-20% percent. This high reduction rate can be attributed to the absence of carbon in HHO gas^{1,14,18}. The reduction in HC emissions is found to be 5-9.5% and 19.3% for particulate matter^{9,12,18}. However for NO_x, while a reduction by 50% on the average has been reported by Musmar and AlRousan¹³, other studies showed increased emission level of the gases. This is due to the dependence of NO_x formation on different factors such as engine compression ratio, hydrogen enrichment level and engine load. In general, NO_x emission is found to increase with higher engine compression ratio, high concentration of hydrogen and high engine load^{3, 20,21}. <u>Conclusion</u> Hydrogen is applicable to be used as fuel supplement in both SI and CI engines to enhance engine performance. Generation of hydrogen in a form called Brown's gas by electrolysis of water on-board vehicle appears to be a convenient and low cost method. Optimum spacing between the electrodes increase the efficiency of electrolysis. The high burning velocity, wide flammability range, high diffusivity and low ignition energy are the main characteristics that make hydrogen a potential additive for different type of hydrocarbon fuels. Brown's Gas reduce the emissions of CO and HC gases, however, emissions of NO_x needs further investigation.	тепла выше при использовании богатого водородом газового топлива по сравнению с чистым топливом из-за более высокой скорости горения водорода, что приводит к высвобождению энергии, тем самым увеличивая эффективность двигателя¹⁸. Также заметны значительные улучшения в выбросах двигателей в результате добавления водорода в обоих типах двигателей. Многие отчеты показывают, что эксперименты, проведенные до настоящего времени на водороде, обогащенном топливом, приводят к уменьшению выбросов СО и НС. Снижение выбросов СО составляет около 7-20%. Такое высокое снижение можно объяснить отсутствием углерода в газобразном ННО^{1,14,18}. Обнаружено, что снижение выбросов УВ составляет 5-9,5% и 19,3% для твердых частиц^{9,12,18}. Однако для NO_x, в то время как сокращение на 50% в среднем было зарегистрировано Мусмаром и АльРосаном¹³, другие исследования показали повышенный уровень выбросов газов. Это связано с зависимостью образования NO_x от различных факторов, таких как степень сжатия двигателя, уровень обогащения водорода и нагрузка двигателя. Было обнаружено, что в целом выбросы NO_x увеличиваются с более высоким коэффициентом сжатия двигателя, высокой концентрацией водорода и высокой нагрузкой на двигатель^{3, 20,21}. <u>Заключение</u> Водород применим для использования в качестве топливной добавки в двигателях SI и CI для повышения производительности двигателя. Появление водорода в форме, называемой газом Брауна, путем электролиза воды на борту автомобиля представляется удобным и недорогим методом. Оптимальное расстояние между электродами повышает эффективность электролиза. Высокая скорость горения, широкий диапазон воспламеняемости, высокая диффузность и низкая энергия воспламенения являются основными характеристиками, которые делают водород потенциальной добавкой для различных типов углеводородных топлив. Brown's Gas уменьшает выбросы СО и НС газов, однако, выбросы NO_x требуют дальнейшего изучения.
Study of air fuel ratio on engine performance of direct injection hydrogen fueled engine	Исследование скорости воздушного топлива на двигатель исполнение прямого впрыска водородного топливного двигателя
<u>INTRODUCTION</u> In direct injection, the intake valve is closed when the fuel is injected into the combustion cylinder during the compression stroke [1]. Like PFI, direct injection has long been viewed as one of the most attractive choices for supplying hydrogen fuel to combustion chamber [2-4]. This view is based on: its prevention for abnormal combustion: pre-ignition, backfire and knock; and the high volumetric efficiency, (since hydrogen is injected after intake valve closing). However, it is worthy to emphasize that while direct injection solves the problem of	<u>ВВЕДЕНИЕ</u> При прямом впрыске впускной клапан закрывается, когда топливо впрыскивается в цилиндр сгорания во время такта сжатия [1]. Как и PFI, прямой впрыск долго рассматривался как один из самых привлекательных вариантов для подачи водородного топлива в камеру сгорания [2-4]. Это мнение основано на: предотвращении аномального горения: предвоспламенении, обратном облучении и ударе; И высокой объемной эффективностью (так как водород впрыскивается после закрытия впускного клапана). Тем не менее, стоит подчеркнуть, что, хотя непосредственный впрыск решает проблему предварительного зажигания

pre-ignition in the intake manifold, it does not necessarily prevent pre-ignition within the combustion chamber [3]. Compressing gaseous hydrogen on board would mean an extra compressor and a substantial energy demand [4-6]. Hydrogen gas is characterized by a rapid combustion speed, wide combustible limit and low minimum ignition energy. Such characteristics play a role to decrease engine cycle variation for the safety of combustion [7-9]. However, it is frequently observed that the values of cycle variation for hydrogen fueled engines with direct injection are higher than those of hydrogen fueled engines with manifold injection or those of gasoline engines, due to a decrease in the mixing period by direct injection in the process of compressing hydrogen gas [10-13]. The high pressure was defined by White et al. [14] as greater than 80 bar to ensure sonic injection velocities and high enough mass flow rates for start of injection throughout the compression stroke. The need for rapid mixing necessitates the use of critical flow injectors and the short time duration with late injection requires high mass flow rates. The valve leakage at the valve seat and the losses associated with the injection system are another issues [15-18]. Another important challenge for DI is the extremely short time for hydrogen-air mixing. For early injection (i.e., coincident with inlet valve closure (IVC)) maximum available mixing times range from approximately 20–4 ms across the speed range 1000–5000 rpm, respectively [19]. This insufficient time leads to unstable engine operation at low hydrogen-air equivalence ratios due to insufficient mixing between hydrogen and air [20-23]. Late injection, as a solution, was investigated by Mohammadi et al. [24-27]. Optimization of spark timing, valve timing, combustion chamber geometry, injection parameters such as injection timing, injection duration, injection pressure and nozzle hole numbers/arrangement, swirls intensity, etc. are indeed important to achieve an engine performance level competitive to that in the modern direct-injection diesel engines [28-29]. However, this measure is insufficient and the system will be susceptible for pre-ignition as stated above. Therefore, additional transactions like utilization of other techniques such as EGR and after-treatment methods are required to bring the NO_x emission to acceptable level [30].

Design of Experiment

Engine Modeling A four cylinder, four stroke, direct injection hydrogen fueled engine was modeled utilizing the GTPower software. The computational model of four cylinders, four stroke direct injection hydrogen fuel engine is

во впускном коллекторе, это не обязательно предотвращает предварительное воспламенение в камере сгорания [3]. Сжатие газообразного водорода на борту будет означать дополнительный компрессор и существенный спрос на энергию [4-6]. Водородный газ характеризуется высокой скоростью сгорания, широким пределом горения и низкой минимальной энергией зажигания. Такие характеристики играют роль для уменьшения вариации цикла двигателя для безопасности горения [7-9]. Однако часто наблюдается, что значения изменения цикла для двигателей с водородным топливом с непосредственным впрыском выше, чем у двигателей с водородным топливом с впрыском в коллектор или для бензиновых двигателей из-за уменьшения периода смешивания путем прямого впрыска в процесс сжатия газа водорода [10-13]. Высокое давление было определено White et al. [14], как более 80 бар, чтобы обеспечить скорости подачи ультразвука и достаточно высокие скорости массового расхода для начала впрыска во время такта сжатия. Необходимость быстрого смешивания требует использования критических инжекторов потока, а кратковременная длительность с поздней инъекцией требует больших массовых расходов. Утечка клапана на седле клапана и потери, связанные с системой впрыска, являются еще одним вопросом [15-18]. Еще одной важной задачей для DI является чрезвычайно короткое время для смешивания водорода и воздуха. Для ранней инъекции (т. Е. Совпадающей с закрытием впускного клапана (IVC)) максимально допустимое время смешивания составляет от 20-4 мс в диапазоне скоростей 1000-5000 об / мин, соответственно [19]. Это недостаточное время приводит к нестабильной работе двигателя при низких соотношениях водородно-воздушная эквивалентность из-за недостаточного смешивания водорода и воздуха [20-23]. Поздняя инъекция в виде раствора была исследована Mohammadi et al. [24-27]. Оптимизация сроков зажигания, фаз газораспределения, геометрии камеры сгорания, параметров впрыска, таких как время впрыска, продолжительность впрыска, давление впрыска и число отверстий в соплах / расположение, интенсивность завихрений и т. Д. Действительно важны для достижения уровня производительности двигателя, конкурентоспособного по сравнению с Современными дизельными двигателями прямого впрыска [28-29]. Однако, эта мера недостаточна, и система будет восприимчивой к предварительному воспламенению, как указано выше. Поэтому необходимы дополнительные операции, такие как использование других методов, таких как EGR и методы последующей обработки, чтобы довести эмиссию NO_x до приемлемого уровня [30].

Дизайн эксперимента

Четырехцилиндровый четырехтактный двигатель с непосредственным впрыском водорода был смоделирован с использованием программного обеспечения

shown in Figure 1. The specific engine parameters used to make the model are listed in Table 1. It is important to indicate that the intake and exhaust ports of engine cylinders are modeled geometrically with pipes.

RESULTS AND DISCUSSION

A lean mixture is one in which the amount of fuel is less than stoichiometric mixture. This leads to fairly easy to get an engine start. Furthermore, the combustion reaction will be more complete. Additionally, the final combustion temperature is lower reducing the amount of pollutants. Figure 2 shows the effect of air-fuel ratio on the brake mean effective pressure. The air-fuel ratio AFR was varied from rich limit ($AFR = 27.464:1$ based on mass where the equivalence ratio $\phi = 1.2$) to a very lean limit ($AFR = 171.65$ where $\phi = 0.2$) and engine speed varied from 2500 rpm to 4500 rpm. BMEP is a good parameter for comparing engines with regard to design due to its independent on the engine size and speed. It can be seen that BMEP decreases with increases of AFR and speed. This decrease happens with two different behaviors. For rich mixtures (low AFR), BMEF decreases almost linearly, then BMEP falls with a non-linear behavior. Higher linear range can be recognized for higher speeds. For 4500 rpm, the linear range is continuing until AFR of 42.9125 ($\phi = 0.8$). The non-linear region becomes more predominant at lower speeds and the linear region cannot be specified there. The total drop of BMEP within the studied range of AFR was 8.08 bar for 4500 rpm compared with 10.91 bar for 2500 rpm. At lean operating conditions ($AFR = 171.65$, $\phi = 0.2$ the engine gives maximum power ($BMEP = 1.635$ bar) at lower speed 2500 rpm) compared with the power ($BMEP = 0.24$ bar) at speed 4500 rpm. Due to dissociation at high temperatures following combustion, molecular oxygen is present in the burned gases under stoichiometric conditions. Thus some additional fuel can be added and partially burned. This increases the temperature and the number of moles of the burned gases in the cylinder. These effects increases the pressure were given increase power and mean effective pressure.

CONCLUSION

The present study considered the performance characteristics of a four cylinders hydrogen fueled internal combustion engine with hydrogen being injected directly in the cylinder. The following conclusions are drawn: (i) At very lean conditions with low engine speeds, acceptable BMEP can be reached, while it is unacceptable for higher speeds. Lean operation leads

GTPower. Расчетная модель четырех цилиндров, четырехтактного двигателя с прямым впрыском водорода показана на рисунке 1. Специфические параметры двигателя, используемые для изготовления модели, перечислены в таблице 1. Важно указать, что впускной и выпускной порты цилиндров двигателя моделируется геометрически с трубами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Плохая смесь - это смесь, в которой количество топлива меньше, чем стехиометрическая смесь. Это приводит к довольно простому запуску двигателя. Более того, реакция горения будет более полной. Кроме того, конечная температура горения является более низкой, уменьшая количество загрязняющих веществ. На рисунке 2 показано влияние соотношения воздух-топливо на среднее эффективное тормозное давление. Отношение воздух-топливо AFR варьировалось от богатого предела ($AFR = 27,464: 1$ в зависимости от массы, где отношение эквивалентности $\phi = 1,2$) до очень сухого предела ($AFR = 171,65$, где $\phi = 0,2$), и частота вращения двигателя изменялась от 2500 об / мин До 4500 об / мин. BMEP является хорошим параметром для сравнения двигателей с точки зрения конструкции благодаря независимости от размера и скорости двигателя. Можно видеть, что BMEP уменьшается с увеличением AFR и скоростью. Это снижение происходит с двумя разными типами поведения. Для богатых смесей (низкий AFR), BMEF уменьшается почти линейно, тогда BMEP падает с нелинейным поведением. Более высокий линейный диапазон может быть распознан для более высоких скоростей. При 4500 об / мин линейный диапазон продолжается до AFR 42,9125 ($\phi = 0,8$). Нелинейная область становится более преобладающей на низких скоростях, и линейная область не может быть указана там. Общее падение BMEP в исследуемом диапазоне AFR составляло 8,08 бар при 4500 об / мин по сравнению с 10,91 бар при 2500 об / мин. В худших условиях работы ($AFR = 171,65$, $\phi = 0,2$ двигатель дает максимальную мощность ($BMEP = 1,635$ бар) при меньшей скорости 2500 об / мин) по сравнению с мощностью ($BMEP = 0,24$ бар) при скорости 4500 об / мин. Из-за диссоциации при высоких температурах после сгорания молекулярный кислород присутствует в выжженных газах в стехиометрических условиях. Таким образом, можно добавить дополнительное количество топлива и частично сжечь его. Это увеличивает температуру и количество молей сгоревших газов в цилиндре. Эти эффекты увеличивают давление, давали увеличение мощности и среднее эффективное давление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании рассматриваются эксплуатационные характеристики четырехцилиндрового двигателя с водородным топливом, работающего на внутреннем сгорании, причем водород закачивается непосредственно в цилиндр. Делаются следующие

to small values of BMEP compared with rich conditions. (ii) Maximum brake thermal efficiency can be reached at mixture composition in the range of ($\phi = 0.9$ to 0.8) and it decreases dramatically at leaner conditions. (iii) The desired minimum BSFC occurs within a mixture composition range of ($\phi = 0.7$ to 0.9). The operation with very lean condition (ϕ 4500) consumes unacceptable amounts of fuel.	выводы: (i) При очень сухих условиях с низкой частотой вращения двигателя приемлемый ВМЕР может быть достигнут, в то время как для более высоких скоростей это неприемлемо. Бережливая операция приводит к небольшим значениям ВМЕР по сравнению с богатыми условиями. (Ii) Максимальная тепловая эффективность торможения может быть достигнута при составе смеси в диапазоне ($\phi = 0,9-0,8$), и она резко уменьшается при более компактных условиях. (Iii) Требуемый минимальный BSFC находится в диапазоне состава смеси ($\phi = 0,7-0,9$). Операция с очень низким уровнем потребления (ϕ 4500) расходует недопустимое количество топлива.
A survey on modeling, biofuels, control and supervision systems applied in internal combustion engines	Обзор систем моделирования, биотоплива, контроля и надзора, применяемых в двигателях внутреннего сгорания
ABSTRACT In this work, we present a survey on different topics related to Internal Combustion (IC) engines. The purpose of this work is to show the evolution on modeling, use of biofuels, simulation and/or implementation of different types of control laws applied to the IC engines. In the modeling section, we present a classification of the IC engines models according to their type; in this classification linear, nonlinear, and based on Neural Networks (NN) models are included. In the biofuels section, we included different works classified according to the used biofuel. In this classification, we consider pure biofuels (ethanol, methanol, hydrogen), gasoline-alcohol blends and gasoline-alcohol blend plus hydrogen as additive. In the control section, we include a classification according to the type of control, these are model-based control, observer-based control and intelligent control. Furthermore, in this section we include a review about Fault Diagnosis strategies applied to IC engines. Moreover, we present an overview of the failures provoked by corrosion effects when biofuels are used. Introduction In this work, a literature investigation related to the Internal Combustion (IC) engines was developed. The main idea is giving an overview of different topics related to the IC combustion engine since the 70s to date; the purpose is to detect opportunity areas for future research related to the IC engine. Topics such as IC engines modeling, use of biofuels in the IC engine, design of control strategies applied in IC engines, design of supervision systems for the IC engine and corrosion effects due to the biofuel use were introduced. The importance of the IC engine modeling lies in the fact that the models are commonly used to show the IC engine variables behavior and prove different research hypothe-	АННОТАЦИЯ В этой работе мы представляем обзор по различным темам, связанным с двигателями внутреннего сгорания (ИС). Цель этой работы - показать эволюцию моделирования, использование биотоплива, моделирование и / или внедрение различных типов законов управления, применяемых к двигателям ИС. В разделе моделирования мы представляем классификацию моделей двигателей ИС по их типу; В этой классификации включены линейные, нелинейные и основанные на нейронных сетях (NN) модели. В разделе биотоплива мы включили различные работы, классифицированные в соответствии с используемым биотопливом. В этой классификации мы рассматриваем чистые виды биотоплива (этанол, метанол, водород), бензино-спиртовые смеси и смесь бензин-спирт плюс водород в качестве добавки. В разделе управления мы включаем классификацию в соответствии с типом управления, это контроль на основе модели, наблюдательный контроль и интеллектуальное управление. Кроме того, в этом разделе мы приводим обзор стратегий диагностики неисправностей, применяемых к двигателям ИС. Кроме того, мы представляем обзор сбоев, вызванных коррозионными эффектами при использовании биотоплива. Введение В этой работе было разработано литературное исследование, связанное с двигателями внутреннего сгорания (ИС). Основная идея - дать обзор различных тем, связанных с двигателем внутреннего сгорания с 70-х годов до настоящего времени; Цель состоит в том, чтобы выявить возможные области для будущих исследований, связанных с движком ИС. Были представлены такие темы, как моделирование двигателей ИС, использование биотоплива в двигателе ИС, разработка стратегий управления, применяемых в двигателях интегральных схем, разработка систем контроля за двигателем ИС и коррозионных эффектов, связанных с использованием биотоплива. Важность моделирования движка ИС заключается в том, что модели обычно используются для отображения поведения пере-

sis, they are also used to design control strategies and supervisory systems. In general, the IC engine modeling gives a wide perspective of the evolution of the system behavior allowing the user to take decisions on their research works. Otherwise, the biofuel importance lies in two facts: the gasoline use reduction and the noxious exhaust gases emission reduction; in this sense different experimental works have been developed in order to offer alternative fuels blends that could be used in the IC engines. In the present work, we show relevant research made in this field with the purpose of showing the biofuel use trends and the opportunity areas for possible future investigations. A critical issue concerning to the IC engines is the air fuel ratio control, in this sense different research works have been developed. In this overview, we present different control strategies focused on it; mainly we explored the model-based control, the observer-based control and the intelligent control. An important area of control is the design of supervision systems, which include fault diagnosis systems. The importance of the fault diagnosis lies in the fact that allows to know the exact moment of a fault occurrence. In this section we show the main findings on diagnosis systems applied to the IC engines and the possible opportunity areas in future investigations. Finally, due to the use of biofuel corrosion effects can be presented in IC engines provoking failures, thus we present important research papers on this field, where the authors present experimental analysis of the biofuels use to show the effects on the main IC engines components.

менных движка IC и доказывают различные гипотезы исследования, они также используются для разработки стратегий управления и систем контроля. В общем, моделирование двигателя IC дает широкую перспективу эволюции поведения системы, позволяя пользователю принимать решения в своих исследовательских работах. В противном случае значение биотоплива заключается в двух фактах: сокращение использования бензина и сокращение выбросов вредных выхлопных газов; В этом смысле различные экспериментальные работы были разработаны для того, чтобы предложить альтернативные виды топлива, которые могли бы использоваться в двигателях IC. В настоящей работе мы показываем соответствующие исследования, выполненные в этой области, с целью показать тенденции использования биотоплива и возможные области для возможных будущих исследований. Важнейшей проблемой, связанной с двигателями IC, является управление соотношением количества летного топлива, в этом смысле были разработаны различные исследовательские работы. В этом обзоре мы представляем различные стратегии управления, ориентированные на него; В основном мы исследовали основанный на модели элемент управления, наблюдательный контроль и интеллектуальный контроль. Важной областью контроля является проектирование систем контроля, которые включают системы диагностики неисправностей. Важность диагностики неисправностей заключается в том, что позволяет точно узнать момент возникновения неисправности. В этом разделе мы показываем основные выводы о системах диагностики, применяемых к двигателям IC, и о возможных областях возможностей в будущих исследованиях. Наконец, из-за использования эффектов коррозии биотоплива могут быть представлены в двигателях IC, провоцирующих сбои, поэтому мы представляем важные исследовательские работы в этой области, где авторы представляют экспериментальный анализ использования биотоплива, чтобы показать влияние на основные компоненты двигателей IC.

2 Тепловой расчет

Произведем расчет четырехтактного двигателя с впрыском бензоводородной смеси, предназначенного для легкового автомобиля.

Исходные данные: $V_L = 1.5$ л; $n_N = 5600$ мин⁻¹; $i = 4$; $\tau = 4$; $\varepsilon = 10,5$.

Расчет производится на следующих скоростных режимах: $n_{\min} = 900$ мин⁻¹; $n = 2000$ мин⁻¹; $n_M = 3500$ мин⁻¹; $n_N = 5000$ мин⁻¹; $n_{\max} = 5600$ мин⁻¹.

В соответствии с заданной степенью сжатия $\varepsilon = 10,5$ можно использовать бензин марки Аи-92.

Средний элементарный состав и молекулярная масса топлива:

Бензин: $C = 0,855$; $H = 0,145$ и $m_6 = 115$ кг/кмоль;

Водород: $H_2 = 1$ и $m_{H_2} = 2$ кг/кмоль.

Низшая теплота сгорания топлива:

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

Бензина: $H_{uB} = (33,91 \cdot 0,855 + 125,6 \cdot 0,145 - 2,51 \cdot 9 \cdot 0,145) \cdot 1000 = 43930$ кДж/кг.

Водорода: $H_{uH_2} = (125,6 \cdot H - 2,51 \cdot 9 \cdot H) \cdot 1000 = 116600$ кДж/кг

$H_{u(5\%)} = H_{uB} \cdot 0,95 + H_{uH_2} \cdot 0,05 = 46883,525$ кДж/кг.

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива:

Бензина:

$$L_{B0} = \frac{1}{0,208} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) = \frac{1}{0,208} \left(\frac{0,855}{12} + \frac{0,145}{4} \right) = 0,516 \text{ кмоль возд/кг топл}; \quad (2.2)$$

$$l_{B0} = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} C + 8H - O \right) = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} \cdot 0,855 + 8 \cdot 0,145 \right) = 14,957 \text{ кг возд/кг топл}. \quad (2.3)$$

Водорода:

$$L_{0H_2} = \frac{1}{0,208} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) = \frac{1}{0,208} \left(\frac{0}{12} + \frac{1}{4} \right) = 1,202 \text{ кмоль возд/кг топл};$$

$$l_{0H_2} = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} C + 8H - O \right) = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} \cdot 0 + 8 \cdot 1 \right) = 34,78 \text{ кг возд/кг топл.}$$

Топливо-воздушной смеси бензина с 5% водорода:

$$L_{0H_2} = L_{B0} \cdot 0,95 + L_{0H_2} \cdot 0,05 = 0,516 \cdot 0,95 + 1,202 \cdot 0,05 = 0,5512 \text{ кмоль возд/кг топл};$$
$$l_{0H_2} = l_{B0} \cdot 0,95 + l_{0H_2} \cdot 0,05 = 14,957 \cdot 0,95 + 34,78 \cdot 0,05 = 15,948 \text{ кг возд/кг топл.}$$

Удельная плотность газов:

$$\rho_{H_2} = 0,089 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_B = 1,293 \text{ кг/м}^3$$

Количество бензина введенного в удельный объем с учетом добавки 5% газообразного водорода.

$$l_{0B}' = l_{0B} / (\alpha \cdot l_{0B} + 0,05 \cdot (\alpha \cdot l_{0H_2} + \rho_B / \rho_{H_2})) = 0,858482 \quad (2.4)$$

Средняя молекулярная масса топлива (бензина с добавкой 5% от массы бензина водорода):

$$m_T = ((l_{0B} / \mu_B) \cdot \mu_B + (l_{0H_2} / \mu_{H_2}) \cdot \mu_{H_2}) / ((l_{0B} / \mu_B) + (l_{0H_2} / \mu_{H_2})) = 31,8 \text{ кг/кмоль} \quad (2.5)$$

Применение впрыска топлива и электронного управления позволяет принять коэффициент избытка воздуха на основных режимах $\alpha = 1.05$, на режиме минимальной и максимальной частоты вращения $\alpha = 1$.

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

Количество горючей смеси:

$$M_1 = \alpha L_0 + l/m_T; \text{ кмоль гор. см/кг топл.} \quad (2.6)$$

Количество отдельных компонентов продуктов сгорания при $\alpha \geq 1$:

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12}; \text{ кмоль } CO_2/\text{кг топл}; \quad (2.7)$$

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2}; \text{ кмоль } H_2O/\text{кг топл}; \quad (2.8)$$

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

Общее количество продуктов сгорания:

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

Коэффициент молекулярного изменения свежей смеси

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

Результаты расчета параметров рабочего тела приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры рабочего тела

n, мин ⁻¹	α	M ₁ , кмоль гор.см./кг топл.	M _{CO₂} , кмоль CO ₂ /кг топл.	M _{CO} , кмоль CO/кг топл.	M _{H₂O} , кмоль H ₂ O/кг топл.	M _{H₂} , кмоль H ₂ /кг топл.	M _{N₂} , кмоль N ₂ /кг топл.	M ₂ , кмоль пр.сг./кг топл.	μ_0
900	1	0,582526	0,0676875	0	0,093875	0	0,436457	0,5980192	1,026597
2000	1.05	0,610187	0,0676875	0	0,093875	0	0,45828	0,6198421	1,015823
3500	1.05	0,610187	0,0676875	0	0,093875	0	0,45828	0,6198421	1,015823
5000	1.05	0,610187	0,0676875	0	0,093875	0	0,45828	0,6198421	1,015823
5600	1	0,582526	0,0676875	0	0,093875	0	0,436457	0,5980192	1,026597
Двигатель ВАЗ-2112									
900	0.96	0,504849	0,0655	0,0057	0,0696	0,0029	0,3923	0,536704	1,063097
2600	1	0,5247	0,0713	0	0,0725	0	0,4087	0,5524	1.05243
3700	1	0,5247	0,0713	0	0,0725	0	0,4087	0,5524	1.05243
5000	1	0,5247	0,0713	0	0,0725	0	0,4087	0,5524	1.05243
5600	1	0,5247	0,0713	0	0,0725	0	0,4087	0,5524	1.05243

Атмосферные условия:

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

Температура остаточных газов приведена в таблице.

Давление остаточных газов:

$$p_r = p_k(1,035 + A_p \cdot 10^{-8} n^2), \quad (2.12)$$

где $p_{rN} = 1,18p_0 = 1,18 \cdot 0,1 = 0,118$ МПа;

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

Результаты расчета параметров окружающей среды и остаточных газов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры окружающей среды и остаточных газов

$n, \text{мин}^{-1}$	$\rho_k, \text{кг/м}^3$	$T_k, \text{К}$	$p_k, \text{Мпа}$	$T_r, \text{К}$	$p_r, \text{Мпа}$
900	1,189	293	0,1	1280	0,107
2000	1,189	293	0,1	1240	0,109
3500	1,189	293	0,1	1250	0,113
5000	1,189	293	0,1	1280	0,116
5600	1,189	293	0,1	1320	0,118
Двигатель ВАЗ-2112					
900	1,189	293	0,1	1080	0,109
2600	1,189	293	0,1	1161	0,112
3700	1,189	293	0,1	1245	0,114
5000	1,189	293	0,1	1265	0,116
5600	1,189	293	0,1	1305	0,118

Температура подогрева свежего заряда на номинальном скоростном режиме принимается $\Delta T_N = 8^\circ\text{C}$.

$$\text{Тогда, } A_T = \Delta T_N / (110 - 0,0125n_N) = 8 / (110 - 0,0125 \cdot 5600) = 0,2;$$

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

Плотность заряда на впуске:

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

Потери давления на впуске;

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

Давление в конце впуска:

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

Коэффициент остаточных газов:

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

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

Температура в конце впуска:

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

Коэффициент наполнения:

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

Удельный объем рабочего тела в конце процесса наполнения

$$V_a = 8.314 \cdot 10^{-3} \left[\left(\alpha \cdot \frac{l_0}{\mu_B} + \frac{1}{\mu_m} \right) T_a \right] / [(1 + \alpha \cdot l_0) p_a] \text{ (м}^3\text{)}, \quad (2.19)$$

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

Результаты расчета процесса впуска приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Расчет процесса впуска

n, мин ⁻¹	ΔT, °C	Δp _а , Мпа	p _а , Мпа	φ _{оч}	φ _{доз}	γ _г	T _а , К	η _v	V _а , К
900	24,6875	0,006783	0,093217	0,99	0,9	0,033925	349,263	0,752368	1,029192
2000	21,25	0,010275	0,089725	0,94	0,96	0,032378	343,2838	0,787097	1,043288
3500	16,5625	0,013004	0,086996	0,88	1,02	0,029589	336,5891	0,829221	1,055293
5000	11,875	0,017699575	0,0823	0,84	0,97	0,031428	334,4653	0,749406	1,044442
5600	10	0,019425	0,080575	0,8	0,95	0,030549	333,147	0,722023	1,104081
Двигатель ВАЗ-2112									
900	19,75	0,005779	0,094221	1	0,85	0,043126	344,4703	0,721787	0,989923
2600	15,5	0,010275	0,089725	0,94	0,93	0,036289	338,3532	0,770691	1,028942
3700	12,75	0,013588	0,086412	0,98	1	0,033797	336,4559	0,804532	1,05791
5000	9,5	0,016054	0,083946	0,81	0,95	0,029931	330,4714	0,758778	1,08835
5600	8	0,019425	0,080575	0,77	0,94	0,029751	330,0071	0,721778	1,150416

Коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси

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

Значение показателя политропы сжатия

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

Давление, температура и удельный объём в конце сжатия:

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

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

Удельный объём, давление и температура рабочего тела в момент воспламенения, при угле опережения зажигания Θ ,

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

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

Результаты расчета процесса сжатия рабочего тела и начала воспламенения смеси приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Давление, температура и удельный объём в конце сжатия и воспламенения:

$n, \text{мин}^{-1}$	μ	n_1	$P_c, \text{МПа}$	$T_c, \text{К}$	$\Theta^\circ \text{ПКВ}$	$V_y, \text{м}^3/\text{кг}$	$P_y, \text{МПа}$	$T_y, \text{К}$
900	1,025724	1,37	2,336282	833,667	13	0,1121	1,913	789,86
2000	1,015327	1,374615	2,273304	828,3352	14	0,118	1,8066	778,05
3500	1,015368	1,37286	2,19508	808,8364	19	0,134	1,4796	726,67

5000	1,015341	1,37514	2,087759	808,0534	23	0,15747	1,2128	696,77
5600	1,025809	1,37557	2,046047	805,6825	25	0,1689	1,1001	680,13
Двигатель ВАЗ-2112								
900	1,060488	1,37058	2,364652	823,3493	15	0,115	1,823	767,52
2600	1,050596	1,372	2,259369	811,433	20	0,1347	1,469	722,11
3700	1,050718	1,3728	2,180028	808,4022	23	0,1509	1,267	697,718
5000	1,050909	1,37378	2,122703	795,8551	26	0,166	1,098	665,279
5600	1,050917	1,3753	2,044748	797,5824	28	0,182	0,977	652,082

Коэффициент выделения теплоты δ ;

$$\delta = \frac{[H_U - 119950(1 - \alpha)L_o]}{H_U}, \quad (2.26)$$

Коэффициент использования теплоты Ψ , учитывающий потери теплоты от теплопередачи к стенкам камеры сгорания в процессе сгорания, потери от диссоциации продуктов сгорания.

Коэффициент эффективности сгорания топлива ξ :

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

Удельная теплота сгорания рабочей смеси

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

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

Давление газов в процессе сгорания

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

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

Доля топлива, сгоревшего на рассматриваемом участке:

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

Среднее значение доли топлива сгоревшего на участке 1-2;

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

Отношение средних теплоёмкостей рабочего тела на участке 1-2.

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

Фактор теплоёмкостей K_{1-2}

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

Средняя температура T_{1-2} на участке 1-2.

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

Температуру T_2 газов в процессе сгорания:

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

где:

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

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

Средний на рассматриваемом участке коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси,

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

Доля выгоревшего топлива χ рассчитывается по уравнению выгорания:

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

Относительная скорость сгорания топлива (на 1⁰ поворота коленчатого вала):

$$w_0 = 6.908(m+1) \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^m \cdot \exp \left[-6.908 \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m+1} \right] \quad (2.42)$$

Основные коэффициенты термодинамического расчета приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Коэффициенты термодинамического расчета:

n, мин ⁻¹	δ	Ψ	ζ	q _z , кДж/кг	E _z , МПа	φ_z , град, пкв	m
900	1	0,94	0,94	2533,497	51,955535	28	2,5
2000	1	0,95	0,95	2452,123	49,116924	36	2,6
3500	1	0,96	0,96	2484,648	49,21437	42	2,7
5000	1	0,97	0,97	2506,053	47,2572	50	2,8
5600	1	0,98	0,98	2649,959	49,24586	54	2,9
Двигатель ВАЗ-2112							
900	0.9435	0,81	0,764277	2095,696	43,98798	40	3.1
2600	1	0,86	0,86	2284,733	46,40438	48	3.2
3700	1	0,96	0,96	2556,549	50,28953	55	3.3
5000	1	0,97	0,97	2592,875	50,44589	58	3.4
5600	1	0,99	0,99	2646,799	49,49647	62	3.5

Степень последующего расширения при V_z

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

Средний показатель политропы расширения находится методом последовательных приближений из уравнения:

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

Параметры в конце процесса расширения как политропного процесса

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

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

Текущие значения удельного объёма, давления и температуры газов до 540° ПКВ

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

где φ_{PT} – текущее значение поворота коленчатого вала

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

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

Температура отработавших газов

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

погрешность расчёта Δ :

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

Результаты расчета процесса расширения и выпуска приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Расчет процесса расширения и выпуска

$n, \text{мин}^{-1}$	$V_z, \text{м}^3$	$T_z, \text{К}$	$P_z, \text{МПа}$	δ	n_2	$P_b, \text{МПа}$	$T_b, \text{К}$	$T_r, \text{К}$	$\Delta, \%$
900	0,1178	3357,56	7,925	8,687	1,168	0,6349	2337,02	1290,866	0,848
2000	0,1442	3156,08	6,048	7,273	1,173	0,5907	2241,572	1276,149	2,915
3500	0,1498	3150,69	5,808	7,073	1,173	0,5859	2248,466	1299,048	3,923
5000	0,1763	3082,31	4,831	6,317	1,174	0,5553	2238,257	1328,065	4,08
5600	0,1894	3142,67	4,615	5,965	1,171	0,5701	2315,608	1369,725	3,767
Двигатель ВАЗ-2112									
900	0,1494	2639,83	5,121	6,688	1,188	0,5354	1846,58	1086,178	0,572
2600	0,1684	2756,27	4,714	6,139	1,1835	0,5504	1975,7	1162,08	0,093
3700	0,1951	2913,76	4,303	5,474	1,1775	0,5815	2155,05	1244,545	-0,036
5000	0,1972	2929,05	4,279	5,474	1,1767	0,5789	2168,77	1265,439	0,0347
5600	0,2052	2976,31	4,179	5,474	1,175	0,5669	2209,79	1309,556	0,349

Теоретическая индикаторная работа цикла

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

Расчётное среднее индикаторное давление

$$P_{iT} = \frac{\varepsilon \cdot L_{iT}}{(\varepsilon - 1)V_a}, \quad \text{МПа}. \quad (2.54)$$

Индикаторный коэффициент полезного действия

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

Удельный индикаторный расход топлива

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

Результаты расчета индикаторных показателей рабочего цикла приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Индикаторные показатели рабочего цикла

$n, \text{мин}^{-1}$	$L_i, \text{кДж}$	$P_i, \text{Мпа}$	$N_i, \text{кВт}$	η_i	$g_i, \text{г/кВт*ч}$
900	1,30508	1,4086238	15,847017	0,5621576	153,36812
2000	1,2068431	1,2722899	31,807247	0,5078	168,66718
3500	1,2331362	1,2855368	56,242237	0,4870225	175,86291
5000	1,2156317	1,2064965	75,406034	0,5057589	169,34788
5600	1,2834843	1,2553576	87,875033	0,5220472	165,15183
Двигатель ВА3-2112					
900	1,0012	1,1060343	12,442886	0,4289854	191,03093
2600	1,09	1,1651984	37,868947	0,4405874	186,00051
3700	1,1957	1,2379594	57,255621	0,4484105	182,75552
5000	1,224	1,2533459	78,334121	0,4813589	170,24613
5600	1,2406	1,2210353	85,47247	0,4929888	166,22992

Давление механических потерь при $S/D = 71/82 = 0.865$, если средняя скорость поршня: $v_n = \frac{Sn}{30}$, м/с

Среднее давление механических потерь

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

Среднее эффективное давление

$$P_e = P_{iT} - P_M, \text{МПа} . \quad (2.58)$$

Механический К.П.Д.

$$\eta_M = \frac{P_e}{P_{iT}} . \quad (2.59)$$

Эффективный К.П.Д.

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_M . \quad (2.60)$$

Удельный эффективный расход топлива

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_M}, \text{кВт} \cdot \text{ч} . \quad (2.61)$$

Эффективная мощность

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

Часовой расход топлива

$$G_T = N_e \cdot g_e, \text{ кг/ч.} \quad (2.63)$$

Крутящий момент

$$M_e = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot N_e}{\pi \cdot n}, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.64)$$

Результаты расчета эффективных показателей двигателя приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Эффективные показатели двигателя.

$n, \text{ мин}^{-1}$	$V_{\text{п.ср}}, \text{ м/с}$	$p_m, \text{ Мпа}$	$p_e, \text{ Мпа}$	η_m	η_e	$g_e, \text{ г/(кВт} \cdot \text{ч)}$	$N_e, \text{ кВт}$	$M_e, \text{ Н} \cdot \text{м}$	$G_T, \text{ кг/ч}$
900	2,13	0,0671	1,341508	0,952353	0,535373	161,0412	15,09196	160,1103	2,430427
2000	6,153	0,1202	1,17081	0,920238	0,467297	183,2864	29,27025	139,7373	5,364839
3500	8,283333	0,14834	1,137197	0,884609	0,430824	198,8031	49,75236	135,7256	9,890923
5000	11,833	0,1952	1,011297	0,838209	0,423932	202,0353	63,20603	120,6993	12,76985
5600	13,253	0,2139	1,041414	0,829575	0,433077	199,08	72,89895	124,2938	14,51272
Двигатель ВАЗ-2112									
900	2,13	0,0671	1,0389	0,9393	0,4029	273,3719	11,68	123,99	3,377
2600	6,153	0,1202	1,0449	0,8968	0,3951	267,3998	33,96	124,72	9,043
3700	8,756	0,1546	1,0834	0,8751	0,3924	258,8332	50,11	129,3	12,464
5000	11,833	0,1952	1,0581	0,8442	0,4064	261,652	66,13	126,29	15,336
5600	13,253	0,2139	1,0071	0,8248	0,4066	271,5434	70,49	120,19	17,208

3 Тепловой баланс двигателя

Общее количество теплоты, введенной в двигатель с топливом:

$$Q_o = \frac{H_u G_T}{3.6} = \frac{43930 G_T}{3.6} = 12203 G_T \quad (3.1)$$

Теплота, эквивалентная эффективной работе за 1 с:

$$Q_e = 1000 N_e \text{ и } q_e = Q_e * 100 / Q_o \quad (3.2)$$

Теплота, передаваемая охлаждающей среде:

$$Q_B = \frac{ciD^{1+2m}n^m(H_u - \Delta H_u)}{\alpha H_u}, \quad (3.3)$$

$$q_B = Q_B * 100 / Q_o; \quad (3.4)$$

где $c = 0,45 \dots 0,53$ – коэффициент; i – число цилиндров; D – диаметр цилиндра, см; n – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин^{-1} ; $m = 0,6 \dots 0,7$ – показатель степени.

Теплота, унесенная с отработанными газами:

$$Q_r = \left(\frac{G_T}{3.6} \right) \left\{ M_2 \left[(mc_V'')_{t_o}^{t_r} + 8.315 \right]_{t_o}^{t_r} - M_1 \left[(mc_V'')_{t_o}^{t_{20}} + 8.315 \right]_{t_o}^{t_{20}} \right\}, \quad (3.5)$$

$$q_r = Q_r * 100 / Q_o \quad (3.6)$$

где $(mc_V'')_{t_o}^{20} = 20.775 \text{ кДж}/(\text{кмоль} * \text{град})$ – теплоемкость свежего заряда.

$(mc_V'')_{t_o}^{t_r}$ - теплоемкость остаточных газов.

Теплота, потерянная из-за химической неполноты сгорания топлива.

$$Q_{н.с} = \Delta H_U * G_T / 3,6 \quad (3.7)$$

$$q_{н.с.} = Q_{н.с.} * 100 / Q_0 \quad (3.8)$$

Неучтенные потери теплоты:

$$Q_{ост} = Q_0 - (Q_e + Q_g + Q_r + Q_{н.с}) , \quad (3.9)$$

$$q_{ост} = Q_{ост} * 100 / Q_0 \quad (3.10)$$

Результаты расчетов тепловой баланс двигателя сводим в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 - Тепловой баланс разрабатываемого двигателя:

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

4 Кинематический расчет

Длинна шатуна при отношении радиуса кривошипа к длине шатуна $\lambda=0,293$:

$$L_{ш} = R/\lambda = 35,5 / 0,293 = 121 \text{ мм} \quad (4.1)$$

Перемещение поршня:

$$S_x = r \left[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right], \text{ мм} \quad (4.2)$$

Скорость поршня:

$$V_n = \omega \cdot R \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right) \text{ м/с}, \quad (4.3)$$

где $\omega = \frac{\pi n}{30}$ - угловая скорость вращения коленчатого вала, рад/с.

$$\omega = 3,14 \cdot 5200 / 30 = 544,5 \text{ рад/с} \quad (4.3)$$

Средняя скорость поршня:

$$V_{п.ср} = S_n / 30 = 0,071 \cdot 5200 / 30 = 13,25 \text{ м/с} \quad (4.4)$$

Ускорение поршня:

$$j = \omega^2 R (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi), \text{ м/с}^2 \quad (4.5)$$

5 Динамический расчет двигателя

Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма:

- масса поршневой группы (для поршня из алюминиевого сплава $m_{\pi}=80 \text{ кг/м}^2$):

$$m_n = m_{\pi} \cdot F_n = 80 \cdot 0,005278 = 0,422 \text{ кг} \quad (5.3)$$

- масса шатуна (для стального кованного шатуна $m_{ш}=100 \text{ кг/м}^2$):

$$m_{ш} = m_{ш} \cdot F_n = 100 \cdot 0,005278 = 0,527 \text{ кг} \quad (5.4)$$

- масса неуравновешенных частей (для стального кованого вала $m_k=120 \text{ кг/м}^2$):

$$m_k = m_k \cdot F_n = 120 \cdot 0,005278 = 0,633 \text{ кг} \quad (5.5)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца:

$$m_{ш.п.} = 0,275 \cdot m_{ш} = 0,275 \cdot 0,527 = 0,1451 \text{ кг} \quad (5.6)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа:

$$m_{ш.к.} = 0,725 \cdot m_{ш} = 0,725 \cdot 0,527 = 0,382 \text{ кг} \quad (5.7)$$

Массы, совершающие возвратно-поступательное движение:

$$m_j = m_n + m_{ш.п.} = 0,422 + 0,1451 = 0,567 \text{ кг} \quad (5.8)$$

Массы, совершающие вращательное движение:

$$m_R = m_K + m_{ш.к} = 0,633 + 0,382 = 1,016 \text{ кг} \quad (5.9)$$

Силы инерции:

$$P_j = -m_j j = 0,746 \cdot j \quad (5.10)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна одного цилиндра:

$$K_{Rш} = -m_{ш.к.} \cdot R \cdot \omega^2 \cdot 10^{-3} = -4027,722 \text{ кН} \quad (5.11)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа:

$$K_{RK} = -m_K \cdot R \cdot \omega^2 \cdot 10^{-3} = -6666,5 \text{ кН} \quad (5.12)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа:

$$K_R = K_{Rш} + K_{RK} = -10694,3 \text{ кН} \quad (5.13)$$

Суммарные силы определяются по формулам ниже.

Сила, сосредоточенная на оси поршневого пальца:

$$P = \Delta P_r + P_j \quad (5.14)$$

Нормальная сила определяется по формуле:

$$N = P \tan \beta \quad (5.15)$$

Сила (кН), действующая вдоль шатуна:

$$S = P \cdot (1 / \cos \beta) \quad (5.16)$$

Сила, действующая по радиусу кривошипа (кН):

$$K = P \cdot \cos(\varphi + \beta) / \cos \beta \quad (5.17)$$

Полная тангенциальная сила (кН):

$$T = \frac{P \sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta} \quad (5.18)$$

Крутящий момент одного цилиндра:

$$M_{кр.ц} = T \cdot R \quad (5.19)$$

Период изменения крутящего момента четырехтактного двигателя с равными интервалами между вспышками:

$$\theta = 720 / i = 720 / 4 = 180^\circ \quad (5.20)$$

Средний крутящий момент двигателя:

- по данным теплового расчета:

$$M_{кр.ц.} = M_i = \frac{M_e}{\eta_M} = 106 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.21)$$

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

$$M_{кр.ср.} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{M_{кр.i} + M_{кр.i+1}}{2} \right) \cdot 10^\circ}{360^\circ} = 109,01 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.22)$$

Ошибка:

$$\Delta = ((168-161) / 168) * 100 = 3\% \quad (5.23)$$

Максимальный и минимальный крутящие моменты:

$$M_{кр. max} = 109,01 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (5.24)$$

$$M_{кр. min} = 100,61 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (5.25)$$

Суммарная сила, действующая на шатунную шейку по радиусу кривошипа:

$$P_{\kappa} = K + K_{Rш}, \text{ Н} \quad (5.26)$$

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

$$R_{ш.ш.ср} = \sum_{i=1}^n ((R_{ш.ш.i} + R_{ш.ш.i+1}) / 2) * 10^{\circ} / 720^{\circ} = 6628 \text{ Н} \quad (5.27)$$

Суммарная сила, действующая на колено вала по радиусу кривошипа:

$$K_{P\kappa} = P_{\kappa} + K_{Rk}, \text{ Н} \quad (5.28)$$

Результирующая сила, действующая на колено вала:

$$R_k = \sqrt{R_{ш.ш.}^2 + K_{Rk}^2} \quad (5.29)$$

Сила, действующая на первую коренную шейку:

$$R_{\kappa.ш.1} = -0,5 * R_{k1} \quad (5.30)$$

Сила, действующая на вторую коренную шейку:

$$R_{\kappa.u.2} = \sqrt{T_{k2}^2 + K_{k2}^2}, \quad (5.31)$$

где:

$$T_{k2} = -0.5 \cdot (T_1 + T_2 \cdot \cos \gamma_{k(1-2)} - K_{pk2} \cdot \sin \gamma_{k(1-2)}) = -0.5 \cdot (T_1 + T_2 \cdot \cos 180^\circ - K_{pk2} \cdot \sin 180^\circ) = -0.5 \cdot (T_1 - T_2); \quad (5.32)$$

$$K_{k2} = -0.5 \cdot (K_{pk1} + T_2 \cdot \sin \gamma_{k(1-2)} - K_{pk2} \cdot \cos \gamma_{k(1-2)}) = -0.5 \cdot (T_1 + T_2 \cdot \sin 180^\circ - K_{pk2} \cdot \cos 180^\circ) = -0.5 \cdot (K_{pk1} - K_{pk2}). \quad (5.33)$$

Сила, действующая на третью коренную шейку:

$$R_{\kappa.u.3} = \sqrt{T_{k3}^2 + K_{k3}^2}, \quad (5.34)$$

где:

$$T_{k3} = -0.5 \cdot (T_2 + T_3 \cdot \cos \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} \cdot \sin \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0.5 \cdot (T_2 + T_3 \cdot \cos 0^\circ - K_{pk3} \cdot \sin 0^\circ) \cdot \cos 180^\circ = 0.5 \cdot (T_2 + T_3); \quad (5.35)$$

$$K_{k2} = -0.5 \cdot (K_{pk2} + T_3 \cdot \sin \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} \cdot \cos \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0.5 \cdot (K_{pk2} + T_3 \cdot \sin 0^\circ - K_{pk3} \cdot \cos 0^\circ) \cdot \cos 180^\circ = 0.5 \cdot (K_{pk2} - K_{pk3}). \quad (5.36)$$

По этим данным строим полярные диаграммы нагрузки на первую, вторую и третью коренные шейки, по полученным данным из диаграмм, приведенных на плакате определяем нагрузки:

- для 1 (5)-й коренной шейки:

$$R_{\kappa.u.1cp} = \sum_{i=1}^n ((R_{\kappa.u.1i} + R_{\kappa.u.1i+1}) / 2) \cdot 10^\circ / 720^\circ = 3929 \quad (5.37)$$

откуда максимальная нагрузка $R_{\kappa.u.1max} = 5529H$ и минимальная нагрузка $R_{\kappa.u.1min} = 3057H$;

- для 2 (4)-й коренной шейки:

$$R_{\kappa.ш2cp} = \sum_{i=1}^n ((R_{\kappa.ш2i} + R_{\kappa.ш2i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 3397H \quad (5.38)$$

откуда максимальная нагрузка $R_{\kappa.ш2max} = 12492H$ и минимальная нагрузка $R_{\kappa.ш2min} = 518H$

- для 3-й коренной шейки:

$$R_{\kappa.ш3cp} = \sum_{i=1}^n ((R_{\kappa.ш3i} + R_{\kappa.ш3i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 6628H \quad (5.39)$$

откуда максимальная нагрузка $R_{\kappa.ш3max} = 9716H$ и минимальная нагрузка $R_{\kappa.ш3min} = 2358H$

Равномерность крутящего момента:

$$\mu = (M_{кр.max} - M_{кр.min}) / M_{кр.ср.} = [499,87 - (201,57)] / 147,93 = 4,74 \quad (5.52)$$

Избыточная работа крутящего момента:

$$L_{изб} = A \cdot 4 \cdot \pi / (4 \cdot 90) = 13961 \cdot 4 \cdot \pi / 360 = 492,05 Дж, \quad (5.53)$$

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

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

Момент инерции движущихся масс двигателя, приведенных к оси коленчатого вала

$$I_0 = L_{изб} / (\delta \cdot \omega^2) = 492,02 / (0,015 \cdot 544,5^2) = 0,110 кг \cdot м^2 \quad (5.54)$$

6 Безопасность и экологичность бакалаврской работы

6.1 Оценка безопасности и экологичности объекта разработки бакалаврской работы

6.1.1 Оценка взрыво-пожаробезопасности объекта разработки бакалаврской работы

Пожаробезопасность относится в большей степени к двигателям на жидких топливах, и в связи с тем что основное топливо, по сравнению с базовым бензиновым двигателем ВАЗ-2112, не поменялось, то условия пожаробезопасности остались прежними.

В тоже время наличие, по условиям задания на бакалаврскую работу, добавки водорода, представляющего собой газовую фракцию, значительно повышает требования к взрывобезопасности, что требует хранения при наличии водорода на борту в хорошо проветриваемых или открытых стоянках и местах хранения, далее баллон с водородом следует размещать согласно правилам к размещению газовых баллонов на борту автомобиля.

6.1.2 Оценка экологичности, по нормируемым продуктам отработавших газов, объекта разработки бакалаврской работы

Как показывает обзор аналогов и известной литературы, а также опыт работы руководителя бакалаврской работы, добавка водорода оказывает существенное влияние на токсичность отработавших газов двигателя. Разберем это влияние отдельно для каждого токсичного компонента в отдельности:

- Несгоревшие углеводороды (СН) - при добавке водорода к основному углеводородному топливу, заметно повышается скорость сгорания и, следовательно, полнота сгорания топлива, что приводит к снижению выбросов СН на основных режимах работы двигателя, в тоже время за счет значительного повышения стабильности сгорания, в условиях сильной забалластированности остаточным газами,

на режимах холостого хода и малых нагрузок, добавка водорода снижает токсичность по СН уже значительно больше, так как количество пропусков зажигания сокращается.

- Угарный газ (CO) - добавка водорода повышает полноту сгорания и среднюю температуру во фронте пламени, а также снижает концентрацию атомов углерода участвующих в процессе сгорания, все это обеспечивает снижение выбросом угарного газа на всех режимах работы двигателя.
- Твердые частицы (сажа) - согласно нормам по ограничению токсичности отработавших газов ЕВРО-5 и 6, в двигателях с искровым зажиганием нормируются и выбросы твердых частиц, так при добавке водорода условия при которых возможно образование твердых частиц становятся практически невозможными на всех режимах работы двигателя, при поддержании стехиометрического или обедненного состава смеси. К условиям образования сажи относят высокотемпературное окисление углерода при недостатке кислорода.
- Оксиды азота (NO и NO₂) - это не полный оксид азота, который высоко активный и самый опасный из токсичных продуктов сгорания, при добавке водорода повышается температура сгорания за фронтом пламени на режимах полных и частичных нагрузок, что повышает концентрацию по оксиду азота в отработавших газах.
- Углекислый газ (CO₂) - это не токсичный газ, но его выбросы нормируются исходя из предположения, что этот парниковый газ скажется на тепловое состояние всей планеты, при добавке водорода повышается КПД двигателя, при сокращении общего содержания атомов углерода в топливе и следовательно выбросы по диоксиду углерода снизятся.

6.1.3 Оценка экологичности, по шуму, объекта разработки бакалаврской работы

Добавка водорода повышает скорость тепловыделения, и следовательно обеспечивает более быстрое сгорание, что обеспечивает большую степень последующего расширения и следовательно теплоиспользования выделившейся энергии, что приводит к снижению температуры отработавших газов, следовательно при добавке водорода шум от выпуска отработавших газов уменьшится. В тоже время подача водорода во впускную систему также уменьшает волновые эффекты в ней и снижает шум от газодинамических эффектов на впуске. При этом повышается равномерность протекания процесса сгорания, что также снижает вибрационные составляющие шума работы двигателя. Повышение максимального давления в процессе сгорания является единственным условием повышения шумности работы двигателя, но это только на режимах полных и средних нагрузок, а на режимах малых нагрузок за счет повышения стабильности сгорания давление в цилиндре двигателя будет меньше.

6.2 Выводы об безопасности и экологичности объекта бакалаврской работы

1. Пожаробезопасность не изменится, а взрывоопасность увеличится.
2. Шум двигателя на основных режимах работы снизится.
3. Токсичность по продуктам неполного сгорания и углекислому газу снизится.
4. Токсичность по оксиду азота, на максимальных и средних нагрузках возрастет, а на холостом ходу и низких нагрузках будет в тех же пределах или ниже.
5. В целом двигатель удовлетворяет современным требованиям по экологичности, а для выполнения требований по пожаробезопасности требуется выполнение предписаний касательно работы на газовом топливе.

7 Специальная часть

7.1 Оценка влияния добавки водорода в ТВС на эффективность процесса сгорания

Как показывают многие исследователи, эффективность процесса сгорания повышается при смещении рабочего процесса в область с бедной смесью. При этом добавка водорода значительной степени интенсифицирует процесс сгорания ТВС, тем самым он осуществляется за меньший промежуток времени вблизи ВМТ, а также повышается полнота сгорания топлива, что дает увеличение индикаторного КПД двигателя. На рисунке 7.1 приведено сравнение характеристики тепловыделения и давления в процессе сгорания.

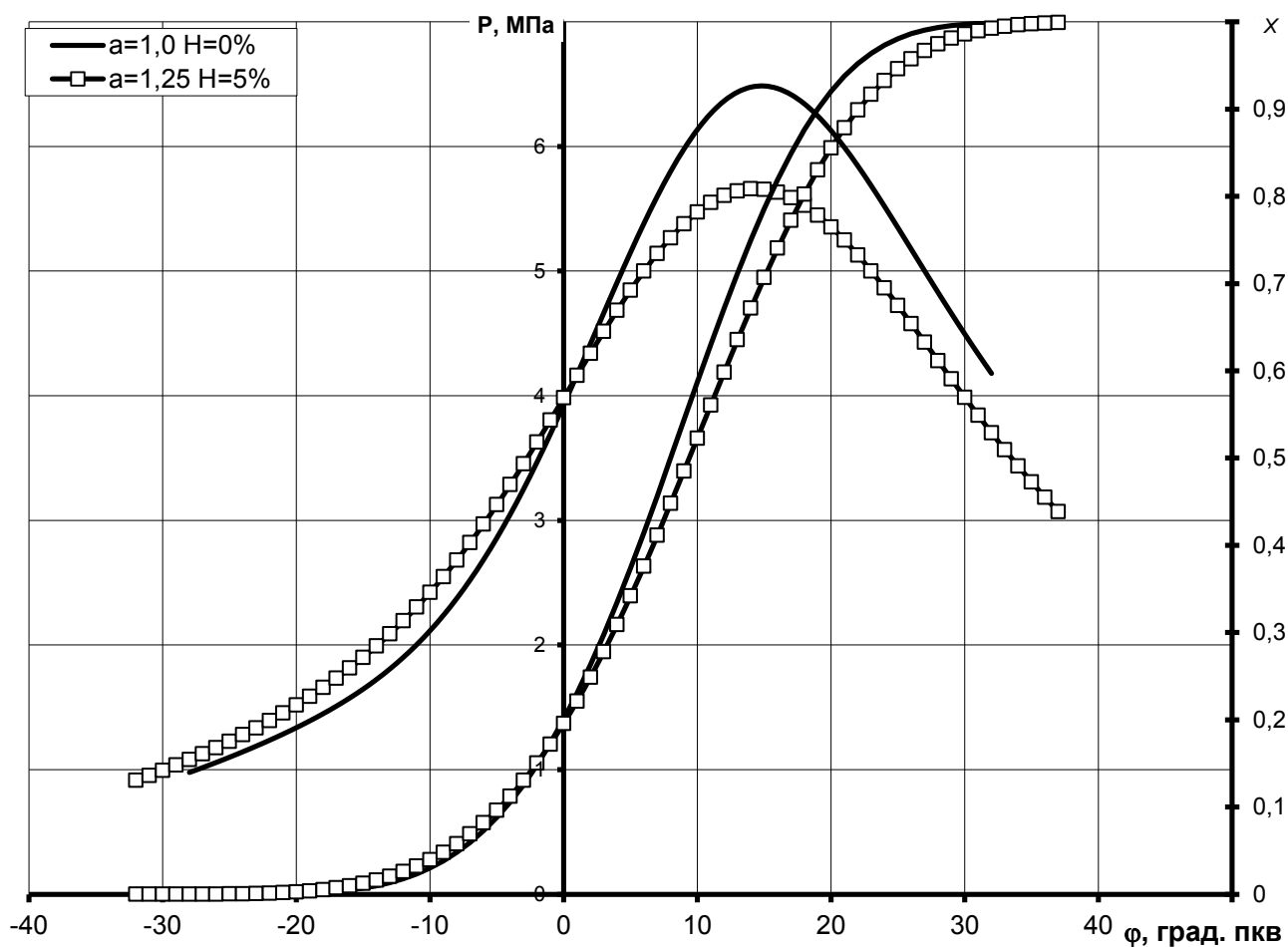


Рисунок 7.1 – Сравнение характеристики тепловыделения и давления в КС двигателя с добавкой водорода $\varepsilon = 11,5$ и без водорода $\varepsilon = 10,5$ базового ВАЗ-2112, скоростной режим работы $n = 5600 \text{ мин}^{-1}$.

При этом водород вытесняет часть ТВС, на рисунке 7.2 показано в процентном соотношении количество ТВС вытесняемой водородом по сравнению с ТВС без водорода, так добавка 5% водорода снижает наполнение цилиндра на 10%. Но при этом мощность двигателя остается практически постоянной, рисунок 7.3. Там же показано что с обеднением смеси доля ТВС вытесняемой водородом уменьшается, что еще раз говорит об эффективности добавки водорода при работе на бедных смесях.

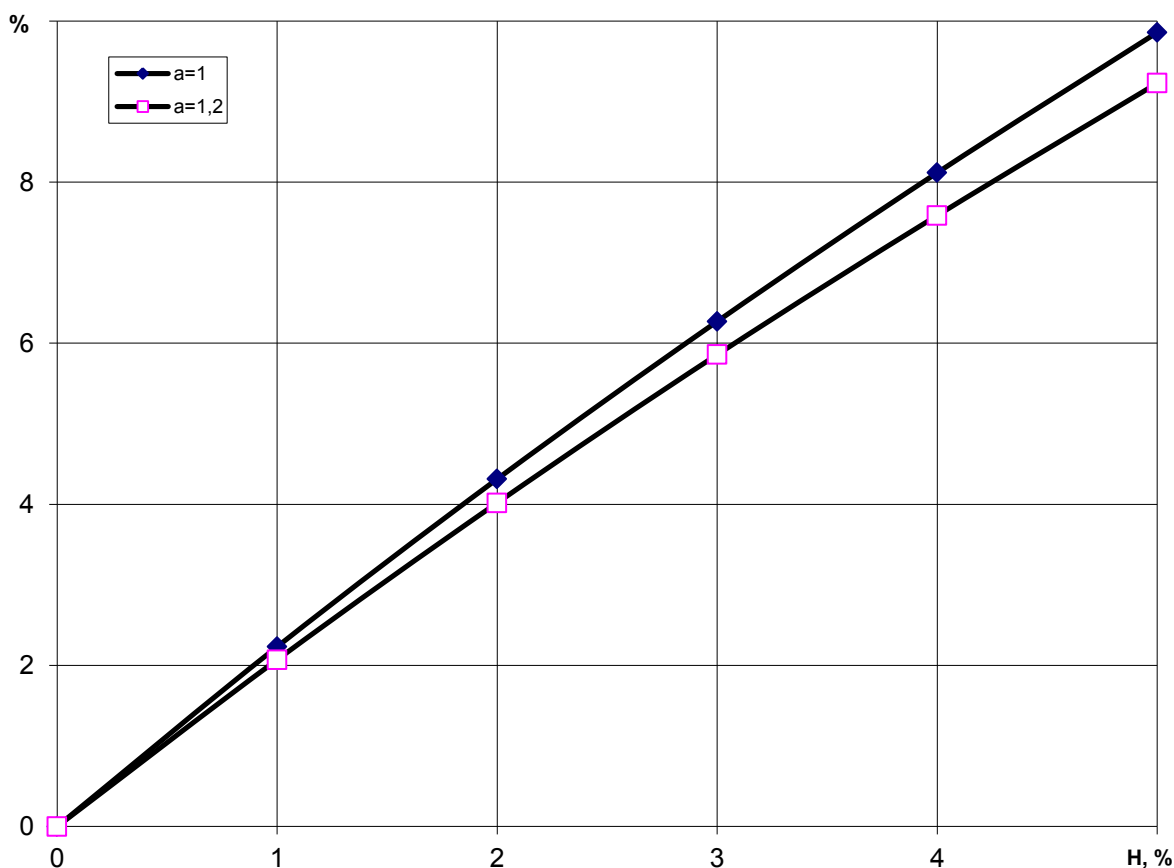


Рисунок 7.2 – Доля ТВС (бензин + водород) в % вытесняемая водородом при впуске по сравнению с двигателем без водорода.

На рисунке 7.4 приведена зависимость влияния продолжительности сгорания на получаемую мощность при всех прочих одинаковых условиях. Так показано что увеличение продолжительности сгорания с 30 до 60 град. пкв уменьшает теоретически возможную мощность с 1.3% до 4.4% соответственно, что численно показывает эффективность сокращения продолжительности процесса сгорания ТВС.

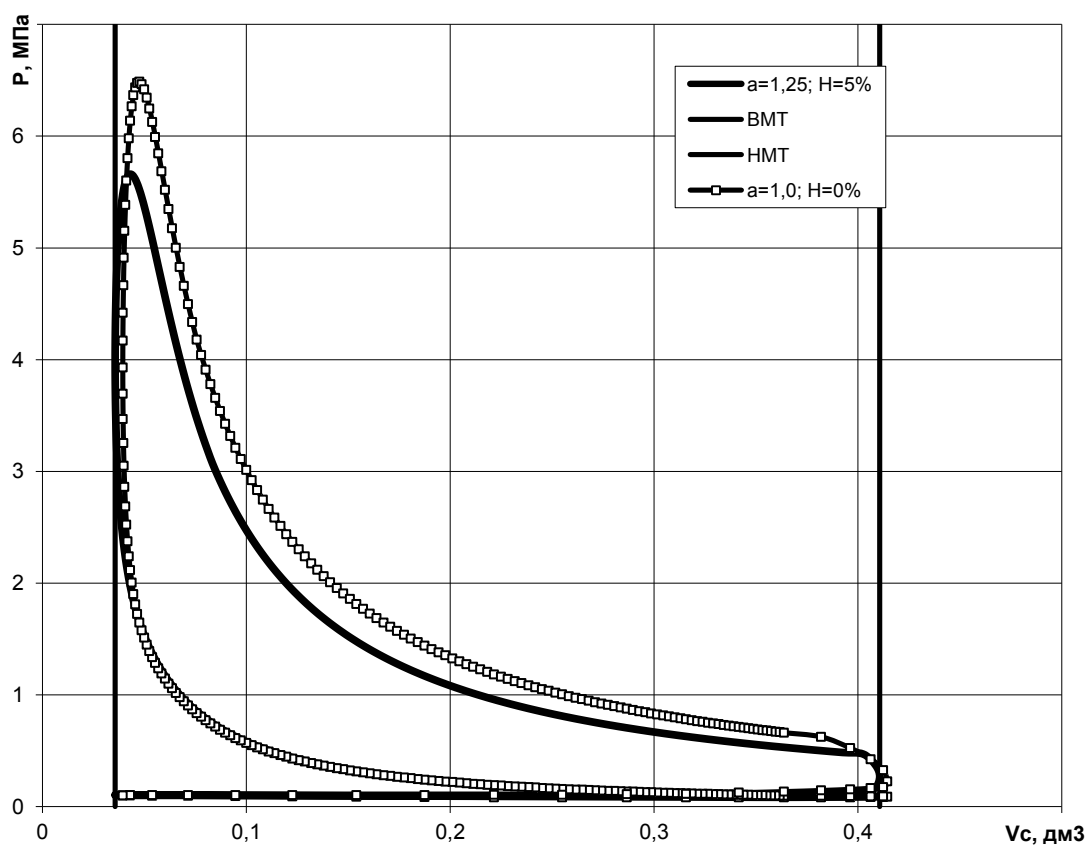


Рисунок 7.3 – Индикаторное давление и среднее индикаторное давление с добавкой 5% водорода при $\alpha=1.25$ и $\varepsilon=11,5$ и без водорода $\varepsilon=10,5$, при $n=5600$ мин⁻¹, $\alpha=1$.

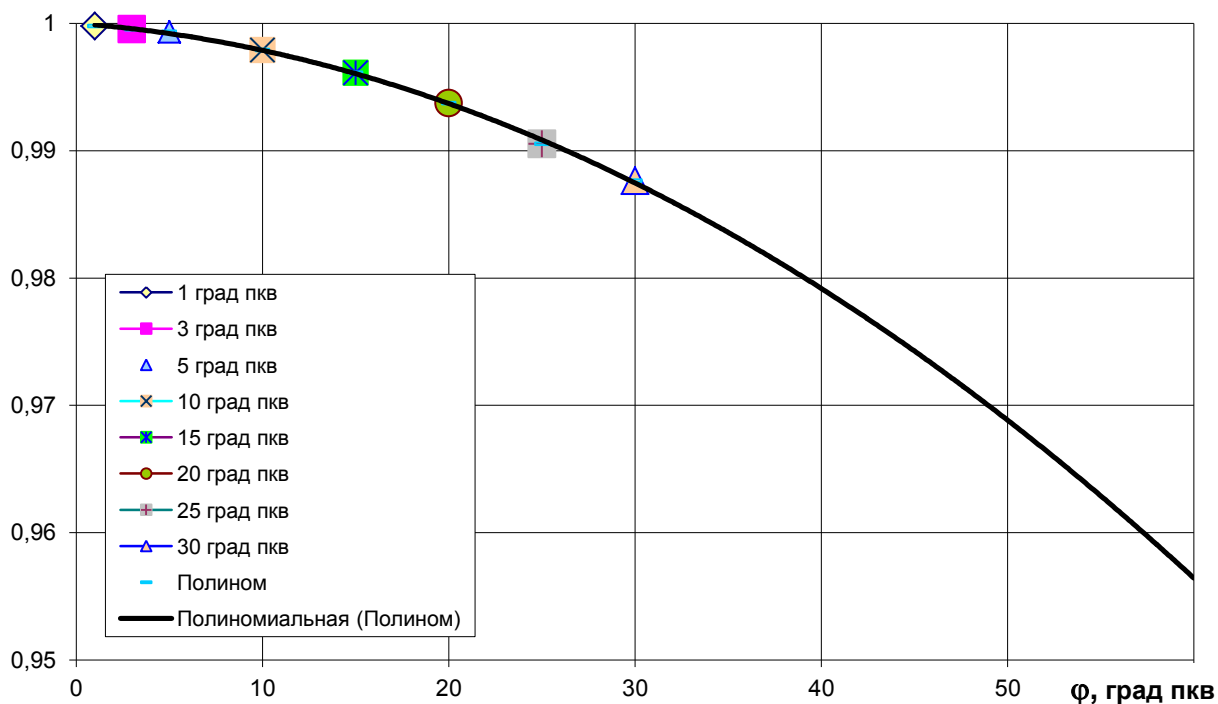


Рисунок 7.4 – Изменение эффективности сгорания ТВС в зависимости от продолжительности сгорания.

Таким образом, показано, что при добавке 5% водорода мощность снизится 4.3%, при этом количество введенного топлива сократится на 9.7%, что привело к уменьшению $g_e = 15\%$, что показывает о повышении не только эффективности сгорания связанного с уменьшением продолжительности сгорания, но и с увеличением полноты сгорания углеводородного топлива. Также за счет обеднения смеси достигнутого добавкой 5% водорода расширился предел детонации по степени сжатия, что позволило повысить степень сжатия с 10,5 до 11,5.

7.2 Оценка влияния добавки водорода в ТВС на снижение токсичности ОГ

7.2.1 Влияния добавки водорода в ТВС на концентрацию несгоревших углеводородов в ОГ

Ужесточение норм токсичности, заставляют уделить пристальное внимание на взаимосвязь между концентрацией СН в отработавших газах и физико-химическими свойствами ТВС. Как показано в [5] основное влияние на СН при α больше 1, оказывает пристеночный слой. В работе [22] показано, что добавление водорода снижает концентрацию СН в отработавших газах больше, чем это можно было бы объяснить уменьшением площади поверхности камеры сгорания в момент завершения горения. Это объясняется тем, что водород имеет высокие диффузионные свойства, а так же он при высоких температурах разлагается на свободные радикалы Н, которые являются активными центрами горения, тем самым, активизируя горение ТВС, что уменьшает толщину пристеночного слоя. Это позволяет говорить об эффективности применения малых добавок водорода для снижения концентрации несгоревших СН в отработавших газах.

Таким образом, токсичность отработавших газов по несгоревшим углеводородам в спроектированном двигателе с добавкой 5% водорода снизится.

7.2.2 Влияния добавки водорода в ТВС на концентрацию оксидов азота в ОГ

Исследования, проведенные в [23] показали, что добавление водорода в ТВС, приводит к увеличению концентрации NO в отработавших газах, при обеднении смеси, и уменьшению при обогащении, при этом при добавлении водорода максимум концентрации NO смещается в область больших α . Такое изменение объясняется тем, что с добавлением водорода скорость сгорания ТВС увеличивается, сгорание происходит быстрее и, так как УОЗ постоянный, в меньшем объеме КС, что приводит к существенному увеличению температуры в КС, и, следовательно, ведет к росту концентрации NO. Как показано в [2] снижение концентрации NO при обогащении смеси происходит, за счет увеличения скорости сгорания, то есть уменьшения времени на образование NO, так как добавление водорода на α близких к стехиометрическому, практически не приводит к изменению температуры в КС [3].

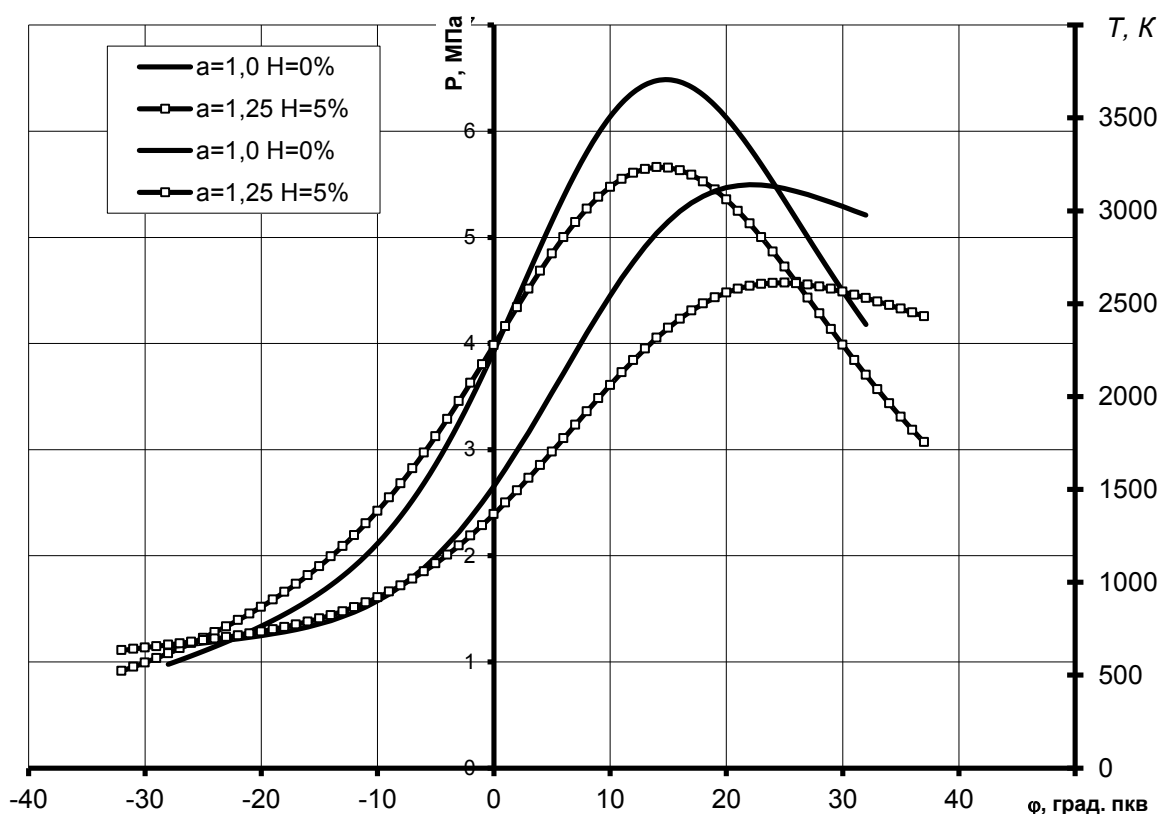


Рисунок 7.5 – Изменение температуры и давления в камере сгорания при добавке 5% водорода, $\varepsilon=11,5$ и без водорода при $n = 5600 \text{ мин}^{-1}$, $\varepsilon=10,5$

Так на рисунке 7.5 показано изменение температуры и давления в камере сгорания при добавке 5% водорода и без него. Из рисунка видно, что температура сгорания при добавке водорода ниже, что говорит о более снижении концентрации оксидов азота в отработавших газах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дипломном проекте спроектирован новый автомобильный бензиновый двигатель с добавкой 5% водорода в ТВС со степенью сжатия 10,5 и составом смеси на основных режимах работы $\alpha=1,05$ выполняющий нормы ЕВРО-4. Проведены основные расчеты двигателя, а именно, тепловой без водорода для $\alpha=1$ и $\varepsilon=10,5$, и с добавкой 5% водорода, кинематический, динамический, проведена оценка влияния добавки водорода в ТВС на эффективность процесса сгорания и токсичность отработавших газов.

Получено в спроектированном двигателе с добавкой 5% водорода со степенью сжатия 10,5 и составом смеси на основных режимах работы $\alpha=1,05$:

- минимальный удельный эффективный расход топлива 218 г/кВт*ч, в среднем его снижение по сравнению с базовым составило 18-20%;
- максимальную мощность при номинальных оборотах $n=5600 \text{ мин}^{-1}$ 58 кВт;
- снижение токсичности в отработавших газах по несгоревшим углеводородам (СН), оксидам углерода (СО) и оксидам азота, также произойдет снижение на 20% выбросов парникового газа CO_2 .

В разделе «Безопасность и экологичность проекта» показано что, спроектированный двигатель выполняет нормы по ограничению токсичности отработавших газов автотранспортных ДВС ОСТ 37.001.234-84 согласно правилам ЕЭК ООН (N 24 , N 49 , N 83 , N 96), а также ГОСТ Р 52231-04 «Внешний шум автомобилей в эксплуатации. Допустимые уровни и методы измерения» согласно правилам ЕЭК ООН №51. Также произведен анализ требований по взрывопожароопасности автомобильного двигателя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей [Текст]/ Колчин, А.И. Демидов В.П. // Учебное пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Высшая школа 1980. - с.496.
- 2 Faizal M. Comparative thermodynamics analysis of gasoline and hydrogen fuelled Internal Combustion Engines [Text] /Faizal M , Saidur R.//Department of Mechanical Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia 2017– PP. 12-17.
- 3 Thanga H. A Review on the Application of Hydrogen Rich Gas as Fuel Supplement in CI and SI Internal Combustion Engine [Text] / Thanga H. , Lalnunthar J. // Department of Physics, Mizoram University, Aizawl 796004, INDIA 2016-PP.1-
- 4 Huan L. Study of air fuel ratio on engine performance of direct injection hydrogen-fueled engine [Text] / Lee Kar Huan // Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Pahang, 26600 Pekan, Pahang, Malaysia 2016-PP.13-21
- 5 Carbot-Rojas D. A survey on modeling, biofuels, control and supervision systems applied in internal combustion engines [Text] /D.A. Carbot-Rojas , R.F. Escobar-Jiménez, J.F. Gómez-Aguilar, A.C. Téllez-Anguiano // Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Michoacán, CP 58120, Mexico 2017-PP.21-26
- 6 Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя [Текст] / В.И. Анурьев// В 3-х т. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. - с.296.
- 7 Вибе, И.И. Уточненный тепловой расчет двигателя [Текст] / И.И. Вибе// М. Машиностроение, 1971. - с.282
- 8 Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982.
- 9 Кузнецов В.Р., Собольников В.А. “Турбулентность и горение”. М. Наука, 1986.
- 10 Войнов В.В. “Процессы сгорания в двигателях внутреннего сгорания”. М. Наука, 1984.

- 11 Звонов В.А. “Токсичность двигателей внутреннего сгорания”. М. Машиностроение, 1981.
- 12 Nlootat G., et al, “A Model for Converting SI Engine Flame Arrival Signals into Flame Contours”, SAE, SP 1099, №950109, стр. 99-110, 1999.
- 13 Khalighi B., et al, “ Computation and Measurement of Flow and Combustion in a Four-Valve Engine with Intake Variations”, SAE, SP 1101, стр. 147-179, 2001.
- 14 Jones P., et al, “Full Cycle Computational Fluid Dynamics Calculations in a Motored Four Valve Pent Roof Combustion Chamber and Comparison with Experiment”, SAE, SP 1101, №950286, 131-146, 2001.
- 15 Naha, S, Briones, A. M, Aggarwa. Effect of Fuel Blends on Pollutant Emissions in Flames [Text] / Naha, S, Briones, A. M, Aggarwa. Combustion Sciences and Technology. [Thermal Science](#). 2005 – pp. 183- 220.
- 16 Bysveen, M. Engine Characteristics of Emissions and Performance Using Mixtures Natural Gas and Hydrogen [Text] / Bysveen, International Journal Hydrogen Energy. 2007 – pp. 482-489.
- 17 Kato, K. Development of Engine for Natural Gas Vehicle / K.Kato, K. Igrahashi, M. Masuda, K. Otsubo, A.Yasuda, K. Takeda, T.Sato// Society of Automotive Engineers, Paper No. 01-0574 (1999)
- 18 Huang, Z. Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures / Z. Huang, Y.Zhang, K.Zeng, B.Liu, Q.Wang, D.Jiang // Combustion and Flame 2006;146(1–2):302–11
- 19 Sierens, R. Variable composition hydrogen/natural gas mixtures for increased engine efficiency and decreased emissions / R.Sierens, E.Rosseel// Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 122, 135–140, (2000).
- 20 Shamekhi, A.H. A Comprehensive Comparative Investigation of Compressed Natural Gas as an Alternative Fuel in a Bi-Fuel Spark Ignition Engine / A.H. Shamekhi, N. Khatibzadeh, A. Shamekhi // Iran. J. Chem. Chem. Eng. Vol. 27, No.1, 2008. - C. 73-83.

Приложение А

Таблица А1 - Исходные данные для теплового расчета

Объем рабо- чего тела, м ³	Продол- жительность процесс сго- рания	Коэффи- циент избыт- ка воздуха	Сте- пень сжа- тия	Коэф- фициент мо- леку-лярного изменения смеси	Р _у	Т _у	Угол опере- жения зажи- гания	Полно-та сгора-ния топли-ва	Е ₂ , МПа	Коэффи- циент оста- точных газов	λ	Показатель характера сгорания	Частота вра- щения КВ
Двигатель с добавкой 5% водорода													
1,029192	28	1	10,5	1,025724	1,913	789,86	13	0,94	51,955535	0,033925	0,293	2,5	900
1,043288	36	1.05	10,5	1,015327	1,8066	778,05	14	0,95	49,116924	0,032378	0,293	2,6	2000
1,055293	42	1.05	10,5	1,015368	1,4796	726,67	19	0,96	49,21437	0,029589	0,293	2,7	3500
1,044442	50	1.05	10,5	1,015341	1,2128	696,77	23	0,97	47,2572	0,031428	0,293	2,8	5000
1,104081	54	1	10,5	1,025809	1,1001	680,13	25	0,98	49,24586	0,030549	0,293	2,9	5600
Двигатель ВА3-2112													
0,989923	40	0.96	10,5	1,060488	1,823	767,52	15	0,764277	43,98798	0,043126	0,293	3.1	900
1,028942	48	1	10,5	1,050596	1,469	722,11	20	0,86	46,40438	0,036289	0,293	3.2	2600
1,05791	55	1	10,5	1,050718	1,267	697,718	23	0,96	50,28953	0,033797	0,293	3.3	3700
1,08835	58	1	10,5	1,050909	1,098	665,279	26	0,97	50,44589	0,029931	0,293	3.4	5000
1,150416	62	1	10,5	1,050917	0,977	652,082	28	0,99	49,49647	0,029751	0,293	3.5	5600

Таблица А2 - Результаты теплового расчета двигателя с добавкой 5% водорода при n = 900 мин⁻¹

Темпе- ратура предпо- лагае- мая/, К	Темпе- ратура дейст- витель- ная	Удельный объем	s	γ (f1)	Доля вы- дели- вшегося на участ- ке тепла	Сред-няя на участ- ке тем- пре- ратура, К	k1-2	K1-2	DX1-2	Давление	Коэффи- циент мо- леку-лярного изменения смеси	m ₁₋₂	Характе- ристика тепловы- деления	Угол ПКВ от начала горения	Текущий угол ПКВ
787,0153	787,01531	0,11341	0,0331	1,15699	2,97E-05	790,9425			5,95E-05	1,91405	1	1	0	0	-13
794,8697	794,8696	0,11114	0,0282	1,13391	0,000307	801,2881	1,355958	6,618639	0,000613	1,972511	1	1	5,95E-05	1	-12
807,7065	807,70583	0,10906	0,0237	1,11263	0,001052	818,7097	1,35467	6,639044	0,002105	2,042709	1	1	0,000673	2	-11
829,7129	829,7102	0,10715	0,0196	1,09316	0,002403	847,6335	1,352568	6,672663	0,004806	2,135752	1	1,00002	0,002777	3	-10
865,5541	865,5447	0,10542	0,0159	1,07552	0,004451	892,7368	1,349273	6,726183	0,008902	2,264611	1,0001	1,00005	0,007583	4	-9
919,9196	919,89361	0,10387	0,0126	1,05971	0,007245	958,4727	1,344567	6,80438	0,01449	2,442867	1,0002	1,00011	0,016485	5	-8

Продолжение таблицы А2

997,0259	996,96661	0,1025	0,0096	1,04574	0,010782	1048,582	1,338506	6,908307	0,021563	2,683193	1,0003	1,00022	0,030975	6	-7
1100,138	1100,0255	0,10131	0,0071	1,03363	0,01499	1165,654	1,33143	7,03445	0,029979	2,995772	1,0005	1,00039	0,052538	7	-6
1231,171	1230,9926	0,10031	0,0049	1,02336	0,01972	1310,784	1,323861	7,175483	0,039441	3,386877	1,0008	1,00063	0,082518	8	-5
1390,396	1390,1522	0,09948	0,0031	1,01496	0,024739	1483,306	1,316341	7,322287	0,049478	3,857693	1,0011	1,00095	0,121958	9	-4
1576,217	1575,9274	0,09884	0,0018	1,00842	0,029729	1680,63	1,309303	7,466143	0,059458	4,403405	1,0016	1,00136	0,171436	10	-3
1785,043	1784,7442	0,09838	0,0008	1,00374	0,034312	1898,172	1,30302	7,600216	0,068624	5,01263	1,0021	1,00187	0,230894	11	-2
2011,301	2011,0338	0,09811	0,0002	1,00094	0,038079	2129,472	1,297617	7,720046	0,076159	5,667379	1,0028	1,00246	0,299518	12	-1
2247,643	2247,445	0,09802	0	1	0,040646	2366,532	1,293112	7,823342	0,081291	6,343794	1,0035	1,00313	0,375677	13	0
2485,421	2485,3209	0,09811	0,0002	1,00094	0,041706	2600,422	1,289457	7,909484	0,083411	7,013788	1,0042	1,00386	0,456968	14	1
2715,423	2715,4349	0,09838	0,0008	1,00374	0,041093	2822,106	1,286574	7,979011	0,082187	7,647588	1,005	1,00463	0,540379	15	2
2928,788	2928,9142	0,09884	0,0018	1,00842	0,038823	3023,382	1,284365	8,033217	0,077645	8,216861	1,0058	1,0054	0,622566	16	3
3117,977	3118,2084	0,09948	0,0031	1,01496	0,035101	3197,789	1,282731	8,073866	0,070202	8,697945	1,0065	1,00614	0,700211	17	4
3277,601	3277,9229	0,10031	0,0049	1,02336	0,030307	3341,275	1,281572	8,102981	0,060614	9,074544	1,0072	1,00683	0,770413	18	5
3404,95	3405,3437	0,10131	0,0071	1,03363	0,024929	3452,519	1,280793	8,122677	0,049858	9,339307	1,0077	1,00743	0,831028	19	6
3500,088	3500,5344	0,1025	0,0096	1,04574	0,019483	3532,799	1,280308	8,135012	0,038966	9,493951	1,0082	1,00795	0,880885	20	7
3565,509	3565,9906	0,10387	0,0126	1,05971	0,014427	3585,476	1,280039	8,141868	0,028853	9,547915	1,0085	1,00836	0,919851	21	8
3605,442	3605,9438	0,10542	0,0159	1,07552	0,010091	3615,213	1,279922	8,144851	0,020183	9,515953	1,0088	1,00867	0,948704	22	9
3624,985	3625,4947	0,10715	0,0196	1,09316	0,006647	3627,128	1,279906	8,145248	0,013294	9,41527	1,009	1,0089	0,968887	23	10
3629,272	3629,7817	0,10906	0,0237	1,11263	0,00411	3626,06	1,279955	8,14401	0,008219	9,262908	1,0091	1,00906	0,982182	24	11
3622,848	3623,3517	0,11114	0,0282	1,13391	0,002377	3616,085	1,280042	8,141792	0,004754	9,073856	1,0092	1,00916	0,990401	25	12
3609,322	3609,816	0,11341	0,0331	1,15699	0,001281	3600,309	1,280151	8,139004	0,002563	8,860108	1,0092	1,00922	0,995155	26	13
3591,297	3591,7787	0,11585	0,0383	1,18187	0,000642	3580,895	1,280274	8,135878	0,001283	8,630544	1,0093	1,00925	0,997717	27	14
3570,492	3570,9599	0,11846	0,0439	1,20853	0,000297	3559,225	1,280405	8,132531	0,000594	8,391378	1,0093	1,00927	0,999	28	15

Таблица А3 - Результаты теплового расчета двигателя с добавкой 5% водорода при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$

Темпе- ратура предпо- лагае- мая/, К	Темпе- ратура дейст- витель- ная	Удельный объем	s	y (f1)	Доля выдели- вшегося на участке тепла	Сред- няя на участ- ке темпе- ратура, К	k1-2	K1-2	DX1-2	Давление	Кэффи- циент мо- ле- кулярного изменения смеси	m ₁₋₂	Характе- ристика тепловы- деления	Угол ПКВ от начала горения	Текущий угол ПКВ
774,4584	774,45835	0,1174	0,0383	1,1819	0,0000	777,7241			0,0000	1,8072	1,0000	1,0000	0,0000	0	-14
780,9898	780,9897	0,1150	0,0331	1,1570	0,0001	784,9117	1,3576	6,5926	0,0002	1,8616	1,0000	1,0000	0,0000	1	-13
788,8336	788,83336	0,1127	0,0282	1,1339	0,0003	794,0977	1,3567	6,6069	0,0007	1,9186	1,0000	1,0000	0,0002	2	-12

Продолжение таблицы А3

799,3618	799,36107	0,1106	0,0237	1,1126	0,0008	806,7931	1,3556	6,6251	0,0016	1,9814	1,0000	1,0000	0,0009	3	-11
814,2243	814,22237	0,1086	0,0196	1,0932	0,0016	824,7447	1,3540	6,6497	0,0031	2,0543	1,0001	1,0001	0,0025	4	-10
835,265	835,26014	0,1069	0,0159	1,0755	0,0026	849,8438	1,3519	6,6837	0,0052	2,1422	1,0002	1,0002	0,0056	5	-9
864,4226	864,41121	0,1053	0,0126	1,0597	0,0040	884,0182	1,3491	6,7294	0,0080	2,2504	1,0004	1,0003	0,0109	6	-8
903,6137	903,58893	0,1039	0,0096	1,0457	0,0057	929,1087	1,3455	6,7885	0,0114	2,3844	1,0007	1,0006	0,0188	7	-7
954,6037	954,55412	0,1027	0,0071	1,0336	0,0078	986,7400	1,3412	6,8614	0,0156	2,5494	1,0012	1,0010	0,0303	8	-6
1018,876	1018,7851	0,1017	0,0049	1,0234	0,0102	1058,1941	1,3363	6,9473	0,0205	2,7496	1,0018	1,0015	0,0459	9	-5
1097,512	1097,358	0,1008	0,0031	1,0150	0,0129	1144,2979	1,3309	7,0437	0,0259	2,9883	1,0026	1,0022	0,0663	10	-4
1191,084	1190,8438	0,1002	0,0018	1,0084	0,0159	1245,3279	1,3253	7,1474	0,0317	3,2669	1,0036	1,0031	0,0922	11	-3
1299,572	1299,2242	0,0997	0,0008	1,0037	0,0189	1360,9357	1,3198	7,2545	0,0379	3,5848	1,0048	1,0042	0,1240	12	-2
1422,3	1421,8278	0,0995	0,0002	1,0009	0,0220	1490,0969	1,3144	7,3612	0,0440	3,9394	1,0063	1,0056	0,1618	13	-1
1557,894	1557,2895	0,0994	0,0000	1,0000	0,0250	1631,0878	1,3094	7,4643	0,0500	4,3256	1,0080	1,0072	0,2059	14	0
1704,281	1703,5433	0,0995	0,0002	1,0009	0,0277	1781,5009	1,3048	7,5611	0,0554	4,7360	1,0100	1,0090	0,2559	15	1
1858,721	1857,8562	0,0997	0,0008	1,0037	0,0299	1938,3077	1,3008	7,6498	0,0599	5,1610	1,0121	1,0110	0,3112	16	2
2017,895	2016,9173	0,1002	0,0018	1,0084	0,0316	2097,9766	1,2972	7,7294	0,0632	5,5893	1,0144	1,0133	0,3711	17	3
2178,058	2176,9839	0,1008	0,0031	1,0150	0,0326	2256,6475	1,2942	7,7992	0,0652	6,0082	1,0169	1,0157	0,4343	18	4
2335,237	2334,0831	0,1017	0,0049	1,0234	0,0328	2410,3539	1,2916	7,8594	0,0655	6,4046	1,0195	1,0182	0,4995	19	5
2485,471	2484,2559	0,1027	0,0071	1,0336	0,0321	2555,2769	1,2894	7,9101	0,0643	6,7658	1,0220	1,0207	0,5650	20	6
2625,083	2623,8215	0,1039	0,0096	1,0457	0,0307	2688,0045	1,2877	7,9519	0,0614	7,0806	1,0245	1,0233	0,6293	21	7
2750,926	2749,633	0,1053	0,0126	1,0597	0,0285	2805,7675	1,2863	7,9856	0,0570	7,3398	1,0269	1,0257	0,6906	22	8
2860,609	2859,2939	0,1069	0,0159	1,0755	0,0257	2906,6219	1,2852	8,0120	0,0514	7,5373	1,0291	1,0280	0,7476	23	9
2952,635	2951,3078	0,1086	0,0196	1,0932	0,0225	2989,5537	1,2844	8,0320	0,0451	7,6700	1,0311	1,0301	0,7991	24	10
3026,472	3025,1391	0,1106	0,0237	1,1126	0,0191	3054,4929	1,2838	8,0465	0,0383	7,7384	1,0329	1,0320	0,8442	25	11
3082,513	3081,1792	0,1127	0,0282	1,1339	0,0157	3102,2338	1,2834	8,0564	0,0315	7,7460	1,0344	1,0336	0,8824	26	12
3121,954	3120,6227	0,1150	0,0331	1,1570	0,0125	3134,2776	1,2832	8,0625	0,0250	7,6987	1,0356	1,0350	0,9139	27	13
3146,601	3145,2749	0,1174	0,0383	1,1819	0,0096	3152,6193	1,2831	8,0657	0,0192	7,6042	1,0366	1,0361	0,9389	28	14
3158,638	3157,319	0,1201	0,0439	1,2085	0,0071	3159,5136	1,2830	8,0666	0,0142	7,4712	1,0373	1,0369	0,9581	29	15
3160,39	3159,0799	0,1229	0,0499	1,2370	0,0050	3157,2518	1,2831	8,0657	0,0100	7,3081	1,0379	1,0376	0,9722	30	16
3154,114	3152,8146	0,1259	0,0562	1,2671	0,0034	3147,9783	1,2831	8,0635	0,0068	7,1231	1,0382	1,0381	0,9823	31	17
3141,843	3140,554	0,1291	0,0630	1,2991	0,0022	3133,5632	1,2833	8,0604	0,0045	6,9232	1,0385	1,0384	0,9891	32	18
3125,284	3124,0071	0,1324	0,0700	1,3327	0,0014	3115,5372	1,2834	8,0568	0,0028	6,7143	1,0387	1,0386	0,9936	33	19
3105,791	3104,526	0,1359	0,0775	1,3681	0,0008	3095,0818	1,2836	8,0526	0,0017	6,5009	1,0388	1,0387	0,9964	34	20
3084,373	3083,1213	0,1396	0,0853	1,4051	0,0005	3073,0605	1,2838	8,0482	0,0009	6,2864	1,0389	1,0388	0,9981	35	21

3061,748	3060,509	0,1435	0,0934	1,4438	0,0003	3050,0737	1,2839	8,0435	0,0005	6,0733	1,0389	1,0389	0,9990	36	22
----------	----------	--------	--------	--------	--------	-----------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	----	----

Таблица А4 - Результаты теплового расчета двигателя с добавкой 5% водорода при $n = 3500 \text{ мин}^{-1}$

Темпе- ратура предпо- лагае- мая/, К	Темпе- ратура действитель- ная	Удельный объем	s	$\gamma(f1)$	Доля выдели- вшегося на участке тепла	Сред- няя на участке темпре- ратура, К	k1-2	K1-2	DX1-2	Давление	Коэффи- циент мо- ле- кулярного изменения смеси	m_{1-2}	Характе- ристика тепловы- деления	Угол ПКВ от начала горения	Текущий угол ПКВ
723,2775	723,2775	0,1339	0,0700	1,3327	0,0000	726,8004			0,0000	1,4797	1,0000	1,0000	0,0000	0	-19
730,3232	730,3231	0,1306	0,0630	1,2991	0,0000	734,1506	1,3645	6,4865	0,0001	1,5328	1,0000	1,0000	0,0000	1	-18
737,9779	737,9773	0,1274	0,0562	1,2671	0,0002	742,4548	1,3635	6,5026	0,0003	1,5879	1,0000	1,0000	0,0001	2	-17
746,9316	746,9301	0,1243	0,0499	1,2370	0,0004	752,4924	1,3623	6,5204	0,0008	1,6464	1,0000	1,0000	0,0004	3	-16
758,0532	758,05	0,1215	0,0439	1,2085	0,0007	765,2066	1,3609	6,5418	0,0015	1,7103	1,0000	1,0000	0,0012	4	-15
772,3599	772,3535	0,1188	0,0383	1,1819	0,0013	781,6713	1,3592	6,5682	0,0025	1,7819	1,0001	1,0001	0,0026	5	-14
790,9826	790,9704	0,1163	0,0331	1,1570	0,0020	803,0529	1,3570	6,6016	0,0039	1,8642	1,0002	1,0002	0,0051	6	-13
815,1232	815,1007	0,1140	0,0282	1,1339	0,0029	830,5634	1,3544	6,6436	0,0058	1,9605	1,0004	1,0003	0,0091	7	-12
846,0037	845,9634	0,1118	0,0237	1,1126	0,0040	865,4064	1,3512	6,6952	0,0080	2,0740	1,0006	1,0005	0,0148	8	-11
884,8091	884,7397	0,1099	0,0196	1,0932	0,0054	908,7177	1,3474	6,7571	0,0107	2,2083	1,0009	1,0007	0,0229	9	-10
932,6264	932,5115	0,1081	0,0159	1,0755	0,0069	961,5053	1,3431	6,8291	0,0139	2,3666	1,0013	1,0011	0,0336	10	-9
990,3841	990,2022	0,1065	0,0126	1,0597	0,0087	1024,5898	1,3384	6,9103	0,0174	2,5517	1,0019	1,0016	0,0474	11	-8
1058,795	1058,52	0,1051	0,0096	1,0457	0,0107	1098,5510	1,3334	6,9988	0,0214	2,7659	1,0025	1,0022	0,0648	12	-7
1138,307	1137,909	0,1039	0,0071	1,0336	0,0128	1183,6796	1,3283	7,0926	0,0256	3,0105	1,0034	1,0029	0,0862	13	-6
1229,053	1228,504	0,1029	0,0049	1,0234	0,0151	1279,9356	1,3231	7,1891	0,0301	3,2857	1,0044	1,0039	0,1118	14	-5
1330,819	1330,092	0,1020	0,0031	1,0150	0,0174	1386,9143	1,3182	7,2859	0,0347	3,5908	1,0055	1,0050	0,1419	15	-4
1443,01	1442,085	0,1013	0,0018	1,0084	0,0196	1503,8223	1,3135	7,3805	0,0393	3,9233	1,0069	1,0062	0,1766	16	-3
1564,635	1563,496	0,1009	0,0008	1,0037	0,0218	1629,4664	1,3091	7,4712	0,0437	4,2796	1,0084	1,0077	0,2159	17	-2
1694,298	1692,94	0,1006	0,0002	1,0009	0,0238	1762,2593	1,3050	7,5565	0,0477	4,6543	1,0101	1,0093	0,2595	18	-1
1830,22	1828,645	0,1005	0,0000	1,0000	0,0256	1900,2473	1,3014	7,6353	0,0512	5,0410	1,0120	1,0111	0,3072	19	0
1970,274	1968,489	0,1006	0,0002	1,0009	0,0270	2041,1627	1,2982	7,7070	0,0539	5,4318	1,0140	1,0130	0,3584	20	1
2112,051	2110,071	0,1009	0,0008	1,0037	0,0279	2182,5018	1,2954	7,7712	0,0558	5,8180	1,0161	1,0150	0,4123	21	2
2252,953	2250,795	0,1013	0,0018	1,0084	0,0284	2321,6276	1,2929	7,8279	0,0568	6,1902	1,0183	1,0172	0,4681	22	3
2390,303	2387,989	0,1020	0,0031	1,0150	0,0283	2455,8906	1,2908	7,8772	0,0566	6,5393	1,0205	1,0194	0,5249	23	4
2521,479	2519,031	0,1029	0,0049	1,0234	0,0277	2582,7623	1,2890	7,9196	0,0554	6,8564	1,0227	1,0216	0,5815	24	5

Продолжение таблицы А4

2644,046	2641,485	0,1039	0,0071	1,0336	0,0266	2699,9670	1,2875	7,9553	0,0531	7,1335	1,0249	1,0238	0,6370	25	6
2755,888	2753,236	0,1051	0,0096	1,0457	0,0249	2805,6044	1,2863	7,9849	0,0499	7,3644	1,0269	1,0259	0,6901	26	7
2855,321	2852,596	0,1065	0,0126	1,0597	0,0229	2898,2475	1,2853	8,0090	0,0459	7,5443	1,0289	1,0279	0,7400	27	8
2941,174	2938,395	0,1081	0,0159	1,0755	0,0206	2977,0075	1,2846	8,0280	0,0412	7,6710	1,0307	1,0298	0,7858	28	9
3012,841	3010,023	0,1099	0,0196	1,0932	0,0181	3041,5593	1,2840	8,0427	0,0362	7,7439	1,0323	1,0315	0,8270	29	10
3070,278	3067,436	0,1118	0,0237	1,1126	0,0155	3092,1233	1,2835	8,0535	0,0310	7,7649	1,0337	1,0330	0,8632	30	11
3113,969	3111,114	0,1140	0,0282	1,1339	0,0129	3129,4076	1,2832	8,0610	0,0258	7,7374	1,0349	1,0343	0,8942	31	12
3144,846	3141,989	0,1163	0,0331	1,1570	0,0105	3154,5161	1,2831	8,0657	0,0210	7,6665	1,0359	1,0354	0,9200	32	13
3164,186	3161,334	0,1188	0,0383	1,1819	0,0083	3168,8352	1,2830	8,0682	0,0166	7,5580	1,0367	1,0363	0,9410	33	14
3173,484	3170,646	0,1215	0,0439	1,2085	0,0064	3173,9105	1,2829	8,0689	0,0128	7,4183	1,0374	1,0371	0,9576	34	15
3174,336	3171,516	0,1243	0,0499	1,2370	0,0048	3171,3286	1,2830	8,0681	0,0095	7,2538	1,0379	1,0376	0,9704	35	16
3168,321	3165,524	0,1274	0,0562	1,2671	0,0034	3162,6147	1,2830	8,0662	0,0069	7,0706	1,0383	1,0381	0,9799	36	17
3156,909	3154,138	0,1306	0,0630	1,2991	0,0024	3149,1547	1,2831	8,0634	0,0048	6,8742	1,0385	1,0384	0,9867	37	18
3141,401	3138,66	0,1339	0,0700	1,3327	0,0016	3132,1460	1,2833	8,0600	0,0032	6,6692	1,0387	1,0386	0,9915	38	19
3122,891	3120,182	0,1375	0,0775	1,3681	0,0011	3112,5756	1,2834	8,0561	0,0021	6,4596	1,0388	1,0388	0,9948	39	20
3102,26	3099,584	0,1412	0,0853	1,4051	0,0007	3091,2223	1,2836	8,0519	0,0013	6,2484	1,0389	1,0389	0,9969	40	21
3080,185	3077,543	0,1451	0,0934	1,4438	0,0004	3068,6764	1,2838	8,0473	0,0008	6,0380	1,0390	1,0390	0,9982	41	22
3057,168	3054,561	0,1492	0,1019	1,4842	0,0002	3045,3694	1,2840	8,0426	0,0005	5,8302	1,0390	1,0390	0,9990	42	23

Таблица А5 - Результаты теплового расчета двигателя с добавкой 5% водорода при $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$

Темпе- ратура предпо- лагае- мая/, К	Темпе- ратура дейст- витель- ная	Удельный объем	s	y (f1)	Доля выдели- вшегося на участке тепла	Сред-няя на участке темпре- ратура, К	k1-2	K1-2	DX1-2	Давление	Коэффи- циент мо- ле- кулярного изменения смеси	m ₁₋₂	Характе- ристика тепловы- деления	Угол ПКВ от начала горения	Текущий угол ПКВ
687,6783	687,6783	0,1476	0,1019	1,4842	0,0000	691,3046			0,0000	1,2764	1,0000	1,0000	0,0000		-23
694,9309	694,9307	0,1436	0,0934	1,4438	0,0000	698,7904	1,3699	6,4062	0,0001	1,3259	1,0000	1,0000	0,0000	1	-22
702,6499	702,649	0,1398	0,0853	1,4051	0,0001	706,9614	1,3688	6,4236	0,0002	1,3776	1,0000	1,0000	0,0001	2	-21
711,273	711,271	0,1361	0,0775	1,3681	0,0003	716,3037	1,3675	6,4424	0,0005	1,4323	1,0000	1,0000	0,0003	3	-20
721,3345	721,3304	0,1326	0,0700	1,3327	0,0005	727,3907	1,3661	6,4636	0,0010	1,4911	1,0000	1,0000	0,0008	4	-19
733,447	733,4396	0,1292	0,0630	1,2991	0,0008	740,8660	1,3644	6,4883	0,0016	1,5554	1,0001	1,0000	0,0017	5	-18
748,2849	748,2722	0,1260	0,0562	1,2671	0,0012	757,4247	1,3625	6,5176	0,0025	1,6269	1,0001	1,0001	0,0033	6	-17
766,5644	766,5438	0,1230	0,0499	1,2370	0,0018	777,7935	1,3602	6,5527	0,0036	1,7075	1,0002	1,0002	0,0058	7	-16

Продолжение таблицы А5

789,0225	788,9901	0,1202	0,0439	1,2085	0,0025	802,7075	1,3575	6,5943	0,0049	1,7990	1,0004	1,0003	0,0094	8	-15
816,3925	816,3432	0,1176	0,0383	1,1819	0,0033	832,8854	1,3544	6,6432	0,0065	1,9037	1,0006	1,0005	0,0143	9	-14
849,3783	849,306	0,1151	0,0331	1,1570	0,0042	869,0035	1,3509	6,6995	0,0084	2,0236	1,0008	1,0007	0,0208	10	-13
888,6288	888,5261	0,1128	0,0282	1,1339	0,0053	911,6703	1,3470	6,7631	0,0105	2,1608	1,0011	1,0010	0,0292	11	-12
934,7119	934,5712	0,1107	0,0237	1,1126	0,0065	961,4019	1,3429	6,8334	0,0129	2,3171	1,0016	1,0013	0,0397	12	-11
988,0919	987,9054	0,1087	0,0196	1,0932	0,0078	1018,6000	1,3384	6,9094	0,0155	2,4941	1,0021	1,0018	0,0527	13	-10
1049,108	1048,869	0,1070	0,0159	1,0755	0,0092	1083,5321	1,3339	6,9898	0,0184	2,6929	1,0027	1,0024	0,0682	14	-9
1117,956	1117,659	0,1054	0,0126	1,0597	0,0107	1156,3142	1,3293	7,0730	0,0214	2,9143	1,0034	1,0030	0,0866	15	-8
1194,672	1194,313	0,1040	0,0096	1,0457	0,0123	1236,8954	1,3248	7,1576	0,0245	3,1582	1,0042	1,0038	0,1080	16	-7
1279,119	1278,695	0,1028	0,0071	1,0336	0,0139	1325,0458	1,3204	7,2420	0,0277	3,4240	1,0052	1,0047	0,1325	17	-6
1370,973	1370,487	0,1018	0,0049	1,0234	0,0155	1420,3466	1,3162	7,3248	0,0309	3,7103	1,0062	1,0057	0,1602	18	-5
1469,72	1469,174	0,1010	0,0031	1,0150	0,0170	1522,1849	1,3123	7,4048	0,0341	4,0150	1,0075	1,0069	0,1911	19	-4
1574,65	1574,047	0,1003	0,0018	1,0084	0,0185	1629,7528	1,3086	7,4811	0,0370	4,3350	1,0088	1,0081	0,2252	20	-3
1684,856	1684,203	0,0998	0,0008	1,0037	0,0199	1742,0542	1,3052	7,5530	0,0398	4,6664	1,0102	1,0095	0,2622	21	-2
1799,252	1798,555	0,0996	0,0002	1,0009	0,0211	1857,9181	1,3021	7,6200	0,0422	5,0046	1,0118	1,0110	0,3020	22	-1
1916,584	1915,849	0,0995	0,0000	1,0000	0,0221	1976,0213	1,2993	7,6817	0,0443	5,3444	1,0134	1,0126	0,3442	23	0
2035,459	2034,692	0,0996	0,0002	1,0009	0,0229	2094,9198	1,2968	7,7380	0,0458	5,6800	1,0151	1,0143	0,3885	24	1
2154,381	2153,59	0,0998	0,0008	1,0037	0,0234	2213,0875	1,2946	7,7888	0,0468	6,0055	1,0169	1,0160	0,4343	25	2
2271,794	2270,984	0,1003	0,0018	1,0084	0,0236	2328,9633	1,2926	7,8344	0,0473	6,3147	1,0188	1,0178	0,4811	26	3
2386,132	2385,308	0,1010	0,0031	1,0150	0,0235	2441,0022	1,2909	7,8748	0,0471	6,6018	1,0206	1,0197	0,5284	27	4
2495,872	2495,038	0,1018	0,0049	1,0234	0,0231	2547,7290	1,2894	7,9103	0,0463	6,8611	1,0224	1,0215	0,5754	28	5
2599,586	2598,747	0,1028	0,0071	1,0336	0,0224	2647,7918	1,2881	7,9412	0,0448	7,0879	1,0242	1,0233	0,6217	29	6
2695,998	2695,156	0,1040	0,0096	1,0457	0,0214	2740,0112	1,2870	7,9676	0,0429	7,2783	1,0260	1,0251	0,6665	30	7
2784,025	2783,183	0,1054	0,0126	1,0597	0,0202	2823,4221	1,2861	7,9901	0,0404	7,4293	1,0277	1,0268	0,7094	31	8
2862,819	2861,979	0,1070	0,0159	1,0755	0,0187	2897,3063	1,2854	8,0088	0,0375	7,5393	1,0292	1,0285	0,7498	32	9
2931,793	2930,956	0,1087	0,0196	1,0932	0,0171	2961,2122	1,2847	8,0241	0,0343	7,6076	1,0307	1,0300	0,7873	33	10
2990,631	2989,799	0,1107	0,0237	1,1126	0,0154	3014,9610	1,2842	8,0364	0,0308	7,6349	1,0320	1,0314	0,8215	34	11
3039,291	3038,463	0,1128	0,0282	1,1339	0,0136	3058,6395	1,2839	8,0460	0,0273	7,6229	1,0332	1,0326	0,8524	35	12
3077,988	3077,166	0,1151	0,0331	1,1570	0,0119	3092,5785	1,2836	8,0531	0,0237	7,5743	1,0343	1,0338	0,8796	36	13
3107,169	3106,353	0,1176	0,0383	1,1819	0,0101	3117,3212	1,2834	8,0581	0,0203	7,4924	1,0352	1,0348	0,9033	37	14
3127,473	3126,663	0,1202	0,0439	1,2085	0,0085	3133,5813	1,2832	8,0612	0,0170	7,3811	1,0360	1,0356	0,9236	38	15
3139,689	3138,885	0,1230	0,0499	1,2370	0,0070	3142,1968	1,2832	8,0628	0,0140	7,2447	1,0367	1,0363	0,9406	39	16
3144,704	3143,906	0,1260	0,0562	1,2671	0,0057	3144,0809	1,2832	8,0630	0,0113	7,0876	1,0372	1,0370	0,9547	40	17

Продолжение таблицы А5

3143,457	3142,665	0,1292	0,0630	1,2991	0,0045	3140,1751	1,2832	8,0621	0,0090	6,9140	1,0377	1,0374	0,9660	41	18
3136,893	3136,107	0,1326	0,0700	1,3327	0,0035	3131,4069	1,2833	8,0603	0,0070	6,7280	1,0380	1,0378	0,9750	42	19
3125,921	3125,141	0,1361	0,0775	1,3681	0,0026	3118,6544	1,2834	8,0577	0,0053	6,5331	1,0383	1,0382	0,9819	43	20
3111,388	3110,613	0,1398	0,0853	1,4051	0,0020	3102,7201	1,2835	8,0544	0,0039	6,3328	1,0385	1,0384	0,9872	44	21
3094,052	3093,284	0,1436	0,0934	1,4438	0,0014	3084,3134	1,2837	8,0507	0,0029	6,1297	1,0387	1,0386	0,9912	45	22
3074,574	3073,812	0,1476	0,1019	1,4842	0,0010	3064,0427	1,2838	8,0466	0,0020	5,9262	1,0388	1,0387	0,9940	46	23
3053,511	3052,755	0,1518	0,1108	1,5262	0,0007	3042,4144	1,2840	8,0422	0,0014	5,7242	1,0388	1,0388	0,9960	47	24
3031,318	3030,568	0,1561	0,1200	1,5698	0,0005	3019,8387	1,2842	8,0376	0,0009	5,5251	1,0389	1,0389	0,9974	48	25
3008,36	3007,616	0,1606	0,1295	1,6150	0,0003	2996,6395	1,2844	8,0327	0,0006	5,3300	1,0389	1,0389	0,9984	49	26
2984,919	2984,182	0,1653	0,1393	1,6618	0,0002	2973,0664	1,2846	8,0277	0,0004	5,1397	1,0390	1,0389	0,9990	50	27

Таблица А6 - Результаты теплового расчета двигателя с добавкой 5% водорода при $n = 5600 \text{ мин}^{-1}$

Темпе- ратура предпо- лагае- мая/, К	Темпе- ратура дейст- витель- ная	Удельный объем	s	y (f1)	Доля выдели- вшегося на участке тепла	Сред- няя на участке темпе- ратура, К	k1-2	K1-2	DX1-2	Давление	Коэффи- циент мо- лекулярного изменения смеси	m_{1-2}	Характе- ристика тепловы- деления	Угол ПКВ от начала горения	Текущий угол ПКВ
678,427	678,427	0,1651	0,1200	1,5698	0,0000	682,0387			0,0000	1,1233	1,0000	1,0000	0,0000	0	-25
685,651	685,6504	0,1605	0,1108	1,5262	0,0000	689,3775	1,3715	6,3842	0,0000	1,1677	1,0000	1,0000	0,0000	1	-24
693,105	693,1042	0,1561	0,1019	1,4842	0,0000	697,0662	1,3703	6,4016	0,0001	1,2138	1,0000	1,0000	0,0000	2	-23
701,028	701,0269	0,1518	0,0934	1,4438	0,0001	705,3810	1,3690	6,4196	0,0002	1,2620	1,0000	1,0000	0,0001	3	-22
709,734	709,7326	0,1477	0,0853	1,4051	0,0002	714,6706	1,3677	6,4388	0,0005	1,3129	1,0000	1,0000	0,0003	4	-21
719,607	719,604	0,1439	0,0775	1,3681	0,0004	725,3484	1,3663	6,4599	0,0008	1,3672	1,0000	1,0000	0,0008	5	-20
731,09	731,0852	0,1401	0,0700	1,3327	0,0006	737,8857	1,3647	6,4837	0,0013	1,4259	1,0001	1,0001	0,0016	6	-19
744,681	744,674	0,1366	0,0630	1,2991	0,0010	752,8019	1,3629	6,5111	0,0019	1,4901	1,0001	1,0001	0,0029	7	-18
760,922	760,9112	0,1332	0,0562	1,2671	0,0014	770,6538	1,3608	6,5428	0,0027	1,5611	1,0002	1,0002	0,0049	8	-17
780,385	780,3688	0,1301	0,0499	1,2370	0,0019	792,0225	1,3584	6,5796	0,0037	1,6403	1,0004	1,0003	0,0076	9	-16
803,66	803,6358	0,1271	0,0439	1,2085	0,0024	817,4977	1,3557	6,6221	0,0049	1,7292	1,0006	1,0005	0,0113	10	-15
831,336	831,3018	0,1243	0,0383	1,1819	0,0031	847,6611	1,3527	6,6706	0,0063	1,8295	1,0008	1,0007	0,0162	11	-14
863,987	863,9398	0,1217	0,0331	1,1570	0,0039	883,0686	1,3493	6,7254	0,0079	1,9428	1,0011	1,0010	0,0225	12	-13
902,151	902,0877	0,1192	0,0282	1,1339	0,0048	924,2318	1,3457	6,7861	0,0097	2,0706	1,0015	1,0013	0,0304	13	-12
946,313	946,2304	0,1170	0,0237	1,1126	0,0058	971,6002	1,3417	6,8523	0,0117	2,2144	1,0020	1,0018	0,0401	14	-11
996,887	996,7819	0,1149	0,0196	1,0932	0,0070	1025,5439	1,3377	6,9232	0,0139	2,3756	1,0026	1,0023	0,0518	15	-10

Продолжение таблицы А6

1054,2	1054,069	0,1131	0,0159	1,0755	0,0081	1086,3373	1,3335	6,9979	0,0163	2,5549	1,0033	1,0030	0,0657	16	-9
1118,47	1118,315	0,1114	0,0126	1,0597	0,0094	1154,1442	1,3292	7,0751	0,0188	2,7532	1,0042	1,0037	0,0819	17	-8
1189,81	1189,626	0,1100	0,0096	1,0457	0,0108	1229,0037	1,3250	7,1537	0,0215	2,9705	1,0051	1,0046	0,1008	18	-7
1268,19	1267,975	0,1087	0,0071	1,0336	0,0122	1310,8174	1,3209	7,2324	0,0243	3,2065	1,0062	1,0057	0,1223	19	-6
1353,44	1353,195	0,1076	0,0049	1,0234	0,0136	1399,3391	1,3169	7,3101	0,0271	3,4604	1,0074	1,0068	0,1466	20	-5
1445,24	1444,964	0,1067	0,0031	1,0150	0,0150	1494,1660	1,3132	7,3859	0,0299	3,7305	1,0088	1,0081	0,1737	21	-4
1543,1	1542,799	0,1060	0,0018	1,0084	0,0163	1594,7337	1,3097	7,4588	0,0327	4,0146	1,0103	1,0096	0,2037	22	-3
1646,37	1646,054	0,1055	0,0008	1,0037	0,0177	1700,3157	1,3064	7,5282	0,0353	4,3101	1,0120	1,0112	0,2364	23	-2
1754,26	1753,924	0,1052	0,0002	1,0009	0,0189	1810,0275	1,3033	7,5936	0,0377	4,6132	1,0138	1,0129	0,2717	24	-1
1865,8	1865,447	0,1052	0,0000	1,0000	0,0199	1922,8378	1,3005	7,6546	0,0399	4,9201	1,0157	1,0147	0,3094	25	0
1979,88	1979,522	0,1052	0,0002	1,0009	0,0209	2037,5857	1,2980	7,7110	0,0417	5,2262	1,0177	1,0167	0,3493	26	1
2095,29	2094,927	0,1055	0,0008	1,0037	0,0216	2153,0054	1,2957	7,7626	0,0432	5,5267	1,0198	1,0188	0,3910	27	2
2210,72	2210,351	0,1060	0,0018	1,0084	0,0221	2267,7566	1,2937	7,8096	0,0441	5,8164	1,0220	1,0209	0,4342	28	3
2324,79	2324,424	0,1067	0,0031	1,0150	0,0223	2380,4618	1,2919	7,8519	0,0446	6,0904	1,0243	1,0231	0,4783	29	4
2436,13	2435,761	0,1076	0,0049	1,0234	0,0223	2489,7472	1,2903	7,8897	0,0446	6,3436	1,0265	1,0254	0,5230	30	5
2543,36	2542,999	0,1087	0,0071	1,0336	0,0220	2594,2863	1,2889	7,9231	0,0441	6,5716	1,0288	1,0277	0,5676	31	6
2645,21	2644,846	0,1100	0,0096	1,0457	0,0215	2692,8435	1,2877	7,9525	0,0430	6,7704	1,0310	1,0299	0,6117	32	7
2740,48	2740,123	0,1114	0,0126	1,0597	0,0207	2784,3164	1,2866	7,9779	0,0414	6,9367	1,0332	1,0321	0,6546	33	8
2828,15	2827,803	0,1131	0,0159	1,0755	0,0197	2867,7730	1,2857	7,9997	0,0394	7,0681	1,0353	1,0343	0,6961	34	9
2907,39	2907,048	0,1149	0,0196	1,0932	0,0185	2942,4818	1,2850	8,0182	0,0369	7,1630	1,0373	1,0363	0,7354	35	10
2977,57	2977,233	0,1170	0,0237	1,1126	0,0171	3007,9337	1,2844	8,0335	0,0341	7,2211	1,0392	1,0382	0,7723	36	11
3038,3	3037,963	0,1192	0,0282	1,1339	0,0155	3063,8531	1,2838	8,0460	0,0311	7,2426	1,0409	1,0400	0,8064	37	12
3089,41	3089,083	0,1217	0,0331	1,1570	0,0140	3110,1989	1,2835	8,0559	0,0279	7,2290	1,0425	1,0417	0,8375	38	13
3130,99	3130,665	0,1243	0,0383	1,1819	0,0123	3147,1534	1,2831	8,0635	0,0247	7,1824	1,0439	1,0432	0,8655	39	14
3163,32	3163,001	0,1271	0,0439	1,2085	0,0107	3175,1016	1,2829	8,0691	0,0215	7,1056	1,0452	1,0445	0,8901	40	15
3186,88	3186,57	0,1301	0,0499	1,2370	0,0092	3194,6020	1,2828	8,0728	0,0183	7,0019	1,0462	1,0457	0,9116	41	16
3202,32	3202,01	0,1332	0,0562	1,2671	0,0077	3206,3505	1,2827	8,0750	0,0154	6,8748	1,0472	1,0467	0,9299	42	17
3210,38	3210,074	0,1366	0,0630	1,2991	0,0064	3211,1403	1,2827	8,0758	0,0127	6,7283	1,0480	1,0476	0,9454	43	18
3211,9	3211,595	0,1401	0,0700	1,3327	0,0052	3209,8214	1,2827	8,0754	0,0103	6,5660	1,0486	1,0483	0,9581	44	19
3207,74	3207,441	0,1439	0,0775	1,3681	0,0041	3203,2605	1,2827	8,0740	0,0082	6,3916	1,0491	1,0489	0,9684	45	20
3198,78	3198,477	0,1477	0,0853	1,4051	0,0032	3192,3065	1,2828	8,0719	0,0064	6,2085	1,0495	1,0493	0,9766	46	21
3185,84	3185,536	0,1518	0,0934	1,4438	0,0024	3177,7606	1,2829	8,0690	0,0049	6,0197	1,0499	1,0497	0,9830	47	22
3169,69	3169,389	0,1561	0,1019	1,4842	0,0018	3160,3543	1,2831	8,0656	0,0037	5,8279	1,0501	1,0500	0,9879	48	23

Продолжение таблицы А6

3151,02	3150,727	0,1605	0,1108	1,5262	0,0013	3140,7353	1,2832	8,0618	0,0027	5,6353	1,0503	1,0502	0,9916	49	24
3130,45	3130,154	0,1651	0,1200	1,5698	0,0010	3119,4599	1,2834	8,0576	0,0019	5,4438	1,0504	1,0504	0,9942	50	25
3108,47	3108,179	0,1698	0,1295	1,6150	0,0007	3096,9930	1,2836	8,0532	0,0013	5,2548	1,0505	1,0505	0,9961	51	26
3085,51	3085,222	0,1747	0,1393	1,6618	0,0005	3073,7125	1,2837	8,0485	0,0009	5,0696	1,0506	1,0506	0,9975	52	27
3061,91	3061,62	0,1798	0,1495	1,7101	0,0003	3049,9177	1,2839	8,0437	0,0006	4,8890	1,0506	1,0506	0,9984	53	28
3037,92	3037,635	0,1851	0,1600	1,7599	0,0002	3025,8403	1,2841	8,0388	0,0004	4,7134	1,0507	1,0507	0,9990	54	29

Таблица А7 - Результаты теплового расчета базового двигателя ВАЗ-2112 при $n = 900 \text{ мин}^{-1}$

Темпе- ратура предпо- лагае- мая/, К	Темпе- ратура дейст- витель- ная	Удельный объем	s	$\gamma (f1)$	Доля выдели- вшегося на участке тепла	Сред-няя на участ- ке тем- пре- ратура, К	k1-2	K1-2	DX1-2	Давление	Коэффи- циент мо- лекулярного изменения смеси	m_{1-2}	Характе- ристика тепловы- деления	Угол ПКВ от начала горения	Текущий угол ПКВ
759,4314	759,4314	0,11394	0,0439	1,2085	9,3E-07	762,5295			1,9E-06	1,824	1	1	0	0	-15
765,6275	765,6275	0,11143	0,0383	1,1819	1,5E-05	768,7397	1,3596	6,562	3E-05	1,88036	1	1	1,87E-06	1	-14
771,8518	771,8518	0,10908	0,0331	1,157	6,8E-05	775,1405	1,3588	6,5746	0,00014	1,93641	1	1	3,2E-05	2	-13
778,4292	778,429	0,1069	0,0282	1,1339	0,00019	782,1335	1,3579	6,5875	0,00038	1,99269	1	1	0,000169	3	-12
785,8377	785,8373	0,1049	0,0237	1,1126	0,00041	790,273	1,357	6,6015	0,00082	2,05016	1	1	0,000549	4	-11
794,7083	794,7076	0,10306	0,0196	1,0932	0,00076	800,2637	1,356	6,6176	0,00152	2,1103	1,0001	1,0001	0,001369	5	-10
805,8191	805,8179	0,1014	0,0159	1,0755	0,00127	812,9502	1,3548	6,6371	0,00254	2,17506	1,0002	1,0001	0,002889	6	-9
820,0814	820,0795	0,09991	0,0126	1,0597	0,00197	829,2989	1,3533	6,6614	0,00394	2,24685	1,0003	1,0003	0,005428	7	-8
838,5165	838,5132	0,09859	0,0096	1,0457	0,00288	850,368	1,3514	6,6919	0,00577	2,32849	1,0006	1,0004	0,009366	8	-7
862,2195	862,2141	0,09745	0,0071	1,0336	0,00404	877,2659	1,349	6,7301	0,00808	2,42309	1,0009	1,0007	0,015135	9	-6
892,3123	892,3034	0,09648	0,0049	1,0234	0,00545	911,0985	1,3462	6,7768	0,01091	2,53387	1,0014	1,0012	0,023217	10	-5
929,8847	929,87	0,09569	0,0031	1,015	0,00714	952,9056	1,3429	6,8326	0,01427	2,66395	1,0021	1,0017	0,034127	11	-4
975,9264	975,9031	0,09507	0,0018	1,0084	0,00908	1003,591	1,3391	6,8974	0,01816	2,81611	1,0029	1,0025	0,048397	12	-3
1031,256	1031,22	0,09463	0,0008	1,0037	0,01128	1063,852	1,335	6,9706	0,02255	2,99254	1,004	1,0035	0,066558	13	-2
1096,448	1096,394	0,09437	0,0002	1,0009	0,01369	1134,107	1,3306	7,0505	0,02737	3,19452	1,0054	1,0047	0,089109	14	-1
1171,765	1171,686	0,09428	0	1	0,01627	1214,43	1,326	7,1353	0,03253	3,42225	1,0071	1,0062	0,116484	15	0
1257,095	1256,984	0,09437	0,0002	1,0009	0,01894	1304,499	1,3214	7,2228	0,03788	3,67459	1,0091	1,0081	0,149015	16	1
1351,903	1351,753	0,09463	0,0008	1,0037	0,02162	1403,55	1,3169	7,3105	0,04323	3,94896	1,0114	1,0102	0,186894	17	2
1455,197	1455,002	0,09507	0,0018	1,0084	0,02419	1510,359	1,3127	7,3964	0,04838	4,2412	1,014	1,0127	0,230128	18	3

Продолжение таблицы А7

1565,52	1565,273	0,09569	0,0031	1,015	0,02654	1623,243	1,3087	7,4784	0,05307	4,54569	1,0169	1,0155	0,278508	19	4
1680,965	1680,662	0,09648	0,0049	1,0234	0,02852	1740,099	1,3051	7,5552	0,05705	4,85541	1,0202	1,0185	0,331579	20	5
1799,232	1798,871	0,09745	0,0071	1,0336	0,03003	1858,477	1,3019	7,6254	0,06006	5,16221	1,0236	1,0219	0,388626	21	6
1917,721	1917,302	0,09859	0,0096	1,0457	0,03094	1975,691	1,299	7,6885	0,06187	5,45725	1,0273	1,0254	0,448681	22	7
2033,66	2033,184	0,09991	0,0126	1,0597	0,03116	2088,964	1,2966	7,7439	0,06233	5,73146	1,031	1,0292	0,510554	23	8
2144,267	2143,738	0,1014	0,0159	1,0755	0,03066	2195,596	1,2945	7,7917	0,06132	5,97612	1,0348	1,0329	0,572881	24	9
2246,925	2246,348	0,10306	0,0196	1,0932	0,02943	2293,143	1,2927	7,8319	0,05886	6,18353	1,0386	1,0367	0,634205	25	10
2339,361	2338,741	0,1049	0,0237	1,1126	0,02752	2379,581	1,2913	7,865	0,05505	6,34751	1,0421	1,0403	0,693068	26	11
2419,801	2419,147	0,1069	0,0282	1,1339	0,02504	2453,447	1,2902	7,8914	0,05009	6,46395	1,0455	1,0438	0,748117	27	12
2487,092	2486,409	0,10908	0,0331	1,157	0,02213	2513,925	1,2894	7,9117	0,04427	6,53105	1,0485	1,047	0,798203	28	13
2540,757	2540,053	0,11143	0,0383	1,1819	0,01897	2560,876	1,2887	7,9266	0,03795	6,54939	1,0512	1,0499	0,842472	29	14
2580,996	2580,278	0,11394	0,0439	1,2085	0,01574	2594,806	1,2883	7,9369	0,03149	6,52182	1,0535	1,0524	0,880418	30	15
2608,615	2607,889	0,11662	0,0499	1,237	0,01262	2616,76	1,288	7,9433	0,02525	6,45303	1,0554	1,0545	0,911906	31	16
2624,904	2624,175	0,11946	0,0562	1,2671	0,00976	2628,189	1,2879	7,9465	0,01953	6,34903	1,057	1,0562	0,937155	32	17
2631,473	2630,746	0,12247	0,063	1,2991	0,00727	2630,776	1,2879	7,9471	0,01453	6,21652	1,0582	1,0576	0,956681	33	18
2630,078	2629,357	0,12565	0,07	1,3327	0,00519	2626,269	1,2879	7,9458	0,01039	6,06231	1,059	1,0586	0,971215	34	19
2622,459	2621,746	0,12898	0,0775	1,3681	0,00356	2616,333	1,2881	7,943	0,00712	5,89277	1,0597	1,0594	0,981604	35	20
2610,207	2609,504	0,13247	0,0853	1,4051	0,00233	2602,441	1,2882	7,9391	0,00466	5,71349	1,0601	1,0599	0,988721	36	21
2594,676	2593,985	0,13612	0,0934	1,4438	0,00146	2585,811	1,2884	7,9345	0,00291	5,52909	1,0604	1,0602	0,993382	37	22
2576,947	2576,269	0,13993	0,1019	1,4842	0,00087	2567,389	1,2886	7,9294	0,00173	5,34313	1,0606	1,0605	0,996294	38	23
2557,831	2557,166	0,14389	0,1108	1,5262	0,00049	2547,865	1,2889	7,9239	0,00098	5,15825	1,0607	1,0606	0,998024	39	24
2537,9	2537,249	0,148	0,12	1,5698	0,00026	2527,718	1,2891	7,9182	0,00052	4,97627	1,0607	1,0607	0,999	40	25

Таблица А8 - Результаты теплового расчета базового двигателя ВАЗ-2112 при $n = 2600 \text{ мин}^{-1}$

Темпе- ратура предпо- лагае- мая/, К	Темпе- ратура дейст- витель- ная	Удельный объем	s	y (f1)	Доля выдели- вшегося на участке тепла	Сред-няя на участ- ке тем- пре- ратура, К	k1-2	K1-2	DX1-2	Давление	Коэффи- циент мо- ле- кулярного изменения смеси	m ₁₋₂	Характе- ристика тепловы- деления	Угол ПКВ от начала горения	Текущий угол ПКВ
718,6469	718,6469	0,13406	0,07749	1,36807	0,00000	722,1109			0,00000	1,46976	1	1	0	0	-20
725,5749	725,5847	0,13060	0,07005	1,33271	0,00001	729,0405	1,36522	6,47621	0,00001	1,52332	1	1	6E-07	1	-19
732,5061	732,5258	0,12730	0,06296	1,29907	0,00002	736,0423	1,36421	6,49140	0,00005	1,57772	1	1	1E-05	2	-18

739,5785	739,6082	0,12417	0,05624	1,26715	0,00007	743,2928	1,36320	6,50656	0,00014	1,63311	1	1	6E-05	3	-17
Продолжение таблицы А8															
747,0071	747,0473	0,12122	0,04989	1,23696	0,00016	751,0474	1,36218	6,52207	0,00031	1,68979	1	1	0,0002	4	-16
755,0877	755,1393	0,11843	0,04390	1,20853	0,00030	759,6431	1,36111	6,53845	0,00059	1,74830	1	1	0,0005	5	-15
764,1985	764,2629	0,11582	0,03829	1,18187	0,00051	769,499	1,35995	6,55636	0,00101	1,80938	1,0001	1	0,0011	6	-14
774,7994	774,8784	0,11338	0,03305	1,15699	0,00080	781,1137	1,35864	6,57659	0,00159	1,87404	1,0001	1,0001	0,0021	7	-13
787,4279	787,524	0,11112	0,02819	1,13391	0,00119	795,0603	1,35714	6,59998	0,00237	1,94352	1,0002	1,0001	0,0037	8	-12
802,6926	802,8088	0,10903	0,02371	1,11263	0,00169	811,9767	1,35540	6,62744	0,00337	2,01934	1,0003	1,0002	0,0061	9	-11
821,2609	821,4006	0,10712	0,01961	1,09316	0,00231	832,552	1,35337	6,65986	0,00463	2,10321	1,0005	1,0004	0,0095	10	-10
843,8431	844,0101	0,10539	0,01590	1,07552	0,00308	857,5073	1,35100	6,69802	0,00615	2,19699	1,0007	1,0006	0,0141	11	-9
871,1716	871,3699	0,10385	0,01257	1,05971	0,00399	887,5734	1,34828	6,74250	0,00797	2,30267	1,001	1,0009	0,0202	12	-8
903,9753	904,2085	0,10248	0,00963	1,04574	0,00505	923,463	1,34521	6,79363	0,01010	2,42223	1,0014	1,0012	0,0282	13	-7
942,9507	943,2223	0,10129	0,00708	1,03363	0,00627	965,8409	1,34180	6,85142	0,01255	2,55754	1,0019	1,0017	0,0383	14	-6
988,731	989,0435	0,10028	0,00492	1,02336	0,00765	1015,292	1,33810	6,91548	0,01530	2,71023	1,0026	1,0023	0,0509	15	-5
1041,853	1042,208	0,09946	0,00315	1,01496	0,00918	1072,288	1,33416	6,98507	0,01836	2,88159	1,0034	1,003	0,0662	16	-4
1102,724	1103,122	0,09882	0,00177	1,00842	0,01084	1137,158	1,33008	7,05913	0,02168	3,07241	1,0043	1,0038	0,0845	17	-3
1171,591	1172,032	0,09836	0,00079	1,00374	0,01261	1210,051	1,32593	7,13636	0,02522	3,28286	1,0054	1,0048	0,1062	18	-2
1248,511	1248,991	0,09809	0,00020	1,00094	0,01446	1290,914	1,32179	7,21532	0,02893	3,51238	1,0067	1,006	0,1314	19	-1
1333,318	1333,836	0,09799	0,00000	1,00000	0,01636	1379,464	1,31774	7,29454	0,03272	3,75961	1,0081	1,0074	0,1603	20	0
1425,61	1426,161	0,09809	0,00020	1,00094	0,01825	1475,165	1,31384	7,37262	0,03650	4,02231	1,0098	1,009	0,1931	21	1
1524,721	1525,302	0,09836	0,00079	1,00374	0,02008	1577,22	1,31016	7,44831	0,04016	4,29736	1,0116	1,0107	0,2296	22	2
1629,72	1630,326	0,09882	0,00177	1,00842	0,02179	1684,567	1,30672	7,52054	0,04357	4,58075	1,0137	1,0127	0,2697	23	3
1739,413	1740,039	0,09946	0,00315	1,01496	0,02331	1795,886	1,30356	7,58847	0,04661	4,86768	1,0159	1,0148	0,3133	24	4
1852,358	1852,999	0,10028	0,00492	1,02336	0,02457	1909,629	1,30068	7,65148	0,04915	5,15269	1,0182	1,0171	0,3599	25	5
1966,9	1967,552	0,10129	0,00708	1,03363	0,02553	2024,06	1,29810	7,70914	0,05105	5,42983	1,0207	1,0195	0,4091	26	6
2081,22	2081,879	0,10248	0,00963	1,04574	0,02611	2137,309	1,29581	7,76120	0,05222	5,69291	1,0233	1,022	0,4601	27	7
2193,399	2194,061	0,10385	0,01257	1,05971	0,02628	2247,449	1,29379	7,80759	0,05256	5,93576	1,026	1,0247	0,5123	28	8
2301,5	2302,163	0,10539	0,01590	1,07552	0,02601	2352,577	1,29204	7,84833	0,05202	6,15259	1,0286	1,0273	0,5649	29	9
2403,655	2404,316	0,10712	0,01961	1,09316	0,02530	2450,904	1,29055	7,88358	0,05060	6,33821	1,0313	1,03	0,6169	30	10
2498,153	2498,811	0,10903	0,02371	1,11263	0,02416	2540,841	1,28929	7,91358	0,04833	6,48841	1,0338	1,0326	0,6675	31	11
2583,529	2584,183	0,11112	0,02819	1,13391	0,02264	2621,084	1,28824	7,93863	0,04528	6,60014	1,0363	1,0351	0,7159	32	12
2658,639	2659,288	0,11338	0,03305	1,15699	0,02079	2690,677	1,28739	7,95908	0,04158	6,67170	1,0386	1,0374	0,7611	33	13
2722,715	2723,357	0,11582	0,03829	1,18187	0,01870	2749,054	1,28672	7,97533	0,03739	6,70281	1,0407	1,0396	0,8027	34	14
2775,394	2776,03	0,11843	0,04390	1,20853	0,01644	2796,058	1,28621	7,98779	0,03289	6,69459	1,0426	1,0416	0,8401	35	15

2816,723	2817,353	0,12122	0,04989	1,23696	0,01413	2831,929	1,28584	7,99689	0,02826	6,64944	1,0443	1,0434	0,873	36	16
Продолжение таблицы А8															
2847,135	2847,759	0,12417	0,05624	1,26715	0,01185	2857,262	1,28559	8,00307	0,02370	6,57085	1,0457	1,045	0,9013	37	17
2867,39	2868,008	0,12730	0,06296	1,29907	0,00968	2872,948	1,28544	8,00675	0,01937	6,46310	1,0469	1,0463	0,9249	38	18
2878,506	2879,119	0,13060	0,07005	1,33271	0,00771	2880,089	1,28538	8,00832	0,01541	6,33093	1,0479	1,0474	0,9443	39	19
2881,671	2882,279	0,13406	0,07749	1,36807	0,00596	2879,911	1,28538	8,00815	0,01192	6,17930	1,0487	1,0483	0,9597	40	20
2878,151	2878,754	0,13769	0,08529	1,40511	0,00448	2873,679	1,285446	8,00659	0,00895	6,01301	1,0493	1,049	0,9716	41	21
2869,207	2869,805	0,14149	0,09344	1,44382	0,00326	2862,615	1,285554	8,00392	0,00652	5,83653	1,0497	1,0495	0,9806	42	22
2856,022	2856,616	0,14544	0,10194	1,48419	0,00230	2847,836	1,285698	8,00041	0,00459	5,65380	1,05	1,0499	0,9871	43	23
2839,65	2840,239	0,14956	0,11078	1,52619	0,00156	2830,318	1,285867	7,99625	0,00313	5,46816	1,0503	1,0502	0,9917	44	24
2820,986	2821,57	0,15383	0,11996	1,56981	0,00103	2810,868	1,286056	7,99163	0,00206	5,28228	1,0504	1,0504	0,9948	45	25
2800,751	2801,332	0,15826	0,12948	1,61501	0,00065	2790,129	1,28626	7,98666	0,00130	5,09824	1,0505	1,0505	0,9969	46	26
2779,508	2780,084	0,16285	0,13932	1,66178	0,00040	2768,589	1,286473	7,98146	0,00079	4,91755	1,0506	1,0506	0,9982	47	27
2757,67	2758,243	0,16758	0,14950	1,71010	0,00023	2746,603	1,286694	7,97608	0,00046	4,74130	1,0506	1,0506	0,999	48	28

Таблица А9 - Результаты теплового расчета базового двигателя ВАЗ-2112 при $n = 3700 \text{ мин}^{-1}$

Темпе- ратура предпо- лагае- мая/, К	Темпе- ратура дейст- витель- ная	Удельный объем	s	y (f1)	Доля выдели- вшегося на участке тепла	Сред-няя на участ- ке тем- пре- ратура, К	k1-2	K1-2	DX1-2	Давление	Коэффи- циент мо- ле- кулярного изменения смеси	m ₁₋₂	Характе- ристика тепловы- деления	Угол ПКВ от начала горения	Текущий угол ПКВ
691,4311	691,4311	0,1495	0,1019	1,4842	1,1E-07	694,9687			2,27E-07	1,26777	1	1	0	0	-23
698,5064	698,5257	0,1455	0,0934	1,4438	2,1E-06	702,0472	1,36936	6,4147	4,24E-06	1,31659	1	1	2,27E-07	1	-22
705,5881	705,6267	0,1416	0,0853	1,4051	1,1E-05	709,1644	1,36825	6,43107	2,11E-05	1,36662	1	1	4,47E-06	2	-21
712,7407	712,7989	0,1378	0,0775	1,3681	3,1E-05	716,4066	1,36715	6,4473	6,25E-05	1,41789	1	1	2,56E-05	3	-20
720,0724	720,1507	0,1343	0,07	1,3327	7,1E-05	723,9055	1,36606	6,4636	0,000142	1,47051	1	1	8,8E-05	4	-19
727,7385	727,8378	0,1309	0,063	1,2991	0,00014	731,8414	1,36495	6,48024	0,000273	1,52471	1,00001	1,00001	0,00023	5	-18
735,9443	736,0659	0,1277	0,0562	1,2671	0,00024	740,4453	1,36379	6,49761	0,000473	1,58081	1,00003	1,00002	0,000503	6	-17
744,9463	745,0922	0,1246	0,0499	1,237	0,00038	749,9997	1,36257	6,51616	0,000757	1,63927	1,00005	1,00004	0,000976	7	-16
755,0532	755,2261	0,1218	0,0439	1,2085	0,00057	760,8391	1,36124	6,53644	0,001141	1,70071	1,00009	1,00007	0,001733	8	-15
766,6249	766,828	0,1191	0,0383	1,1819	0,00082	773,3472	1,35978	6,55902	0,001643	1,76587	1,00015	1,00012	0,002873	9	-14
780,0695	780,307	0,1166	0,0331	1,157	0,00114	787,9543	1,35813	6,58453	0,00228	1,83568	1,00023	1,00019	0,004517	10	-13
795,8392	796,1157	0,1142	0,0282	1,1339	0,00153	805,1311	1,35628	6,6136	0,003069	1,9112	1,00035	1,00029	0,006797	11	-12
814,4229	814,7436	0,1121	0,0237	1,1126	0,00201	825,3803	1,35418	6,64683	0,004025	1,9936	1,0005	1,00042	0,009866	12	-11

Продолжение таблицы А9

836,3377	836,7082	0,1101	0,0196	1,0932	0,00258	849,2271	1,35182	6,68472	0,005163	2,08418	1,00071	1,0006	0,01389	13	-10
862,1166	862,5423	0,1084	0,0159	1,0755	0,00325	877,2058	1,34918	6,72765	0,006496	2,18428	1,00097	1,00084	0,019053	14	-9
892,295	892,7811	0,1068	0,0126	1,0597	0,00402	909,8453	1,34627	6,77583	0,008033	2,29526	1,0013	1,00113	0,025549	15	-8
927,3955	927,9463	0,1054	0,0096	1,0457	0,00489	947,6527	1,3431	6,82924	0,009782	2,41842	1,00171	1,0015	0,033582	16	-7
967,91	968,529	0,1041	0,0071	1,0336	0,00587	991,0964	1,33969	6,88765	0,011744	2,55494	1,00221	1,00196	0,043364	17	-6
1014,283	1014,972	0,1031	0,0049	1,0234	0,00696	1040,587	1,3361	6,95059	0,013915	2,70578	1,0028	1,00251	0,055108	18	-5
1066,891	1067,65	0,1023	0,0031	1,015	0,00814	1096,46	1,33237	7,01737	0,016287	2,87166	1,00351	1,00316	0,069023	19	-4
1126,029	1126,856	0,1016	0,0018	1,0084	0,00942	1158,956	1,32856	7,08713	0,018842	3,0529	1,00434	1,00393	0,08531	20	-3
1191,883	1192,775	0,1011	0,0008	1,0037	0,01078	1228,203	1,32473	7,1589	0,021556	3,24943	1,0053	1,00482	0,104153	21	-2
1264,523	1265,475	0,1008	0,0002	1,0009	0,0122	1304,201	1,32094	7,23164	0,024393	3,46068	1,0064	1,00585	0,125709	22	-1
1343,879	1344,884	0,1008	0	1	0,01366	1386,803	1,31724	7,30432	0,02731	3,68556	1,00764	1,00702	0,150101	23	0
1429,727	1430,778	0,1008	0,0002	1,0009	0,01513	1475,703	1,31368	7,37596	0,030256	3,9224	1,00903	1,00833	0,177412	24	1
1521,679	1522,767	0,1011	0,0008	1,0037	0,01658	1570,424	1,31029	7,44568	0,033167	4,16896	1,01057	1,0098	0,207668	25	2
1619,17	1620,287	0,1016	0,0018	1,0084	0,01799	1670,315	1,30709	7,51271	0,035975	4,42244	1,01226	1,01141	0,240835	26	3
1721,46	1722,597	0,1023	0,0031	1,015	0,0193	1774,544	1,30412	7,57644	0,038604	4,67951	1,01409	1,01317	0,27681	27	4
1827,629	1828,778	0,1031	0,0049	1,0234	0,02049	1882,111	1,30137	7,63639	0,040974	4,93638	1,01605	1,01507	0,315414	28	5
1936,592	1937,747	0,1041	0,0071	1,0336	0,0215	1991,855	1,29886	7,69219	0,043006	5,18891	1,01814	1,01709	0,356389	29	6
2047,118	2048,271	0,1054	0,0096	1,0457	0,02231	2102,485	1,29658	7,74362	0,04462	5,4327	1,02032	1,01923	0,399394	30	7
2157,853	2158,999	0,1068	0,0126	1,0597	0,02287	2212,605	1,29453	7,79056	0,045748	5,66328	1,0226	1,02146	0,444015	31	8
2267,358	2268,493	0,1084	0,0159	1,0755	0,02317	2320,757	1,2927	7,83297	0,046331	5,87623	1,02492	1,02376	0,489763	32	9
2374,155	2375,275	0,1101	0,0196	1,0932	0,02316	2425,466	1,29108	7,8709	0,046325	6,0674	1,02728	1,0261	0,536094	33	10
2476,777	2477,879	0,1121	0,0237	1,1126	0,02285	2525,297	1,28967	7,90444	0,045708	6,23304	1,02964	1,02846	0,582419	34	11
2573,817	2574,901	0,1142	0,0282	1,1339	0,02224	2618,903	1,28844	7,93376	0,044479	6,37	1,03196	1,0308	0,628127	35	12
2663,99	2665,054	0,1166	0,0331	1,157	0,02133	2705,085	1,2874	7,95904	0,042662	6,47586	1,03423	1,0331	0,672606	36	13
2746,18	2747,225	0,1191	0,0383	1,1819	0,02015	2782,834	1,28651	7,98051	0,040307	6,54902	1,0364	1,03531	0,715267	37	14
2819,489	2820,514	0,1218	0,0439	1,2085	0,01874	2851,379	1,28578	7,99842	0,037486	6,58881	1,03845	1,03742	0,755574	38	15
2883,269	2884,276	0,1246	0,0499	1,237	0,01715	2910,209	1,28518	8,01305	0,034294	6,59547	1,04036	1,0394	0,79306	39	16
2937,149	2938,138	0,1277	0,0562	1,2671	0,01542	2959,095	1,28471	8,02466	0,030837	6,57013	1,0421	1,04123	0,827354	40	17
2981,041	2982,015	0,1309	0,063	1,2991	0,01362	2998,087	1,28435	8,03356	0,027234	6,51473	1,04367	1,04289	0,858191	41	18
3015,134	3016,094	0,1343	0,07	1,3327	0,0118	3027,5	1,28409	8,04003	0,023604	6,43193	1,04506	1,04436	0,885426	42	19
3039,867	3040,814	0,1378	0,0775	1,3681	0,01003	3047,883	1,28392	8,04436	0,020058	6,3249	1,04626	1,04566	0,909029	43	20
3055,898	3056,834	0,1416	0,0853	1,4051	0,00835	3059,974	1,28382	8,04682	0,016697	6,19718	1,04728	1,04677	0,929087	44	21
3064,051	3064,977	0,1455	0,0934	1,4438	0,0068	3064,657	1,28378	8,04768	0,013604	6,05248	1,04813	1,0477	0,945784	45	22

Продолжение таблицы А9

3065,264	3066,182	0,1495	0,1019	1,4842	0,00542	3062,899	1,2838	8,0472	0,010837	5,89451	1,04882	1,04848	0,959388	46	23
3060,534	3061,444	0,1538	0,1108	1,5262	0,00422	3055,698	1,28387	8,04559	0,008433	5,72683	1,04937	1,0491	0,970225	47	24
3050,862	3051,766	0,1582	0,12	1,5698	0,0032	3044,035	1,28397	8,04308	0,006403	5,55272	1,0498	1,04959	0,978658	48	25
3037,207	3038,106	0,1627	0,1295	1,615	0,00237	3028,828	1,2841	8,03983	0,004738	5,37507	1,05013	1,04996	0,98506	49	26
3020,449	3021,343	0,1674	0,1393	1,6618	0,00171	3010,906	1,28425	8,03601	0,003415	5,19636	1,05037	1,05025	0,989799	50	27
3001,363	3002,253	0,1723	0,1495	1,7101	0,0012	2990,985	1,28442	8,03175	0,002393	5,01862	1,05054	1,05046	0,993213	51	28
2980,607	2981,492	0,1773	0,16	1,7599	0,00081	2969,662	1,28461	8,02717	0,001629	4,84344	1,05066	1,0506	0,995606	52	29
2958,718	2959,599	0,1825	0,1708	1,8113	0,00054	2947,418	1,28481	8,02234	0,001076	4,67205	1,05075	1,05071	0,997235	53	30
2936,119	2936,997	0,1878	0,1819	1,8641	0,00034	2924,626	1,28501	8,01734	0,000689	4,5053	1,0508	1,05077	0,998311	54	31
2913,133	2914,007	0,1933	0,1933	1,9184	0,00021	2901,565	1,28522	8,01221	0,000427	4,34377	1,05084	1,05082	0,999	55	32

Таблица А10 - Результаты теплового расчета базового двигателя ВА3-2112 при $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$

Темпе- ратура предпо- лагае- мая/, К	Темпе- ратура дейст- витель- ная	Удельный объем	s	y (f1)	Доля выдели- вшегося на участ- ке тепла	Сред- няя на участке темпре- ратура, К	k1-2	K1-2	DX1-2	Давление	Коэффи- циент мо- ле- кулярного изменения смеси	m_{1-2}	Характе- ристика тепловы- деления	Угол ПКВ от начала горения	Текущий угол ПКВ
670,832	670,832	0,1674	0,1295	1,615	6E-08	674,414			1,2E-07	1,09876	1	1	0	0	-26
677,996	677,978	0,1627	0,12	1,5698	1,2E-06	681,596	1,37273	6,365839	2,42E-06	1,14244	1	1	1,2E-07	1	-25
685,195	685,158	0,1582	0,1108	1,5262	6,3E-06	688,831	1,37153	6,383148	1,26E-05	1,18753	1	1	2,54E-06	2	-24
692,468	692,413	0,1538	0,1019	1,4842	1,9E-05	696,176	1,37035	6,400338	3,85E-05	1,23407	1	1	1,51E-05	3	-23
699,885	699,811	0,1497	0,0934	1,4438	4,5E-05	703,719	1,36917	6,417538	8,95E-05	1,28213	1	1,000002	5,36E-05	4	-22
707,552	707,459	0,1456	0,0853	1,4051	8,8E-05	711,582	1,36799	6,434948	0,000176	1,33185	1,00001	1,000005	0,000143	5	-21
715,613	715,498	0,1418	0,0775	1,3681	0,00015	719,93	1,36678	6,452837	0,00031	1,38347	1,00002	1,000012	0,000319	6	-20
724,248	724,111	0,1381	0,07	1,3327	0,00025	728,964	1,36553	6,47154	0,000503	1,43728	1,00003	1,000024	0,000629	7	-19
733,681	733,52	0,1347	0,063	1,2991	0,00038	738,929	1,3642	6,491458	0,000768	1,4937	1,00006	1,000045	0,001131	8	-18
744,177	743,991	0,1313	0,0562	1,2671	0,00056	750,11	1,36278	6,513046	0,001118	1,55324	1,0001	1,000077	0,001899	9	-17
756,044	755,828	0,1282	0,0499	1,237	0,00078	762,834	1,36122	6,536803	0,001568	1,61653	1,00015	1,000125	0,003017	10	-16
769,625	769,376	0,1253	0,0439	1,2085	0,00107	777,465	1,3595	6,563249	0,002132	1,68433	1,00023	1,000193	0,004586	11	-15
785,304	785,019	0,1225	0,0383	1,1819	0,00141	794,399	1,3576	6,592906	0,002822	1,75751	1,00034	1,000287	0,006717	12	-14
803,494	803,167	0,1199	0,0331	1,157	0,00183	814,063	1,35548	6,626265	0,003653	1,83704	1,00048	1,000413	0,00954	13	-13

824,633	824,259	0,1175	0,0282	1,1339	0,00232	836,904	1,35312	6,663748	0,004638	1,92398	1,00067	1,000577	0,013193	14	-12
Продолжение таблицы А10															
849,175	848,75	0,1153	0,0237	1,1126	0,00289	863,378	1,35053	6,70568	0,005786	2,01946	1,00091	1,000787	0,017831	15	-11
877,582	877,099	0,1133	0,0196	1,0932	0,00355	893,945	1,34769	6,752246	0,007108	2,12464	1,0012	1,001052	0,023617	16	-10
910,308	909,764	0,1115	0,0159	1,0755	0,00431	929,05	1,34462	6,803468	0,008611	2,24064	1,00156	1,001379	0,030725	17	-9
947,792	947,181	0,1098	0,0126	1,0597	0,00515	969,116	1,34134	6,859184	0,010298	2,36854	1,002	1,001778	0,039335	18	-8
990,44	989,758	0,1084	0,0096	1,0457	0,00609	1014,53	1,33789	6,919043	0,012171	2,50927	1,00252	1,002258	0,049634	19	-7
1038,61	1037,85	0,1071	0,0071	1,0336	0,00711	1065,61	1,33431	6,982519	0,014224	2,66356	1,00314	1,002828	0,061805	20	-6
1092,61	1091,77	0,1061	0,0049	1,0234	0,00822	1122,63	1,33064	7,048932	0,016447	2,83193	1,00386	1,003498	0,076029	21	-5
1152,65	1151,73	0,1052	0,0031	1,015	0,00941	1185,76	1,32693	7,117488	0,018826	3,01454	1,00469	1,004277	0,092476	22	-4
1218,87	1217,88	0,1045	0,0018	1,0084	0,01067	1255,09	1,32324	7,187322	0,021336	3,2112	1,00565	1,005172	0,111301	23	-3
1291,31	1290,23	0,104	0,0008	1,0037	0,01197	1330,58	1,31961	7,257548	0,023948	3,42129	1,00673	1,006191	0,132637	24	-2
1369,86	1368,71	0,1037	0,0002	1,0009	0,01331	1412,09	1,31609	7,327297	0,026624	3,64372	1,00795	1,00734	0,156585	25	-1
1454,32	1453,09	0,1037	0	1	0,01466	1499,32	1,31271	7,395763	0,02932	3,8769	1,0093	1,008624	0,18321	26	0
1544,33	1543,01	0,1037	0,0002	1,0009	0,01599	1591,84	1,30949	7,46222	0,031982	4,11877	1,01079	1,010044	0,21253	27	1
1639,36	1637,98	0,104	0,0008	1,0037	0,01728	1689,06	1,30646	7,526051	0,034552	4,36675	1,01241	1,011599	0,244512	28	2
1738,77	1737,31	0,1045	0,0018	1,0084	0,01848	1790,25	1,30364	7,586747	0,036966	4,6178	1,01417	1,013288	0,279064	29	3
1841,73	1840,22	0,1052	0,0031	1,015	0,01958	1894,52	1,30103	7,643913	0,039156	4,8685	1,01604	1,015103	0,31603	30	4
1947,3	1945,72	0,1061	0,0049	1,0234	0,02053	2000,85	1,29863	7,69726	0,041054	5,11507	1,01803	1,017035	0,355186	31	5
2054,39	2052,76	0,1071	0,0071	1,0336	0,0213	2108,1	1,29645	7,746598	0,042593	5,35355	1,02011	1,019071	0,39624	32	6
2161,8	2160,12	0,1084	0,0096	1,0457	0,02186	2215,03	1,29447	7,791822	0,043713	5,57987	1,02227	1,021194	0,438833	33	7
2268,27	2266,54	0,1098	0,0126	1,0597	0,02218	2320,37	1,2927	7,832901	0,044359	5,79	1,02449	1,023384	0,482546	34	8
2372,47	2370,7	0,1115	0,0159	1,0755	0,02225	2422,77	1,29113	7,869865	0,044493	5,98011	1,02675	1,025619	0,526905	35	9
2473,08	2471,28	0,1133	0,0196	1,0932	0,02204	2520,95	1,28974	7,902798	0,044088	6,1467	1,029	1,027874	0,571399	36	10
2568,82	2567	0,1153	0,0237	1,1126	0,02157	2613,66	1,28852	7,931826	0,043138	6,28679	1,03124	1,030123	0,615487	37	11
2658,5	2656,66	0,1175	0,0282	1,1339	0,02083	2699,78	1,28748	7,957107	0,041655	6,39798	1,03343	1,032336	0,658625	38	12
2741,05	2739,19	0,1199	0,0331	1,157	0,01984	2778,32	1,28658	7,978829	0,039673	6,4786	1,03555	1,034488	0,70028	39	13
2815,58	2813,71	0,1225	0,0383	1,1819	0,01862	2848,49	1,28583	7,997203	0,037246	6,52775	1,03756	1,036552	0,739953	40	14
2881,4	2879,53	0,1253	0,0439	1,2085	0,01722	2909,73	1,28521	8,012456	0,034445	6,54537	1,03945	1,038505	0,777199	41	15
2938,06	2936,18	0,1282	0,0499	1,237	0,01568	2961,69	1,2847	8,024827	0,031359	6,53218	1,0412	1,040324	0,811644	42	16
2985,33	2983,45	0,1313	0,0562	1,2671	0,01404	3004,3	1,28431	8,034565	0,028084	6,48965	1,04279	1,041994	0,843003	43	17
3023,26	3021,39	0,1347	0,063	1,2991	0,01236	3037,68	1,28401	8,041921	0,024723	6,41995	1,04422	1,043503	0,871087	44	18
3052,11	3050,24	0,1381	0,07	1,3327	0,01069	3062,23	1,2838	8,047149	0,021377	6,32575	1,04547	1,044843	0,89581	45	19
3072,35	3070,5	0,1418	0,0775	1,3681	0,00907	3078,5	1,28367	8,050497	0,01814	6,21015	1,04656	1,046013	0,917187	46	20

3084,65	3082,81	0,1456	0,0853	1,4051	0,00755	3087,22	1,2836	8,052206	0,015095	6,07649	1,04748	1,047016	0,935327	47	21
Продолжение таблицы А10															
3089,78	3087,95	0,1497	0,0934	1,4438	0,00615	3089,2	1,28359	8,052505	0,012306	5,9282	1,04824	1,047859	0,950422	48	22
3088,62	3086,81	0,1538	0,1019	1,4842	0,00491	3085,35	1,28362	8,051611	0,00982	5,76865	1,04887	1,048555	0,962728	49	23
3082,08	3080,29	0,1582	0,1108	1,5262	0,00383	3076,58	1,2837	8,04972	0,007663	5,60105	1,04937	1,049116	0,972548	50	24
3071,07	3069,29	0,1627	0,12	1,5698	0,00292	3063,77	1,28381	8,047014	0,005842	5,4283	1,04975	1,04956	0,980211	51	25
3056,46	3054,69	0,1674	0,1295	1,615	0,00217	3047,74	1,28394	8,04365	0,004347	5,25297	1,05005	1,049903	0,986053	52	26
3039,02	3037,28	0,1722	0,1393	1,6618	0,00158	3029,25	1,2841	8,039768	0,003154	5,07726	1,05027	1,050161	0,9904	53	27
3019,47	3017,74	0,1773	0,1495	1,7101	0,00111	3008,93	1,28427	8,035484	0,002228	4,90296	1,05043	1,050352	0,993554	54	28
2998,39	2996,68	0,1824	0,16	1,7599	0,00077	2987,33	1,28446	8,030896	0,001532	4,73147	1,05054	1,050488	0,995782	55	29
2976,27	2974,58	0,1877	0,1708	1,8113	0,00051	2964,88	1,28465	8,026081	0,001023	4,56386	1,05062	1,050584	0,997314	56	30
2953,5	2951,83	0,1932	0,1819	1,8641	0,00033	2941,93	1,28486	8,021101	0,000663	4,40089	1,05067	1,050649	0,998337	57	31
2930,37	2928,72	0,1988	0,1933	1,9184	0,00021	2918,74	1,28506	8,016003	0,000417	4,2431	1,05071	1,050691	0,999	58	32

Таблица А11 - Результаты теплового расчета базового двигателя ВАЗ-2112 при $n = 5600 \text{ мин}^{-1}$

Темпе- ратура предпо- лагае- мая, К	Темпе- ратура дейст- витель- ная	Удельный объем	s	y (f1)	Доля выдели- вшегося на участке тепла	Сред- няя на участке темпе- ратура, К	k1-2	K1-2	DX1-2	Давление	Коэффи- циент мо- ле- кулярного изменения смеси	m_{1-2}	Характе- ристика тепловы- деления	Угол ПКВ от начала горения	Текущий угол ПКВ
668,02	668,02	0,1874	0,1495	1,7103	0,0000	671,6450			0,0000	0,9774	1,0000	1,0000	0,0000	0	-28
675,27	675,21	0,1821	0,1394	1,6620	0,0000	678,9099	1,3732	6,3591	0,0000	1,0167	1,0000	1,0000	0,0000	1	-27
682,55	682,44	0,1770	0,1295	1,6152	0,0000	686,2221	1,3720	6,3767	0,0000	1,0574	1,0000	1,0000	0,0000	2	-26
689,89	689,73	0,1720	0,1200	1,5700	0,0000	693,6016	1,3708	6,3942	0,0000	1,0994	1,0000	1,0000	0,0000	3	-25
697,31	697,09	0,1672	0,1108	1,5263	0,0000	701,0847	1,3696	6,4115	0,0001	1,1429	1,0000	1,0000	0,0000	4	-24
704,86	704,58	0,1626	0,1020	1,4843	0,0001	708,7255	1,3684	6,4289	0,0001	1,1879	1,0000	1,0000	0,0001	5	-23
712,59	712,26	0,1582	0,0935	1,4440	0,0001	716,5983	1,3672	6,4463	0,0002	1,2344	1,0000	1,0000	0,0002	6	-22
720,60	720,21	0,1540	0,0853	1,4052	0,0002	724,7990	1,3660	6,4641	0,0003	1,2826	1,0000	1,0000	0,0004	7	-21
728,99	728,54	0,1499	0,0775	1,3682	0,0002	733,4461	1,3648	6,4823	0,0005	1,3326	1,0000	1,0000	0,0007	8	-20
737,90	737,37	0,1460	0,0701	1,3328	0,0004	742,6817	1,3636	6,5012	0,0007	1,3846	1,0001	1,0000	0,0012	9	-19
747,47	746,87	0,1423	0,0630	1,2992	0,0005	752,6718	1,3623	6,5210	0,0010	1,4388	1,0001	1,0001	0,0019	10	-18
757,88	757,20	0,1388	0,0563	1,2672	0,0007	763,6065	1,3609	6,5421	0,0014	1,4955	1,0001	1,0001	0,0029	11	-17
769,34	768,58	0,1355	0,0499	1,2370	0,0009	775,6988	1,3594	6,5647	0,0018	1,5551	1,0002	1,0002	0,0043	12	-16
782,06	781,22	0,1324	0,0439	1,2086	0,0012	789,1837	1,3578	6,5893	0,0024	1,6180	1,0003	1,0003	0,0061	13	-15

796,30	795,36	0,1295	0,0383	1,1819	0,0015	804,3152	1,3561	6,6160	0,0031	1,6846	1,0004	1,0004	0,0085	14	-14
Продолжение таблицы А11															
812,33	811,27	0,1268	0,0331	1,1570	0,0019	821,3636	1,3543	6,6452	0,0039	1,7556	1,0006	1,0005	0,0116	15	-13
830,40	829,23	0,1242	0,0282	1,1339	0,0024	840,6112	1,3523	6,6773	0,0048	1,8313	1,0008	1,0007	0,0154	16	-12
850,82	849,52	0,1219	0,0237	1,1127	0,0029	862,3470	1,3501	6,7123	0,0059	1,9124	1,0010	1,0009	0,0202	17	-11
873,87	872,44	0,1198	0,0196	1,0932	0,0035	886,8605	1,3478	6,7505	0,0071	1,9995	1,0013	1,0012	0,0261	18	-10
899,85	898,26	0,1178	0,0159	1,0755	0,0042	914,4350	1,3453	6,7919	0,0084	2,0932	1,0017	1,0015	0,0332	19	-9
929,02	927,28	0,1161	0,0126	1,0597	0,0050	945,3393	1,3427	6,8365	0,0099	2,1939	1,0021	1,0019	0,0416	20	-8
961,66	959,75	0,1146	0,0096	1,0458	0,0058	979,8195	1,3399	6,8842	0,0116	2,3021	1,0026	1,0024	0,0515	21	-7
997,98	995,90	0,1132	0,0071	1,0336	0,0067	1018,0905	1,3370	6,9347	0,0134	2,4181	1,0032	1,0029	0,0632	22	-6
1038,20	1035,94	0,1121	0,0049	1,0234	0,0077	1060,3261	1,3340	6,9877	0,0154	2,5422	1,0039	1,0035	0,0766	23	-5
1082,45	1080,02	0,1112	0,0031	1,0150	0,0087	1106,6503	1,3310	7,0428	0,0175	2,6742	1,0046	1,0043	0,0920	24	-4
1130,85	1128,23	0,1105	0,0018	1,0084	0,0099	1157,1279	1,3279	7,0994	0,0197	2,8141	1,0055	1,0051	0,1095	25	-3
1183,41	1180,61	0,1100	0,0008	1,0037	0,0110	1211,7558	1,3248	7,1571	0,0220	2,9612	1,0065	1,0060	0,1292	26	-2
1240,10	1237,13	0,1097	0,0002	1,0009	0,0122	1270,4551	1,3218	7,2152	0,0244	3,1149	1,0076	1,0071	0,1512	27	-1
1300,81	1297,67	0,1096	0,0000	1,0000	0,0134	1333,0635	1,3188	7,2732	0,0268	3,2742	1,0089	1,0083	0,1756	28	0
1365,32	1362,02	0,1097	0,0002	1,0009	0,0146	1399,3297	1,3159	7,3305	0,0292	3,4378	1,0102	1,0095	0,2024	29	1
1433,34	1429,89	0,1100	0,0008	1,0037	0,0158	1468,9096	1,3132	7,3866	0,0315	3,6040	1,0117	1,0110	0,2316	30	2
1504,48	1500,89	0,1105	0,0018	1,0084	0,0169	1541,3645	1,3105	7,4409	0,0338	3,7712	1,0133	1,0125	0,2631	31	3
1578,25	1574,54	0,1112	0,0031	1,0150	0,0179	1616,1622	1,3080	7,4932	0,0358	3,9371	1,0150	1,0141	0,2968	32	4
1654,07	1650,25	0,1121	0,0049	1,0234	0,0189	1692,6817	1,3057	7,5429	0,0377	4,0996	1,0168	1,0159	0,3327	33	5
1731,29	1727,36	0,1132	0,0071	1,0336	0,0197	1770,2211	1,3035	7,5899	0,0393	4,2563	1,0187	1,0178	0,3704	34	6
1809,15	1805,14	0,1146	0,0096	1,0458	0,0203	1848,0098	1,3015	7,6339	0,0406	4,4048	1,0207	1,0197	0,4097	35	7
1886,87	1882,78	0,1161	0,0126	1,0597	0,0208	1925,2240	1,2996	7,6747	0,0415	4,5426	1,0227	1,0217	0,4503	36	8
1963,58	1959,43	0,1178	0,0159	1,0755	0,0210	2001,0071	1,2980	7,7122	0,0420	4,6675	1,0248	1,0238	0,4918	37	9
2038,43	2034,23	0,1198	0,0196	1,0932	0,0210	2074,4916	1,2965	7,7464	0,0421	4,7773	1,0270	1,0259	0,5338	38	10
2110,55	2106,31	0,1219	0,0237	1,1127	0,0209	2144,8251	1,2951	7,7773	0,0417	4,8701	1,0291	1,0280	0,5759	39	11
2179,10	2174,83	0,1242	0,0282	1,1339	0,0204	2211,1968	1,2939	7,8048	0,0409	4,9443	1,0312	1,0301	0,6176	40	12
2243,29	2239,01	0,1268	0,0331	1,1570	0,0198	2272,8640	1,2929	7,8292	0,0395	4,9987	1,0332	1,0322	0,6585	41	13
2302,43	2298,14	0,1295	0,0383	1,1819	0,0189	2329,1783	1,2920	7,8503	0,0378	5,0325	1,0352	1,0342	0,6980	42	14
2355,92	2351,63	0,1324	0,0439	1,2086	0,0178	2379,6076	1,2912	7,8685	0,0357	5,0455	1,0372	1,0362	0,7358	43	15
2403,29	2399,00	0,1355	0,0499	1,2370	0,0166	2423,7553	1,2905	7,8838	0,0332	5,0379	1,0390	1,0381	0,7715	44	16
2444,22	2439,94	0,1388	0,0563	1,2672	0,0152	2461,3727	1,2900	7,8964	0,0305	5,0101	1,0406	1,0398	0,8047	45	17
2478,53	2474,27	0,1423	0,0630	1,2992	0,0138	2492,3656	1,2896	7,9064	0,0276	4,9634	1,0422	1,0414	0,8352	46	18

2506,20	2501,97	0,1460	0,0701	1,3328	0,0123	2516,7936	1,2893	7,9142	0,0246	4,8991	1,0436	1,0429	0,8628	47	19
2527,38	2523,17	0,1499	0,0775	1,3682	0,0108	2534,8619	1,2890	7,9198	0,0215	4,8190	1,0448	1,0442	0,8874	48	20
2542,34	2538,16	0,1540	0,0853	1,4052	0,0093	2546,9063	1,2889	7,9235	0,0186	4,7251	1,0459	1,0454	0,9089	49	21
2551,47	2547,32	0,1582	0,0935	1,4440	0,0079	2553,3724	1,2888	7,9255	0,0157	4,6194	1,0468	1,0464	0,9275	50	22
2555,27	2551,16	0,1626	0,1020	1,4843	0,0065	2554,7906	1,2888	7,9260	0,0131	4,5043	1,0476	1,0472	0,9432	51	23
2554,31	2550,23	0,1672	0,1108	1,5263	0,0053	2551,7477	1,2888	7,9252	0,0107	4,3817	1,0483	1,0480	0,9563	52	24
2549,19	2545,14	0,1720	0,1200	1,5700	0,0043	2544,8584	1,2889	7,9233	0,0085	4,2539	1,0488	1,0486	0,9670	53	25
2540,53	2536,52	0,1770	0,1295	1,6152	0,0033	2534,7385	1,2890	7,9204	0,0067	4,1227	1,0493	1,0490	0,9755	54	26
2528,95	2524,98	0,1821	0,1394	1,6620	0,0026	2521,9803	1,2892	7,9168	0,0051	3,9899	1,0496	1,0494	0,9822	55	27
2515,01	2511,08	0,1874	0,1495	1,7103	0,0019	2507,1333	1,2893	7,9125	0,0038	3,8569	1,0499	1,0497	0,9873	56	28
2499,25	2495,36	0,1929	0,1600	1,7602	0,0014	2490,6901	1,2895	7,9077	0,0028	3,7250	1,0501	1,0500	0,9912	57	29
2482,13	2478,28	0,1985	0,1708	1,8115	0,0010	2473,0780	1,2898	7,9024	0,0020	3,5952	1,0502	1,0501	0,9940	58	30
2464,03	2460,22	0,2043	0,1820	1,8644	0,0007	2454,6557	1,2900	7,8969	0,0014	3,4682	1,0503	1,0502	0,9960	59	31
2445,28	2441,51	0,2102	0,1934	1,9186	0,0005	2435,7150	1,2902	7,8912	0,0010	3,3448	1,0504	1,0503	0,9974	60	32
2426,148	2422,41	0,2163	0,2051	1,9743	0,0003	2416,4864	1,2905	7,8852	0,0006	3,2252	1,0504	1,0504	0,9984	61	33
2406,83	2403,13	0,2226	0,2171	2,0314	0,0002	2397,1461	1,2907	7,8792	0,0004	3,1097	1,0504	1,0504	0,9990	62	34

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Таблица Б1 - расчетные значения перемещения, скорости и ускорения поршня при $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$ с шагом в 10 градусов ПКВ

$S_x, \text{ мм}$	$V_x, \text{ м/с}$	$W_x, \text{ м/с}^2$	$W_{x2}, \text{ м/с}^2$	$W_{x1}, \text{ м/с}^2$	$j_{кв}, \text{ рад}$	$j_{кв}, \text{ град}$
0,000	-0,230	12587,94	3491,4184	16731,6	0	0
0,620	3,933	12268,24	3280,8601	16319,9	0,1745	10
2,600	7,894	11333,69	2674,5816	15116,3	0,3491	20
5,838	11,456	9857,42	1745,7092	13212	0,5236	30
10,174	14,457	7952,85	606,27844	10748,8	0,6981	40
15,400	16,776	5761,95	-606,2784	7904,35	0,8727	50
21,275	18,344	3440,76	-1745,709	4874,38	1,0472	60
27,543	19,141	1143,92	-2674,582	1853,83	1,2217	70
33,953	19,198	-990,23	-3280,86	-981,726	1,3963	80
40,268	18,588	-2852,10	-3491,418	-3491,42	1,5708	90
46,282	17,413	-4369,57	-3280,86	-5579,99	1,7453	100
51,827	15,793	-5512,05	-2674,582	-7202,99	1,9199	110
56,775	13,851	-6289,56	-1745,709	-8365,8	2,0944	120
61,038	11,702	-6747,01	-606,2784	-9116,9	2,2689	130
64,563	9,439	-6954,57	606,27844	-9536,29	2,4435	140
67,326	7,132	-6995,40	1745,7092	-9720,63	2,618	150
69,318	4,821	-6952,33	2674,5816	-9767,12	2,7925	160
70,541	2,522	-6895,21	3280,8601	-9758,18	2,9671	170
71,000	0,230	-6870,50	3491,4184	-9748,77	3,1416	180
70,694	-2,068	-6894,48	3280,8601	-9758,18	3,3161	190
69,619	-4,388	-6950,87	2674,5816	-9767,12	3,4907	200
67,766	-6,733	-6993,20	1745,7092	-9720,63	3,6652	210
65,129	-9,086	-6951,63	606,27844	-9536,29	3,8397	220
61,712	-11,406	-6743,34	-606,2784	-9116,9	4,0143	230
57,537	-13,621	-6285,16	-1745,709	-8365,8	4,1888	240
52,654	-15,635	-5506,91	-2674,582	-7202,99	4,3633	250
47,149	-17,333	-4363,70	-3280,86	-5579,99	4,5379	260
41,148	-18,588	-2845,50	-3491,418	-3491,42	4,7124	270
34,820	-19,278	-982,89	-3280,86	-981,726	4,8869	280
28,370	-19,298	1151,99	-2674,582	1853,83	5,0615	290
22,037	-18,574	3449,57	-1745,709	4874,38	5,236	300
16,074	-17,072	5771,49	-606,2784	7904,35	5,4105	310
10,740	-14,810	7963,13	606,27844	10748,8	5,5851	320
6,278	-11,855	9868,43	1745,7092	13212	5,7596	330
2,901	-8,327	11345,43	2674,5816	15116,3	5,9341	340
0,773	-4,387	12280,71	3280,8601	16319,9	6,1087	350
0,000	-0,230	12601,14	3491,4184	16731,6	6,2832	360
0,620	3,933	12281,45	3280,8601	16319,9	6,4577	370
2,600	7,894	11346,89	2674,5816	15116,3	6,6323	380
5,838	11,456	9870,62	1745,7092	13212	6,8068	390
10,174	14,457	7966,05	606,27844	10748,8	6,9813	400
15,400	16,776	5775,14	-606,2784	7904,35	7,1558	410
21,275	18,344	3453,95	-1745,709	4874,38	7,3304	420
27,543	19,141	1157,11	-2674,582	1853,83	7,5049	430
33,953	19,198	-977,05	-3280,86	-981,726	7,6794	440
40,268	18,588	-2838,92	-3491,418	-3491,42	7,854	450
46,282	17,413	-4356,39	-3280,86	-5579,99	8,0285	460
51,827	15,793	-5498,88	-2674,582	-7202,99	8,203	470

Продолжение таблицы Б1

56,775	13,851	-6276,39	-1745,709	-8365,8	8,3776	480
61,038	11,702	-6733,84	-606,2784	-9116,9	8,5521	490
64,563	9,439	-6941,41	606,27844	-9536,29	8,7266	500
67,326	7,132	-6982,24	1745,7092	-9720,63	8,9012	510
69,318	4,821	-6939,18	2674,5816	-9767,12	9,0757	520
70,541	2,522	-6882,06	3280,8601	-9758,18	9,2502	530
71,000	0,230	-6857,36	3491,4184	-9748,77	9,4248	540
70,694	-2,068	-6881,34	3280,8601	-9758,18	9,5993	550
69,619	-4,388	-6937,73	2674,5816	-9767,12	9,7738	560
67,766	-6,733	-6980,07	1745,7092	-9720,63	9,9484	570
65,129	-9,086	-6938,51	606,27844	-9536,29	10,123	580
61,712	-11,406	-6730,22	-606,2784	-9116,9	10,297	590
57,537	-13,621	-6272,04	-1745,709	-8365,8	10,472	600
52,654	-15,635	-5493,80	-2674,582	-7202,99	10,647	610
47,149	-17,333	-4350,59	-3280,86	-5579,99	10,821	620
41,148	-18,588	-2832,40	-3491,418	-3491,42	10,996	630
34,820	-19,278	-969,80	-3280,86	-981,726	11,17	640
28,370	-19,298	1165,08	-2674,582	1853,83	11,345	650
22,037	-18,574	3462,65	-1745,709	4874,38	11,519	660
16,074	-17,072	5784,56	-606,2784	7904,35	11,694	670
10,740	-14,810	7976,20	606,27844	10748,8	11,868	680
6,278	-11,855	9881,49	1745,7092	13212	12,043	690
2,901	-8,327	11358,49	2674,5816	15116,3	12,217	700
0,773	-4,387	12293,77	3280,8601	16319,9	12,392	710
0,000	-0,230	12614,19	3491,4184	16731,6	12,566	720

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)

Таблица В1 - Сводная таблица динамического расчета двигателя с шагом в 10 градусов ПКВ

Δp_T , МПа	W , м/с ²	p_j , МПа	p , МПа	$\text{tg}\beta$	p_N , МПа	$1/\cos\beta$	p_s , МПа	$\cos(\beta+\varphi)/\cos\beta$	p_k , МПа	$\sin(\beta+\varphi)/\cos\beta$	p_T , МПа	T , кН	$M_{кр.цз}$, Нм
0,005	15790,308	-1,741	-1,736	0,000	0,000	1,000	-1,736	1,000	-1,736	0,000	0,000	0,000	0,000
0,002	15389,285	-1,697	-1,695	0,051	-0,086	1,001	-1,697	0,976	-1,654	0,224	-0,379	-2,004	-71,137
-0,001	14216,981	-1,567	-1,569	0,101	-0,158	1,005	-1,577	0,905	-1,420	0,437	-0,685	-3,618	-128,445
-0,004	12365,152	-1,363	-1,367	0,148	-0,203	1,011	-1,382	0,792	-1,083	0,628	-0,859	-4,538	-161,092
-0,007	9976,061	-1,100	-1,107	0,192	-0,213	1,018	-1,127	0,643	-0,711	0,790	-0,874	-4,617	-163,905
-0,010	7227,788	-0,797	-0,807	0,231	-0,186	1,026	-0,828	0,466	-0,376	0,914	-0,738	-3,895	-138,283
-0,013	4316,093	-0,476	-0,489	0,263	-0,128	1,033	-0,505	0,272	-0,133	0,997	-0,487	-2,574	-91,383
-0,018	1434,935	-0,158	-0,176	0,287	-0,050	1,040	-0,183	0,072	-0,013	1,037	-0,182	-0,963	-34,197
-0,018	-1242,148	0,137	0,119	0,302	0,036	1,044	0,124	-0,123	-0,015	1,036	0,124	0,653	23,166
-0,018	-3577,678	0,394	0,377	0,307	0,116	1,045	0,394	-0,307	-0,116	0,999	0,376	1,988	70,558
-0,018	-5481,188	0,604	0,587	0,302	0,177	1,044	0,612	-0,470	-0,276	0,932	0,546	2,886	102,442
-0,018	-6914,315	0,762	0,745	0,287	0,213	1,040	0,774	-0,611	-0,455	0,841	0,626	3,307	117,391
-0,018	-7889,623	0,870	0,852	0,263	0,224	1,033	0,881	-0,727	-0,620	0,734	0,626	3,304	117,302
-0,018	-8463,447	0,933	0,915	0,231	0,211	1,026	0,939	-0,819	-0,750	0,618	0,565	2,985	105,985
-0,018	-8723,809	0,962	0,944	0,192	0,181	1,018	0,961	-0,889	-0,840	0,496	0,468	2,471	87,719
-0,018	-8775,028	0,967	0,950	0,148	0,141	1,011	0,960	-0,940	-0,893	0,372	0,353	1,864	66,156
-0,018	-8721,008	0,961	0,944	0,101	0,095	1,005	0,949	-0,974	-0,919	0,247	0,233	1,232	43,747
-0,016	-8649,357	0,954	0,938	0,051	0,048	1,001	0,939	-0,994	-0,932	0,123	0,116	0,611	21,699
-0,014	-8618,360	0,950	0,936	0,000	0,000	1,000	0,936	-1,000	-0,936	0,000	0,000	0,000	0,000
-0,012	-8648,436	0,953	0,942	-0,051	-0,048	1,001	0,943	-0,994	-0,936	-0,123	-0,116	-0,614	-21,790
-0,009	-8719,166	0,961	0,952	-0,101	-0,096	1,005	0,957	-0,974	-0,928	-0,247	-0,235	-1,243	-44,132
-0,007	-8772,267	0,967	0,960	-0,148	-0,142	1,011	0,971	-0,940	-0,903	-0,372	-0,357	-1,885	-66,901
-0,004	-8720,127	0,961	0,957	-0,192	-0,184	1,018	0,975	-0,889	-0,851	-0,496	-0,474	-2,505	-88,936
-0,002	-8458,843	0,933	0,931	-0,231	-0,215	1,026	0,955	-0,819	-0,763	-0,618	-0,575	-3,037	-107,797
0,007	-7884,100	0,869	0,877	-0,263	-0,230	1,033	0,906	-0,727	-0,637	-0,734	-0,644	-3,399	-120,665
0,020	-6907,871	0,762	0,781	-0,287	-0,224	1,040	0,812	-0,611	-0,477	-0,841	-0,657	-3,469	-123,160
0,037	-5473,823	0,603	0,640	-0,302	-0,193	1,044	0,668	-0,470	-0,301	-0,932	-0,596	-3,149	-111,782
0,060	-3569,394	0,394	0,454	-0,307	-0,139	1,045	0,474	-0,307	-0,139	-0,999	-0,454	-2,395	-85,027

Продолжение таблицы В1

0,095	-1232,943	0,136	0,231	-0,302	-0,070	1,044	0,241	-0,123	-0,028	-1,036	-0,239	-1,262	-44,798
0,145	1445,060	-0,159	-0,014	-0,287	0,004	1,040	-0,015	0,072	-0,001	-1,037	0,015	0,079	2,809
0,221	4327,139	-0,477	-0,256	-0,263	0,067	1,033	-0,265	0,272	-0,070	-0,997	0,256	1,350	47,910
0,339	7239,753	-0,798	-0,460	-0,231	0,106	1,026	-0,471	0,466	-0,214	-0,914	0,420	2,218	78,749
0,526	9988,946	-1,101	-0,575	-0,192	0,110	1,018	-0,586	0,643	-0,370	-0,790	0,454	2,399	85,174
0,823	12378,957	-1,365	-0,542	-0,148	0,080	1,011	-0,548	0,792	-0,429	-0,628	0,341	1,799	63,869
1,162	14231,705	-1,569	-0,407	-0,101	0,041	1,005	-0,409	0,905	-0,368	-0,437	0,178	0,939	33,331
1,971	15404,929	-1,698	0,272	-0,051	-0,014	1,001	0,273	0,976	0,266	-0,224	-0,061	-0,322	-11,425
4,210	15806,872	-1,743	2,467	0,000	0,000	1,000	2,467	1,000	2,467	0,000	0,000	0,000	0,000
6,837	15405,845	-1,698	5,138	0,051	0,262	1,001	5,145	0,976	5,015	0,224	1,150	6,075	215,666
6,628	14233,538	-1,569	5,059	0,101	0,510	1,005	5,085	0,905	4,579	0,437	2,210	11,669	414,267
4,789	12381,706	-1,365	3,424	0,148	0,508	1,011	3,461	0,792	2,711	0,628	2,152	11,362	403,360
3,168	9992,612	-1,102	2,066	0,192	0,397	1,018	2,103	0,643	1,327	0,790	1,632	8,617	305,890
2,309	7244,336	-0,799	1,510	0,231	0,348	1,026	1,549	0,466	0,704	0,914	1,380	7,289	258,754
1,742	4332,637	-0,478	1,264	0,263	0,332	1,033	1,306	0,272	0,344	0,997	1,260	6,655	236,238
1,362	1451,475	-0,160	1,202	0,287	0,344	1,040	1,249	0,072	0,087	1,037	1,246	6,580	233,588
1,101	-1225,612	0,135	1,236	0,302	0,373	1,044	1,290	-0,123	-0,153	1,036	1,281	6,762	240,065
0,917	-3561,146	0,393	1,310	0,307	0,402	1,045	1,369	-0,307	-0,402	0,999	1,309	6,911	245,347
0,786	-5464,659	0,602	1,389	0,302	0,419	1,044	1,449	-0,470	-0,653	0,932	1,294	6,831	242,512
0,691	-6897,791	0,760	1,451	0,287	0,416	1,040	1,509	-0,611	-0,887	0,841	1,220	6,445	228,804
0,621	-7873,104	0,868	1,489	0,263	0,391	1,033	1,538	-0,727	-1,083	0,734	1,093	5,773	204,946
0,569	-8446,932	0,931	1,501	0,231	0,346	1,026	1,540	-0,819	-1,229	0,618	0,927	4,894	173,744
0,532	-8707,299	0,960	1,492	0,192	0,286	1,018	1,519	-0,889	-1,327	0,496	0,739	3,905	138,611
0,432	-8758,524	0,966	1,397	0,148	0,207	1,011	1,413	-0,940	-1,314	0,372	0,519	2,742	97,343
0,332	-8704,508	0,960	1,292	0,101	0,130	1,005	1,298	-0,974	-1,258	0,247	0,319	1,686	59,865
0,232	-8632,862	0,952	1,184	0,051	0,060	1,001	1,185	-0,994	-1,176	0,123	0,146	0,771	27,385
0,132	-8601,871	0,948	1,080	0,000	0,000	1,000	1,080	-1,000	-1,080	0,000	0,000	0,000	0,000
0,032	-8631,953	0,952	0,984	-0,051	-0,050	1,001	0,985	-0,994	-0,977	-0,123	-0,121	-0,641	-22,755
0,022	-8702,689	0,959	0,981	-0,101	-0,099	1,005	0,986	-0,974	-0,956	-0,247	-0,243	-1,281	-45,487
0,020	-8755,795	0,965	0,985	-0,148	-0,146	1,011	0,996	-0,940	-0,926	-0,372	-0,366	-1,933	-68,624
0,019	-8703,661	0,960	0,978	-0,192	-0,188	1,018	0,996	-0,889	-0,870	-0,496	-0,485	-2,561	-90,909
0,018	-8442,384	0,931	0,949	-0,231	-0,219	1,026	0,973	-0,819	-0,777	-0,618	-0,586	-3,094	-109,833

Продолжение таблицы В1

0,017	-7867,647	0,867	0,884	-0,263	-0,232	1,033	0,914	-0,727	-0,643	-0,734	-0,649	-3,429	-121,725
0,016	-6891,424	0,760	0,776	-0,287	-0,222	1,040	0,806	-0,611	-0,474	-0,841	-0,652	-3,445	-122,283
0,015	-5457,383	0,602	0,617	-0,302	-0,186	1,044	0,643	-0,470	-0,290	-0,932	-0,574	-3,033	-107,669
0,014	-3552,961	0,392	0,406	-0,307	-0,124	1,045	0,424	-0,307	-0,124	-0,999	-0,405	-2,140	-75,957
0,013	-1216,517	0,134	0,147	-0,302	-0,044	1,044	0,153	-0,123	-0,018	-1,036	-0,152	-0,804	-28,553
0,012	1461,479	-0,161	-0,149	-0,287	0,043	1,040	-0,155	0,072	-0,011	-1,037	0,155	0,817	29,020
0,011	4343,550	-0,479	-0,468	-0,263	0,123	1,033	-0,484	0,272	-0,127	-0,997	0,467	2,464	87,464
0,010	7256,157	-0,800	-0,790	-0,231	0,182	1,026	-0,811	0,466	-0,368	-0,914	0,722	3,814	135,391
0,009	10005,343	-1,103	-1,094	-0,192	0,210	1,018	-1,114	0,643	-0,703	-0,790	0,864	4,564	162,014
0,008	12395,345	-1,367	-1,359	-0,148	0,201	1,011	-1,374	0,792	-1,076	-0,628	0,854	4,509	160,070
0,007	14248,086	-1,571	-1,564	-0,101	0,158	1,005	-1,572	0,905	-1,416	-0,437	0,683	3,608	128,071
0,006	15421,302	-1,700	-1,694	-0,051	0,086	1,001	-1,697	0,976	-1,654	-0,224	0,379	2,003	71,117
0,005	15823,237	-1,745	-1,740	0,000	0,000	1,000	-1,740	1,000	-1,740	0,000	0,000	0,000	0,000

Таблица В2 - Таблица крутящего момента двигателя с шагом в 10 градусов ПКВ

1-й		2-й		3-й		4-й		М _{кр.} , Нм
М _{кр.ц} , Нм	φ° кривош	М _{кр.ц} , Нм	φ° кривош	М _{кр.ц} , Нм	φ° кривош	М _{кр.ц} , Нм	φ° кривош	
0,000	0,0	0,000	180,0	0,000	360,0	-22,755	540,0	-22,755
-71,137	10,0	-21,790	190,0	215,666	370,0	-12,755	550,0	109,984
-128,445	20,0	-44,132	200,0	414,267	380,0	-2,755	560,0	238,935
-161,092	30,0	-66,901	210,0	403,360	390,0	7,245	570,0	182,613
-163,905	40,0	-88,936	220,0	305,890	400,0	17,245	580,0	70,294
-138,283	50,0	-107,797	230,0	258,754	410,0	27,245	590,0	39,919
-91,383	60,0	-120,665	240,0	236,238	420,0	37,245	600,0	61,434
-34,197	70,0	-123,160	250,0	233,588	430,0	47,245	610,0	123,476
23,166	80,0	-111,782	260,0	240,065	440,0	57,245	620,0	208,694
70,558	90,0	-85,027	270,0	245,347	450,0	67,245	630,0	298,123
102,442	100,0	-44,798	280,0	242,512	460,0	77,245	640,0	377,401
117,391	110,0	2,809	290,0	228,804	470,0	87,245	650,0	436,248
117,302	120,0	47,910	300,0	204,946	480,0	97,245	660,0	467,402
105,985	130,0	78,749	310,0	173,744	490,0	107,245	670,0	465,723

Продолжение таблицы В2

87,719	140,0	85,174	320,0	138,611	500,0	117,245	680,0	428,748
66,156	150,0	63,869	330,0	97,343	510,0	127,245	690,0	354,612
43,747	160,0	33,331	340,0	59,865	520,0	137,245	700,0	274,188
21,699	170,0	-11,425	350,0	27,385	530,0	147,245	710,0	184,904
0,000	180,0	0,000	360,0	0,000	540,0	157,245	720,0	157,245

Таблица В3 - Таблица сил, действующих на шатунную шейку КВ с шагом в 10 градусов ПКВ

Т	К	P _к	R _{ш.ш.}	K _{ок}	R _к
0	-9,16796	-14,9614	14,9614	-25,8583	25,85829
-2,003847	-8,73505	-14,5285	14,6661	-25,4254	25,50422
-3,618165	-7,49821	-13,2917	13,7754	-24,1885	24,45765
-4,53779	-5,718	-11,5115	12,3736	-22,4083	22,86318
-4,617037	-3,75614	-9,54963	10,6072	-20,4465	20,96128
-3,895284	-1,98577	-7,77925	8,7000	-18,6761	19,07799
-2,574176	-0,70329	-6,49678	6,9882	-17,3936	17,58307
-0,963283	-0,0673	-5,86079	5,9394	-16,7576	16,7853
0,652561	-0,07774	-5,87123	5,9074	-16,7681	16,78077
1,987548	-0,60997	-6,40345	6,7048	-17,3003	17,41409
2,885687	-1,45728	-7,25077	7,8039	-18,1476	18,37561
3,306791	-2,40283	-8,19632	8,8382	-19,0932	19,3774
3,304271	-3,27204	-9,06553	9,6489	-19,9624	20,23399
2,9855	-3,96018	-9,75367	10,2004	-20,6505	20,86521
2,470966	-4,43404	-10,2275	10,5218	-21,1244	21,2684
1,863541	-4,71528	-10,5088	10,6727	-21,4056	21,48657
1,232311	-4,85544	-10,6489	10,7200	-21,5458	21,58099
0,611253	-4,92163	-10,7151	10,7325	-21,612	21,62061
6,06E-16	-4,94552	-10,739	10,7390	-21,6359	21,63585
-0,613794	-4,94209	-10,7356	10,7531	-21,6324	21,64113
-1,243145	-4,89813	-10,6916	10,7636	-21,5885	21,62422
-1,884527	-4,76838	-10,5619	10,7287	-21,4587	21,5413
-2,505236	-4,49554	-10,289	10,5896	-21,1859	21,33348
-3,036542	-4,02789	-9,82137	10,2801	-20,7182	20,93956

Продолжение таблицы В3

-3,399021	-3,36587	-9,15935	9,7697	-20,0562	20,34218
-3,46929	-2,5209	-8,31439	9,0092	-19,2112	19,52198
-3,148789	-1,59015	-7,38364	8,0270	-18,2805	18,54969
-2,395124	-0,73505	-6,52854	6,9540	-17,4254	17,58922
-1,261914	-0,15034	-5,94383	6,0763	-16,8407	16,88788
0,079115	-0,00553	-5,79902	5,7996	-16,6959	16,69605
1,349578	-0,36872	-6,16221	6,3083	-17,059	17,11235
2,218289	-1,13086	-6,92434	7,2710	-17,8212	17,95872
2,399255	-1,95189	-7,74538	8,1085	-18,6422	18,79598
1,799115	-2,26704	-8,06053	8,2589	-18,9574	19,04255
0,938905	-1,94577	-7,73926	7,7960	-18,6361	18,65974
-0,321822	1,402866	-4,39062	4,4024	-15,2875	15,29085
-3,19E-15	13,03005	7,236561	7,2366	-3,66028	3,660282
6,07509	26,48217	20,68868	21,5622	9,791835	11,52331
11,6695	24,18364	18,39015	21,7801	7,493306	13,86819
11,36226	14,31742	8,523929	14,2042	-2,37291	11,60739
8,616625	7,00996	1,216472	8,7021	-9,68037	12,95978
7,28884	3,715757	-2,07773	7,5792	-12,9746	14,88176
6,654585	1,818094	-3,97539	7,7516	-14,8722	16,29316
6,579934	0,459718	-5,33377	8,4702	-16,2306	17,51366
6,7624	-0,80565	-6,59914	9,4487	-17,496	18,75738
6,911195	-2,121	-7,91449	10,5073	-18,8113	20,04073
6,831337	-3,44986	-9,24334	11,4938	-20,1402	21,26721
6,445181	-4,68329	-10,4768	12,3005	-21,3736	22,32425
5,773131	-5,71682	-11,5103	12,8770	-22,4071	23,13891
4,894189	-6,492	-12,2855	13,2245	-23,1823	23,69332
3,904532	-7,00651	-12,8	13,3823	-23,6968	24,01636
2,742059	-6,93817	-12,7317	13,0236	-23,6285	23,78708
1,68635	-6,6444	-12,4379	12,5517	-23,3347	23,39559
0,771406	-6,21114	-12,0046	12,0294	-22,9015	22,91446
2,1E-15	-5,70459	-11,4981	11,4981	-22,3949	22,39492
-0,640995	-5,1611	-10,9546	10,9733	-21,8514	21,86083

Продолжение таблицы В3

-1,28132	-5,04854	-10,842	10,9175	-21,7389	21,7766
-1,933066	-4,89119	-10,6847	10,8581	-21,5815	21,66793
-2,560823	-4,59528	-10,3888	10,6997	-21,2856	21,43911
-3,093883	-4,10395	-9,89743	10,3697	-20,7943	21,02318
-3,428863	-3,39542	-9,1889	9,8078	-20,0857	20,37632
-3,444596	-2,50296	-8,29645	8,9831	-19,1933	19,49994
-3,032919	-1,53164	-7,32513	7,9282	-18,222	18,47265
-2,139638	-0,65664	-6,45013	6,7958	-17,347	17,47843
-0,804298	-0,09582	-5,88931	5,9440	-16,7862	16,80541
0,817465	-0,05711	-5,8506	5,9074	-16,7474	16,76738
2,46377	-0,67312	-6,46661	6,9201	-17,3635	17,53738
3,813844	-1,94425	-7,73774	8,6266	-18,6346	19,02086
4,563769	-3,7128	-9,50629	10,5450	-20,4031	20,90732
4,509014	-5,68175	-11,4752	12,3293	-22,3721	22,82194
3,607622	-7,47636	-13,2699	13,7515	-24,1667	24,43449
2,003291	-8,73263	-14,5261	14,6636	-25,423	25,50176
4,5E-15	-9,18713	-14,9806	14,9806	-25,8775	25,87746

Таблица В4 - Таблица сил, действующие на коренные шейки с шагом в 10 градусов ПКВ

1-я кор.ш.	1-й кривошип				2-я коренная шейка			2-й кривошип			3-я коренная шейка			3-й кривошип		
$R_{к.ш1}, кН$	φ°_1	$R_{к.1}, кН$	$T_1, кН$	$K_{рк1}, кН$	$T_{к2}, кН$	$K_{к2}, кН$	$R_{к.ш2}, кН$	φ°_2	$T_2, кН$	$K_{рк2}, кН$	$T_{к3}, кН$	$K_{к3}, кН$	$R_{к.ш3}, кН$	φ°_3	$T_3, кН$	$K_{рк3}, кН$
12,929	0	25,858	0,000	-25,858	0,000	2,111	2,111	180	0,000	-21,636	-0,320	-21,744	21,746	540	-0,641	-21,851
12,752	10	25,504	-2,004	-25,425	0,695	1,896	2,020	190	-0,614	-21,632	-0,948	-21,686	21,706	550	-1,281	-21,739
12,229	20	24,458	-3,618	-24,189	1,188	1,300	1,761	200	-1,243	-21,588	-1,588	-21,585	21,643	560	-1,933	-21,582
11,432	30	22,863	-4,538	-22,408	1,327	0,475	1,409	210	-1,885	-21,459	-2,223	-21,372	21,487	570	-2,561	-21,286
10,481	40	20,961	-4,617	-20,446	1,056	-0,370	1,119	220	-2,505	-21,186	-2,800	-20,990	21,176	580	-3,094	-20,794
9,539	50	19,078	-3,895	-18,676	0,429	-1,021	1,108	230	-3,037	-20,718	-3,233	-20,402	20,657	590	-3,429	-20,086
8,792	60	17,583	-2,574	-17,394	-0,412	-1,331	1,394	240	-3,399	-20,056	-3,422	-19,625	19,921	600	-3,445	-19,193
8,393	70	16,785	-0,963	-16,758	-1,253	-1,227	1,754	250	-3,469	-19,211	-3,251	-18,717	18,997	610	-3,033	-18,222
8,390	80	16,781	0,653	-16,768	-1,901	-0,756	2,046	260	-3,149	-18,280	-2,644	-17,814	18,009	620	-2,140	-17,347
8,707	90	17,414	1,988	-17,300	-2,191	-0,063	2,192	270	-2,395	-17,425	-1,600	-17,106	17,180	630	-0,804	-16,786

Продолжение таблицы В4

9,188	100	18,376	2,886	-18,148	-2,074	0,653	2,174	280	-1,262	-16,841	-0,222	-16,794	16,796	640	0,817	-16,747
9,689	110	19,377	3,307	-19,093	-1,614	1,199	2,010	290	0,079	-16,696	1,271	-17,030	17,077	650	2,464	-17,363
10,117	120	20,234	3,304	-19,962	-0,977	1,452	1,750	300	1,350	-17,059	2,582	-17,847	18,033	660	3,814	-18,635
10,433	130	20,865	2,985	-20,651	-0,384	1,415	1,466	310	2,218	-17,821	3,391	-19,112	19,411	670	4,564	-20,403
10,634	140	21,268	2,471	-21,124	-0,036	1,241	1,242	320	2,399	-18,642	3,454	-20,507	20,796	680	4,509	-22,372
10,743	150	21,487	1,864	-21,406	-0,032	1,224	1,225	330	1,799	-18,957	2,703	-21,562	21,731	690	3,608	-24,167
10,790	160	21,581	1,232	-21,546	-0,147	1,455	1,462	340	0,939	-18,636	1,471	-22,030	22,079	700	2,003	-25,423
10,810	170	21,621	0,611	-21,612	-0,467	3,162	3,196	350	-0,322	-15,287	-0,161	-20,582	20,583	710	0,000	-25,877
10,818	180	21,636	0,000	-21,636	0,000	8,988	8,988	360	0,000	-3,660	0,000	-10,175	10,175	720	0,000	-16,690
10,821	190	21,641	-0,614	-21,632	6,142	14,563	15,805	370	11,669	7,493	4,833	-8,966	10,186	10	-2,004	-25,425
10,812	200	21,624	-1,243	-21,588	6,303	9,608	11,491	380	11,362	-2,373	3,872	-13,281	13,834	20	-3,618	-24,189
10,771	210	21,541	-1,885	-21,459	5,251	5,889	7,890	390	8,617	-9,680	2,039	-16,044	16,173	30	-4,538	-22,408
10,667	220	21,333	-2,505	-21,186	4,897	4,106	6,390	400	7,289	-12,975	1,336	-16,711	16,764	40	-4,617	-20,446
10,470	230	20,940	-3,037	-20,718	4,846	2,923	5,659	410	6,655	-14,872	1,380	-16,774	16,831	50	-3,895	-18,676
10,171	240	20,342	-3,399	-20,056	4,989	1,913	5,344	420	6,580	-16,231	2,003	-16,812	16,931	60	-2,574	-17,394
9,761	250	19,522	-3,469	-19,211	5,116	0,858	5,187	430	6,762	-17,496	2,900	-17,127	17,371	70	-0,963	-16,758
9,275	260	18,550	-3,149	-18,280	5,030	-0,265	5,037	440	6,911	-18,811	3,782	-17,790	18,187	80	0,653	-16,768
8,795	270	17,589	-2,395	-17,425	4,613	-1,357	4,809	450	6,831	-20,140	4,409	-18,720	19,233	90	1,988	-17,300
8,444	280	16,888	-1,262	-16,841	3,854	-2,266	4,471	460	6,445	-21,374	4,665	-19,761	20,304	100	2,886	-18,148
8,348	290	16,696	0,079	-16,696	2,847	-2,856	4,032	470	5,773	-22,407	4,540	-20,750	21,241	110	3,307	-19,093
8,556	300	17,112	1,350	-17,059	1,772	-3,062	3,538	480	4,894	-23,182	4,099	-21,572	21,958	120	3,304	-19,962
8,979	310	17,959	2,218	-17,821	0,843	-2,938	3,056	490	3,905	-23,697	3,445	-22,174	22,440	130	2,985	-20,651
9,398	320	18,796	2,399	-18,642	0,171	-2,493	2,499	500	2,742	-23,629	2,607	-22,376	22,528	140	2,471	-21,124
9,521	330	19,043	1,799	-18,957	-0,056	-2,189	2,189	510	1,686	-23,335	1,775	-22,370	22,440	150	1,864	-21,406
9,330	340	18,660	0,939	-18,636	-0,084	-2,133	2,134	520	0,771	-22,901	1,002	-22,224	22,246	160	1,232	-21,546
7,645	350	15,291	-0,322	-15,287	0,161	-3,554	3,557	530	0,000	-22,395	0,306	-22,003	22,006	170	0,611	-21,612
1,830	360	3,660	0,000	-3,660	-0,320	-9,096	9,101	540	-0,641	-21,851	-0,320	-21,744	21,746	180	0,000	-21,636
6,934	370	13,868	11,669	7,493	-6,475	-14,616	15,986	550	-1,281	-21,739	-0,948	-21,686	21,706	190	-0,614	-21,632
5,804	380	11,607	11,362	-2,373	-6,648	-9,604	11,680	560	-1,933	-21,582	-1,588	-21,585	21,643	200	-1,243	-21,588
6,480	390	12,960	8,617	-9,680	-5,589	-5,803	8,056	570	-2,561	-21,286	-2,223	-21,372	21,487	210	-1,885	-21,459
7,441	400	14,882	7,289	-12,975	-5,191	-3,910	6,499	580	-3,094	-20,794	-2,800	-20,990	21,176	220	-2,505	-21,186
8,147	410	16,293	6,655	-14,872	-5,042	-2,607	5,676	590	-3,429	-20,086	-3,233	-20,402	20,657	230	-3,037	-20,718

Продолжение таблицы В4

8,757	420	17,514	6,580	-16,231	-5,012	-1,481	5,227	600	-3,445	-19,193	-3,422	-19,625	19,921	240	-3,399	-20,056
9,379	430	18,757	6,762	-17,496	-4,898	-0,363	4,911	610	-3,033	-18,222	-3,251	-18,717	18,997	250	-3,469	-19,211
10,020	440	20,041	6,911	-18,811	-4,525	0,732	4,584	620	-2,140	-17,347	-2,644	-17,814	18,009	260	-3,149	-18,280
10,634	450	21,267	6,831	-20,140	-3,818	1,677	4,170	630	-0,804	-16,786	-1,600	-17,106	17,180	270	-2,395	-17,425
11,162	460	22,324	6,445	-21,374	-2,814	2,313	3,643	640	0,817	-16,747	-0,222	-16,794	16,796	280	-1,262	-16,841
11,569	470	23,139	5,773	-22,407	-1,655	2,522	3,016	650	2,464	-17,363	1,271	-17,030	17,077	290	0,079	-16,696
11,847	480	23,693	4,894	-23,182	-0,540	2,274	2,337	660	3,814	-18,635	2,582	-17,847	18,033	300	1,350	-17,059
12,008	490	24,016	3,905	-23,697	0,330	1,647	1,680	670	4,564	-20,403	3,391	-19,112	19,411	310	2,218	-17,821
11,894	500	23,787	2,742	-23,629	0,883	0,628	1,084	680	4,509	-22,372	3,454	-20,507	20,796	320	2,399	-18,642
11,698	510	23,396	1,686	-23,335	0,961	-0,416	1,047	690	3,608	-24,167	2,703	-21,562	21,731	330	1,799	-18,957
11,457	520	22,914	0,771	-22,901	0,616	-1,261	1,403	700	2,003	-25,423	1,471	-22,030	22,079	340	0,939	-18,636
11,197	530	22,395	0,000	-22,395	0,000	-1,741	1,741	710	0,000	-25,877	-0,161	-20,582	20,583	350	-0,322	-15,287
10,930	540	21,861	-0,641	-21,851	0,320	2,581	2,600	720	0,000	-16,690	0,000	-10,175	10,175	360	0,000	-3,660
10,888	550	21,777	-1,281	-21,739	-0,361	-1,843	1,878	10	-2,004	-25,425	4,833	-8,966	10,186	370	11,669	7,493
10,834	560	21,668	-1,933	-21,582	-0,843	-1,304	1,552	20	-3,618	-24,189	3,872	-13,281	13,834	380	11,362	-2,373
10,720	570	21,439	-2,561	-21,286	-0,988	-0,561	1,137	30	-4,538	-22,408	2,039	-16,044	16,173	390	8,617	-9,680
10,512	580	21,023	-3,094	-20,794	-0,762	0,174	0,781	40	-4,617	-20,446	1,336	-16,711	16,764	400	7,289	-12,975
10,188	590	20,376	-3,429	-20,086	-0,233	0,705	0,742	50	-3,895	-18,676	1,380	-16,774	16,831	410	6,655	-14,872
9,750	600	19,500	-3,445	-19,193	0,435	0,900	1,000	60	-2,574	-17,394	2,003	-16,812	16,931	420	6,580	-16,231
9,236	610	18,473	-3,033	-18,222	1,035	0,732	1,268	70	-0,963	-16,758	2,900	-17,127	17,371	430	6,762	-17,496
8,739	620	17,478	-2,140	-17,347	1,396	0,289	1,426	80	0,653	-16,768	3,782	-17,790	18,187	440	6,911	-18,811
8,403	630	16,805	-0,804	-16,786	1,396	-0,257	1,419	90	1,988	-17,300	4,409	-18,720	19,233	450	6,831	-20,140
8,384	640	16,767	0,817	-16,747	1,034	-0,700	1,249	100	2,886	-18,148	4,665	-19,761	20,304	460	6,445	-21,374
8,769	650	17,537	2,464	-17,363	0,422	-0,865	0,962	110	3,307	-19,093	4,540	-20,750	21,241	470	5,773	-22,407
9,510	660	19,021	3,814	-18,635	-0,255	-0,664	0,711	120	3,304	-19,962	4,099	-21,572	21,958	480	4,894	-23,182
10,454	670	20,907	4,564	-20,403	-0,789	-0,124	0,799	130	2,985	-20,651	3,445	-22,174	22,440	490	3,905	-23,697
11,411	680	22,822	4,509	-22,372	-1,019	0,624	1,195	140	2,471	-21,124	2,607	-22,376	22,528	500	2,742	-23,629
12,217	690	24,434	3,608	-24,167	-0,872	1,381	1,633	150	1,864	-21,406	1,775	-22,370	22,440	510	1,686	-23,335
12,751	700	25,502	2,003	-25,423	-0,385	1,939	1,977	160	1,232	-21,546	1,002	-22,224	22,246	520	0,771	-22,901
12,939	710	25,877	0,000	-25,877	0,306	2,133	2,155	170	0,611	-21,612	0,306	-22,003	22,006	530	0,000	-22,395
8,345	720	16,690	0,000	-16,690	0,000	-2,473	2,473	180	0,000	-21,636	-0,320	-21,744	21,746	540	-0,641	-21,851