

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

ЗАДАНИЕ

на выполнение бакалаврской работы

Студент Колистратов Денис Владимирович

1. Тема Повышение эффективности процесса сгорания газопоршневого ДВС добавкой водорода

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

3. Исходные данные к бакалаврской работе Двигатель ВАЗ на газовом топливе с добавкой водорода, $iV_n=1,5л$, частота вращения коленчатого вала $n = 5600$ об/мин; $\epsilon = 25$.

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 _____ В.В. Смоленский
(подпись) (И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению _____ Д.В. Колистратов
(подпись) (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 ЭМСУ

_____ Д.А. Павлов
(подпись) (И.О. Фамилия)
« ____ » _____ 2017г

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
выполнения бакалаврской работы**

Студента Колистратова Дениса Владимировича
по теме Повышение эффективности процесса сгорания газопоршневого ДВС добавкой
водорода

Наименование раздела работы	Плановый срок выполнения раздела	Фактический срок выполнения раздела	Отметка о выполнении	Подпись руководителя
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 конструкции спроектированного ДВС	20 мая 2017 г.			
Безопасность и экологичность	30 мая 2017 г.			
Предварительная защита и корректировка 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.В. Колистратов

_____ (И.О. Фамилия)

АННОТАЦИЯ

Повышение эффективности процесса сгорания газопоршневого ДВС является значимой и актуальной задачей. В бакалаврской работе представлен способ повышения эффективности рабочего процесса с помощью применения добавки водорода, позволяющей активировать процесс сгорания и повысить его эффективность на частичных нагрузках. Как показывают многие исследователи, эффективность процесса сгорания повышается при смещении рабочего процесса в область с бедной смесью.

По этому в данном бакалаврской работе представлены результаты проектирования газопоршневого ДВС с добавкой водорода в основное топливо, сжатый природный газ, для повышения эффективности процесса сгорания. Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки и графической части. Пояснительная записка состоит из следующих разделов:

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

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, 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 addi-

<p>– В разделе специальной части, проведен анализ эффективности применения различных добавок водорода и обоснование выбора наиболее оптимальной добавки для получения необходимого композитного газового топлива непосредственно на АЗС.</p> <p>Графическая часть работы содержит 8 листов формата А1 иллюстрирующих материал представленный в пояснительной записке.</p>	<p>tive for obtaining the required composite gas fuel directly at the filling station.</p> <p>The graphic part of the work contains 8 sheets of A1 format illustrating the material presented in the explanatory note.</p>
---	--

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1 Обзор иностранных источников по теме бакалаврской работы.....	8
1.1 Сравнительный термодинамический анализ двигателей внутреннего сгорания, работающих на бензине и водороде.....	8
1.2 Обзор применения богатого водородом газа в качестве топливной добавки в двигателях внутреннего сгорания CI и SI.....	15
1.3 Исследование скорости сгорания топлива на двигатель исполнение прямого впрыска водородного топливного двигателя	19
1.4 Обзор систем моделирования, биотоплива, контроля и надзора, применяемых в двигателях внутреннего сгорания.....	22
2 Тепловой расчет и тепловой баланс двигателя работающего на газовом топливе.....	25
3 Тепловой баланс	39
4 Кинематический расчет	41
5 Динамический расчет двигателя работающего на газе	42
6 Безопасность и экологичность газопоршневого двигателя с добавкой водорода.....	48
6.1 Оценка безопасности и экологичности газопоршневого двигателя с добавкой водорода	48
6.2 Выводы об безопасности и экологичности газопоршневого двигателя с добавкой водорода	49
7 Сравнительный анализ показателей работы двигателя на природном газе и на природном газе с добавкой водорода	51
Заключение	54
Список использованных источников	55
Приложение А.....	57
Приложение Б	77

ВВЕДЕНИЕ

При использовании водорода в качестве основного топлива или в качестве добавки в двигателях с искровым зажиганием возможна реализация как внутреннего, так и внешнего смесеобразования. Наибольшее распространение получило внешнее смесеобразование, так как оно реализуется с помощью относительно простой системы питания. Газообразное топливо метан и водород по отдельным каналам подаются в специальный смеситель, который устанавливается на впускном патрубке. Из него смесь подаётся в момент открытия впускного клапана в цилиндр двигателя. Однако при таком способе подачи перед впускным каналом всегда находится гомогенная смесь, что приводит к обратным вспышкам. Возможно самовоспламенение в момент открытия впускного клапана. Причиной воспламенения могут быть высокотемпературные зоны, которые находятся в камере сгорания ДВС. Для предотвращения обратных вспышек необходимо цикловую порцию водорода подавать в область впускного клапана каждого цилиндра или непосредственно в цилиндр. За исходное техническое решение принимают способ подачи при котором осуществляется внешнее смесеобразование.

В бакалаврской работе предложена концепция повышения эффективности процесса сгорания газопрошневого ДВС добавкой водорода, что является новой и актуальной темой для исследования в бакалаврской работе.

1 Обзор иностранных источников по теме бакалаврской работы

1.1 Сравнительный термодинамический анализ двигателей внутреннего сгорания, работающих на бензине и водороде

Аннотация

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 ° C по сравнению с 300-450 ° C 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.

Введение.

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 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. Ваурактар [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 высокореактивным, 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 легкой 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 высокий 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 самовоспламене-

ние 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 ($p_{\text{мер}}$) 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 среды, путем передачи ее теплового 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 пе-

реносом 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 тер 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, 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 рабо-

ты 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 степенью сжатия [16], а более высокая эффективность второго закона, связанная с водородным двигателем, объясняется значительно меньшими необратимостями водородного двигателя [15]

Выводы

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.

1.2 Обзор применения богатого водородом газа в качестве топливной добавки в двигателях внутреннего сгорания CI и SI

Введение

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 воспламеняемости 1. 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 смесь 1. При прокаливании свечей зажигания или сжатии 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 Берстальл (1925) провели эксперименты 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 про-

блему обратной вспышки. В Эрнжинге 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. КОН 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 (ННО). Газ ННО, 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 значи-

тельный 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 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 КОН 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 К⁷. Канда сообщил, что более высокое производство газа ННО наблюдается с электролитом калия (КОН) 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 га-

за 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 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 CO и HC. Снижение выбросов CO составляет около 7-20%. Такое высокое снижение можно объяснить отсутствием углерода в газообразном H₂^{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}.

Заключение

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'sGas уменьшает выбросы CO и HC газов, однако, выбросы NOx требуют дальнейшего изучения.

1.3 Исследование скорости сгорания топлива на двигатель исполнение прямого впрыска водородного топливного двигателя

ВВЕДЕНИЕ

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 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 Whiteetal. [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]. Поздняя инъекция в виде раствора была исследована Mohammadietal. [14]. 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 [18-19]. 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 NOx до приемлемого уровня [20].

Дизайн эксперимента

Четырехцилиндровый четырехтактный двигатель с непосредственным впрыском водорода был смоделирован с использованием программного обеспе-

чения 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 моделируются 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), BMEP 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 выжжен-

ных 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 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 ($\phi 4500$) расходует недопустимое количество топлива.

1.4 Обзор систем моделирования, биотоплива, контроля и надзора, применяемых в двигателях внутреннего сгорания

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 переменных движка ИС и доказывают различные гипотезы исследования, они также используются для разработки стратегий управления и систем контроля. В общем, моделирование двигателя ИС 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 ИС. 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 ИС, 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 ИС, и о возможных областях возможностей в будущих исследованиях. Наконец, из-за использования эффектов коррозии биотоплива могут быть представлены в двигателях ИС, 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 ИС.

2 Тепловой расчет и тепловой баланс двигателя работающего на газовом топливе

Исходные данные: Двигатель ВАЗ 2111, $i = 4$ $iV_h=1,5$ л, $n_N = 5200$ об/мин.; $\varepsilon = 11,8$, Природный газ и природный газ с добавкой водорода 5%. от массы топлива, на следующих частотах вращения: 850, 1500, 2500, 4000, 5200 об/мин.

Таблица 1 - Средний элементарный состав газового топлива

Массовая доля элемента в смеси СПГ в %	Объемная доля элемента в смеси СПГ в %	Состав природного газа
81,34	90	CH ₄ - Метан
5,05	2,96	C ₂ H ₆ - Этан
0,43	0,17	C ₃ H ₈ - Пропан
1,85	0,55	Бутан C ₄ H ₁₀ - Бутан
1,81	0,42	C ₅ H ₁₂ - Пентан
0,00016	0,14	Водород H ₂
0,221	0,14	СО - Угарный газ
1,17	0,47	СО ₂ - Углекислый газ
8,116	5,15	N ₂ - Азот

Молекулярная масса композитного газового топлива по объему $m_T=12,59$ кг/кмоль, по массе $m_T= 16,14$ м³/кмоль, молекулярная масса СПГ по объему $m_T=17,717$ м³/кмоль, по массе $m_T=17,717$ кг/кмоль.

Низшая теплота сгорания композитного газового топлива по объему:

$$H_u' = 12,8CO + 10,8H_2 + 35,7CH_4 + 63,3C_2H_6 + 90,9C_3H_8 + 119,7C_4H_{10} + 146,2C_5H_{12} = 12,8 \cdot 0,000943 + 10,8 \cdot 0,327406 + 35,7 \cdot 0,606183 + 63,6 \cdot 0,0193 + 90,9 \cdot 0,0011 + 119,7 \cdot 0,0037 + 146,7 \cdot 0,0028 = 27,41187 \text{ МДж/м}^3 = 27411,87 \text{ кДж/м}^3 \quad (1.1)$$

Низшая теплота сгорания композитного газового топлива по массе:

$$\begin{aligned}
 H_u &= [34,013C + 125,6H - 10,9(O - S) - 2,512(9H + W)] \cdot 10^6 = [34,013 \cdot 0,619629 \\
 &+ 125,6 \cdot 0,292478985 - 10,9 \cdot (0,008795215 - 0) - 2,512 \cdot (9 \cdot 0,25 + 0)] \cdot 10^6 = \\
 &= 51102,8 \text{ кДж / кг}
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$

Низшая теплота сгорания СПГ топлива по объему:

$$\begin{aligned}
 H_u' &= 12,8CO + 10,8H_2 + 35,7CH_4 + 63,3C_2H_6 + 90,9C_3H_8 + 119,7C_4H_{10} + 146,2C_5H_{12} = 12,8 \cdot 0, \\
 &0014 + 10,8 \cdot 0,0014 + 35,7 \cdot 0,9 + 63,6 \cdot 0,0296 + 90,9 \cdot 0,0017 + 119,7 \cdot 0,0055 + 146,7 \cdot 0,0042 \\
 &= 35,46364 \text{ МДж/м}^3 = 35463,64 \text{ кДж/м}^3
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

Низшая теплота сгорания СПГ топлива по массе:

$$\begin{aligned}
 H_u &= [34,013C + 125,6H - 10,9(O - S) - 2,512(9H + W)] \cdot 10^6 = [34,013 \cdot 0,6884771 \\
 &+ 125,6 \cdot 0,2138655 - 10,9 \cdot (0,0097725 - 0) - 2,512 \cdot (9 \cdot 0,25 + 0)] \cdot 10^6 = \\
 &= 45337,09 \text{ кДж / кг}
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

Коэффициент избытка воздуха принимаем $\alpha = 1$.

Расчет будет проводиться для всех выбранных режимов, окончательные значения будут приводятся в форме таблицы.

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания:

$$L_0' = \frac{1}{0,21} * \sum \left(n + \frac{m}{4} - \frac{r}{2} \right) \cdot C_n H_m O_r \frac{\text{мольвоздуха}}{\text{мольгазообтопл}}, \text{ или } \frac{\text{м}^3 \text{возд}}{\text{м}^3 \text{топл}}
 \tag{2.2}$$

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

Количество горючей см./кмоль газообразного топлива

$$M_1' = \alpha L_0' \text{ кмоль}
 \tag{2.3}$$

$$M_1 = \left(\alpha \cdot L_0 + \frac{1}{\mu_m} \right) \frac{\text{кмоль св. заряда}}{\text{кг. топлива}}$$

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

- углекислого газа

$$M'_{CO_2} = \sum n(C_n H_m O_r) \text{ кмоль } CO_2 / \text{кмоль топл} \quad (2.4)$$

$$M_{CO_2} = C / 12 \frac{\text{кмоль св. зар.}}{\text{кг. топл}}$$

- водяного пара

$$M'_{H_2O} = \sum \frac{m}{2} (C_n H_m O_r) \text{ кмоль} \quad (2.5)$$

$$M_{H_2O} = H / 2 \frac{\text{кмоль } H_2O}{\text{кг. топл.}}$$

- кислорода

$$M'_{O_2} = 0,208(\alpha - 1)L'_0 \text{ кмоль} \quad (2.6)$$

$$M_{O_2} = 0,208(\alpha - 1)L_0 \frac{\text{кмоль } O_2}{\text{кг. топл}}$$

- азота

$$M'_{N_2} = 0,792\alpha L'_0 + N_2 \text{ кмоль.} \quad (2.7)$$

$$M_{N_2} = 0,792\alpha L_0 \frac{\text{кмоль } N_2}{\text{кг. топл}}$$

Общее число продуктов сгорания

$$M'_2 = M'_{H_2O} + M'_{O_2} + M'_{CO_2} + M'_{N_2} \text{ кмоль.} \quad (2.8)$$

Параметры рабочего тела на всех режимах будут одинаковы, поэтому в таблице приведены параметры рабочего тела для топлив СПГ и СПГ+5%N₂, на режиме 5200 об/мин.

Таблица 2 - Параметры рабочего тела

Топливо	СПГ	СПГ+5%Н ₂		СПГ	СПГ+5%Н ₂
L'_0	9,53293	7,20554	L_0	0,531413	0,598464
Коэффициент избытка воздуха	1	1	Коэффициент избытка воздуха	1	1
M'_1 , кмоль	9,532	7,20	M_1 , кмоль/кг	0,5878	0,6549
Доля СО ₂ в продуктах сгорания, кмоль	1,015	1,009	Доля СО ₂ в продуктах сгорания, кмоль/кг	0,05737	0,05163
Доля Н ₂ О в продуктах сгорания, кмоль	1,949	1,31	Доля Н ₂ О в продуктах сгорания, кмоль/кг	0,1475	0,1475
Доля N ₂ в продуктах сгорания, кмоль	7,55	5,71	Доля N ₂ в продуктах сгорания, кмоль/кг	0,5052	0,5506
M'_2 , кмоль	10,52	8,03	M_2 кмоль/кг	0,711	0,7497

Параметры окружающей среды приведены в таблице 3

Таблица 3 - Параметры окружающей среды

$p_k=p_0$ МПа	$T_k=T_0$ К	T_r К	P_r МПа
0,1	293	1200	0,118

Величина давлений остаточных газов приведена в таблице 5.

Зависимость A_n от частоты вращения коленчатого вала определяется по формуле ниже, расчетные данные приведены в таблице 4.

$$A_n = 95/n \quad (2.9)$$

Температура подогрева свежего заряда:

$$\Delta T = A_T (110 - 0,0125n), \quad (2.10)$$

где $A_T = \Delta T_N / (110 - 0,0125 n_N)$.

Таблица 4 – Зависимость A_n от n_N

Частота вращения коленчатого вала, мин^{-1}	Коэффициент, A_n
850	0,112
1500	0,063
2500	0,038
4000	0,0237
5200	0,0183

Плотность заряда на впуске:

$$\rho_0 = p_0 \cdot 10^6 / (R_B T_0) \text{ кг/м}^3, \quad (2.11)$$

где $R_B = 287 \text{ Дж/(кг град)}$ – удельная газовая постоянная для воздуха.

Принимаем снижение сопротивления $\beta^2 + \xi_{\text{ВП}} = 2,8$ и $\omega_{\text{ВП}} = 95 \text{ м/с}$.

Тогда ΔP_a на всех скоростных режимах двигателя рассчитываем по формуле:

$$\Delta P_a = (\beta^2 + \xi_{\text{ВП}}) \cdot A_n^2 \cdot n^2 \cdot p_k \cdot 10^{-6} / 2 \text{ МПа}, \quad (2.12)$$

где $A_n = \omega_{\text{ВП}} / n_N$.

Давление в конце впуска:

$$P_a = p_0 - \Delta p \text{ МПа} \quad (2.13)$$

Коэффициент остаточных газов:

$$\gamma_r = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{\varphi_{oc} P_r}{\varepsilon \varphi_{доз} P_a - \varphi_{oc} P_r} \quad (2.14)$$

Для всех режимов $\varphi_{доз}$ приведены в таблице.

Температура в конце впуска:

$$T_a = (T_0 + \Delta T + \gamma_r T_r) / (1 + \gamma_r) \text{ К} \quad (2.15)$$

Коэффициент наполнения:

$$\eta_v = \frac{T_0}{T_0 + \Delta T} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{p_0} (\varphi_{доз} \varepsilon P_a - \varphi_{oc} P_r) \quad (2.16)$$

Таблица 5 – Параметры процесса впуска и газообмена

Топливо	СПГ	СПГ+5 %H ₂	СПГ	СПГ+5% H ₂	СПГ	СПГ+5% H ₂	СПГ	СПГ+5% H ₂	СПГ	СПГ+5 %H ₂
Частота вращения, мин ⁻¹	850		1500		2500		4000		5200	
Температура остаточных газов, К	950	900	1000	950	1050	1000	1100	1050	1200	1100
Давление остаточных газов, МПа	0,105	0,100	0,109	0,1082	0,115	0,110	0,118	0,115	0,120	0,118
Подогрев свежего заряда, °С	18,4	15,2	13,3	12	11,6	10,1	11	9,5	10	8
Разряжение во впускном трубопроводе, МПа	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Среднее давление впуска, МПа	0,1	0,09	0,088	0,086	0,086	0,082	0,084	0,085	0,084	0,083
Коэффициент дозарядки	0,85	0,85	1,05	1,05	1,15	1,15	1	1	0,9	0,9
Коэффициент остаточных газов	0,041	0,042	0,041	0,041	0,041	0,041	0,042	0,041	0,041	0,041
Средняя температура на впуске, К	355	352,7	350,1	350,7	350	350,7	350,7	350,7	349,7	348
Коэффициент наполнения	0,65	0,65	0,84	0,84	0,929	0,929	0,791	0,791	0,698	0,698

Значение показателя политропы сжатия:

$$n_1 = 1 + \frac{8,314}{20,16 + 1,738 \cdot 10^{-3} (\varepsilon^{n_1-1} + 1) \cdot T_a} \quad (2.17)$$

Давление в конце сжатия:

$$P_c = P_a \varepsilon^{n_1} \text{ МПа} \quad (2.18)$$

Температура в конце сжатия:

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1-1} \quad (2.19)$$

Удельный объем, давление и температура рабочего тела в момент воспламенения находятся по следующим формулам:

$$V_y = \frac{V_a}{\varepsilon} \cdot \left[1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \left[\left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \left[\cos\left(\frac{\Theta \cdot \pi}{180}\right) + \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \left(\sin\left(\frac{\Theta \cdot \pi}{180}\right) \right)^2} \right] \right] \right] \text{ м}^3/\text{кг} \quad (2.20)$$

$$p_y = \left(\frac{V_a}{V_y} \right)^{n_1} \cdot p_a, \text{ МПа} \quad (2.21)$$

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

Таблица 6 – Процесс сжатия и начала воспламенения смеси

Топливо	СПГ	СПГ+5% %H ₂	СПГ	СПГ+5% H ₂	СПГ	СПГ+5% H ₂	СПГ	СПГ+5% H ₂	СПГ	СПГ+5% H ₂
Частота вращения, мин ⁻¹	850		1500		2500		4000		5200	
Показатель плитропы сжатия	1,38	1,373	1,38	1,375	1,383	1,363	1,389	1,377	1,389	1,376
Давление в конце сжатия, МПа	3	2,61	2,7	2,5	2,45	2,39	2,35	2,3	2,09	2
Температура в конце сжатия, К	850	844,4	830	796	805	790	795,4	785	800,05	781
Удельный объем в момент воспламенения, м ³ /кг	0,155	0,144	0,163	0,154	0,18	0,162	0,18	0,18	0,21	0,18
Давление в момент зажигания, МПа	1,43	1,57	1,33	1,43	1,16	1,34	1,11	1,16	0,92	1,12
Температура в момент зажигания, К	768,5	788,9	754,2	768,5	724,7	754,2	717,2	724,7	680,5	717,3

Давление газов в процессе сгорания:

$$p_2 = E_2 \cdot \Delta X_{1-2} + p_1 \cdot (K_{1-2} \cdot \psi(\varphi_1') - \psi(\varphi_2')) / [K_{1-2} \cdot \psi(\varphi_1') - \psi(\varphi_1')] \text{ МПа} \quad (2.23)$$

Доля топлива, сгоревшего на рассматриваемом участке:

$$\Delta X_{1-2} = \exp \left[-6,908 \left[\frac{\varphi_1}{\varphi_Z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[-6,908 \left[\frac{\varphi_2}{\varphi_Z} \right]^{m+1} \right] \quad (2.24)$$

Фактор теплоемкостей находится следующим образом:

$$K_{1-2} = \frac{k_{1-2} + 1}{k_{1-2} - 1} \quad (2.25)$$

Отношение средних теплоемкостей рабочего тела на участке 1-2:

$$k_{1-2} = 1,259 + \left[76,7 - \left(13,6 - \frac{14,2}{\alpha} \right) \cdot x_{1-2} \right] \cdot \frac{1}{T_{1-2}} - \left(0,0665 - \frac{0,0245}{\alpha} \right) \cdot x_{1-2} \quad (2.26)$$

Среднее значение доли топлива сгоревшего на участке 1-2:

$$x_{1-2} = 0,5 \left[\exp \left[-6,908 \left[\frac{\varphi_1}{\varphi_Z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[-6,908 \left[\frac{\varphi_2}{\varphi_Z} \right]^{m+1} \right] \right] \quad (2.27)$$

Средняя температура на участке 1-2

$$T_{1-2} = \frac{T_1 + T_2}{2} \text{ К} \quad (2.28)$$

$$\psi(\varphi') = 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \sigma \quad (2.29)$$

$$\sigma = \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) - \left[\cos(\varphi') + \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 (\sin(\varphi'))^2}\right] \quad (2.30)$$

Температура в процессе сгорания:

$$T_2 = \frac{T_y \cdot p_2 \cdot \psi(\varphi_2')}{p_y \cdot \psi(\varphi_y') \cdot \mu_{1-2}} \text{ К} \quad (2.31)$$

Средний коэффициент молекулярного изменения свежей смеси:

$$\mu_{1-2} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} \quad (2.32)$$

$$\mu_1 = 1 + \frac{(\mu_{0\max} - 1) \left[1 - \exp\left[-6,908 \left(\frac{\varphi_1}{\varphi_z}\right)^{m+1}\right]\right]}{1 + \gamma_r} \quad (2.33)$$

Средний показатель политропы расширения:

$$n_2 = 1 + \frac{8,341}{23,7 + 0,0046 \cdot T_z \cdot \left(1 + \frac{1}{\delta^{n_2-1}}\right)} \quad (2.34)$$

Давление и температура в конце процесса расширения:

$$p_b = \frac{p_z}{\delta^{n_2}}, \text{ МПа} \quad (2.35)$$

$$T_b = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}}, K \quad (2.36)$$

Проверка ранее принятой температуры остаточных газов:

$$T_r = \frac{T_b}{\sqrt[3]{p_b / p_r}}, K \quad (2.37)$$

$$\Delta T_r = 100(T_r - 950)/950, \%$$

Для остальных режимов окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице 7.

Таблица 7 – Параметры процесса расширения и выпуска

	СПГ	СПГ+5 %H ₂	СПГ	СПГ+5 %H ₂	СПГ	СПГ+5 %H ₂	СПГ	СПГ+5 %H ₂	СПГ	СПГ+5 %H ₂
Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	850		1500		2500		4000		5200	
показатель политропы расширения	1,21	1,1971	1,21	1,19	1,21	1,19	1,32	1,2	1,2	1,19
Давление в конце процесса расширения, МПа	0,433	0,442	0,432	0,439	0,428	0,436	0,355	0,433	0,445	0,456
Температура в конце процесса расширения, К	1532	1654,6	1525,2	1634	1514,3	1625,4	1257,9	1614	1574,1	1701,6
Температура остаточных газов, К	900	893	925	900	951	910	1000	985	1053	995
Погрешность принятия температуры остаточных газов%	4,1	4,8	4,1	4,5	4,1	4,2	3	3,3	3,5	4

Теоретическое среднее индикаторное давление

$$p'_i = \frac{p_c}{\varepsilon - 1} \left[\frac{\lambda}{n_2 - 1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2 - 1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1 - 1}} \right) \right] \quad (2.37)$$

Среднее индикаторное давление

$$p_i = \varphi_i p'_i, \quad (2.38)$$

где коэффициент диаграммы принят $\varphi_i = 0,96$.

Индикаторный КПД и индикаторный удельный расход газа:

$$\eta_i = 371,2 \cdot 10^{-6} M'_k T_k p_i / (H'_u p_k \eta_v) \quad (2.39)$$

$$v_i = 3600 / (H'_u \eta_i) \quad (2.40)$$

Среднее давление механических потерь для бензиновых двигателей с числом цилиндров до шести и отношения $S / D \leq 1$:

$$p_M = 0,034 + 0,0113 \cdot v_{n,cp} \quad (2.41)$$

Значение средней скорости поршня при:

$$v_{n,cp} = \frac{Sn}{3 \cdot 10^4} \quad (2.42)$$

Среднее эффективное давление и механический КПД:

$$p_e = p_i - p_M \quad (2.44)$$

$$\eta_M = p_e / p_i \quad (2.43)$$

Эффективный КПД и эффективный удельный расход топлива:

$$\eta_e = \frac{371,2 \cdot 10^{-6} \cdot p_e \cdot T_k \cdot M_1}{p_k \cdot \eta_v \cdot H_u} \quad (2.44)$$

$$v_e = 3,6 / (\eta_e H_u') \quad (2.45)$$

Таблица 8 – Индикаторные и эффективные параметры двигателя

	СПГ	СПГ+5 %H ₂								
Частота вращения, мин ⁻¹	850		1500		2500		4500		5200	
Индикаторное давление, МПа	0,978	0,994	0,967	0,987	0,966	0,984	0,959	0,984	1,022	1,062
Индикаторный КПД	0,368	0,366	0,284	0,284	0,255	0,255	0,298	0,299	0,359	0,366
Удельный индикаторный расход топлива, м ³ /(кВтч)	0,275	0,359	0,357	0,463	0,397	0,516	0,340	0,439	0,282	0,359
Средняя скорость поршня, м/с	2,012	2,012	3,55	3,55	5,92	5,917	9,46	9,47	12,31	12,31
Давление механических потерь, МПа	0,056	0,057	0,074	0,074	0,100	0,101	0,141	0,141	0,173	0,173
Эффективное давление, МПа	0,922	0,937	0,893	0,913	0,865	0,883	0,818	0,843	0,848	0,889
Механический КПД	0,942	0,943	0,923	0,925	0,895	0,897	0,853	0,857	0,831	0,837
Эффективный КПД	0,413	0,411	0,312	0,312	0,272	0,272	0,303	0,305	0,355	0,364
Удельный эффективный расход топлива м ³ /(кВтч)	0,246	0,319	0,325	0,421	0,373	0,483	0,335	0,431	0,286	0,361

Литраж двигателя:

$$V_d = 30 \tau N_e / (p_e n), \text{ об/мин} \quad (2.46)$$

Рабочий объем одного цилиндра:

$$V_h = V_n / i, \text{ л} \quad (2.47)$$

Диаметр цилиндра:

$$D = 100 \cdot \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_h}{\pi \cdot S / D}}, \text{ мм} \quad (2.48)$$

Основные параметры и показатели двигателя определяем по окончательно принятым значениям S и D, таблица 9:

- площадь поршня:

$$F_n = \pi D^2 / (4 \cdot 100), \text{ см}^2 \quad (2.49)$$

- литраж двигателя:

$$V_n = \pi D^2 S i / (4 \cdot 10^6), \text{ л} \quad (2.50)$$

- мощность двигателя:

$$N_e = p_e V_n n / 30 \tau, \text{ кВт} \quad (2.51)$$

- крутящий момент:

$$M_e = \frac{3 \cdot 10^4}{\pi} \frac{N_e}{n}, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.52)$$

- часовой расход топлива:

$$V_T = N_e \gamma_e = N_e \gamma_e, \text{ м}^3 / \text{ч} \quad (2.53)$$

- литровая мощность двигателя:

$$N_n = N_e / V_n, \text{ кВт/л} \quad (2.54)$$

Таблица 9 - Основные параметры и показатели двигателя

Топливо	СПГ	СПГ+ 5%Н ₂	СПГ	СПГ+5 %Н ₂	СПГ	СПГ+5 %Н ₂	СПГ	СПГ+5 %Н ₂	СПГ	СПГ+ 5%Н ₂
Частота вращения, мин ⁻¹	850		1500		2500		4000		5200	
Площадь поршня, см ³	52,7834									
Рабочий объем двигателя	1,499809									
Литровая мощность, кВт / л	36,76									
Эффективная мощность, кВт	9,78	9,95	16,74	17,13	27,1	27,6	40,91	42,14	55,14	57,8
Крутящий момент, Н · м	109,9	111,8	106,6	109,1	103,2	105,4	97,7	100,6	101,3	106,1
Часовой расход топлива, м ³ / ч	2,41	3,18	5,44	7,2	10,1	13,3	13,7	18,15	15,76	20,85

3 Тепловой баланс

Общее количество теплоты, введенной в двигатель с топливом:

$$Q_0 = H_u G_T, \text{кДж/ч} \quad (3.1)$$

Теплота, эквивалентная эффективной работе за 1 секунду:

$$Q_e = 3600 \cdot N_e, \text{кДж/ч} \quad (3.2)$$

Теплота, передаваемая окружающей среде:

$$Q_o = (c \cdot i \cdot D^{1+2 \cdot m} \cdot n^m \cdot (H_u - \Delta H_u) / (\alpha \cdot H_u)) \cdot 3600 / 1000, \text{Дж/ч} \quad (3.3)$$

Теплота, унесенная отработавшими газами:

$$Q_r = G_m \cdot \left\{ M_2 \left[(\mu c_{v_r})_{t_0}^{t_r} + 8,315 \right] \cdot t_r - M_1 \cdot \left[(\mu c_v)_{t_0}^{t_k} + 8,315 \right] \cdot t_k \right\}, \text{кДж/ч} \quad (3.4)$$

где $(\mu c_v)_{t_0}^{t_r} = 20,755 \text{кДж}$ – теплоемкость отработавших газов, при $\alpha = 1$ и $t_r = 978,94$ °С.

Количество невыделившейся теплоты:

$$\Delta H_u = A \cdot (1 - \alpha) \cdot L_0, \text{кДж/кг} \quad (3.5)$$

Теплота, потерянная из-за химической неполноты сгорания топлива:

$$Q_{н.ср.} = \Delta H_u \cdot G_t \quad (3.6)$$

Неучтенные потери теплоты:

$$Q_{ост.} = Q_o + (Q_C + Q_g + Q_r + Q_{н.с.}), \text{ кДж/ч} \quad (3.7)$$

Составляющие теплового баланса представлены в таблице 10.

Таблица 10 - Параметры теплового баланса

		Теплота, эквивалентная эффективной работе		Теплота, передаваемая окружающей среде		Теплота, унесенная отрабатываемыми газами		Неучтенные потери теплоты		Общее количество теплоты	
		Q, кДж/ч	q, % кДж/ч	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч
850	СПГ	35235,5	31,33	5613	23,7	27171	31,8	2737	3,208	85351	100
	СПГ+5%Н ₂	35832,2	31,41	20206	23,2	29543	33,8	1701	1,949	87282	100
1500	СПГ	60291,7	31,215	18057	33,6	61512	31,8	6342	3,283	193149	100
	СПГ+5%Н ₂	61649,1	31,212	65004	32,9	66428	33,6	4437	2,246	197519	100
2500	СПГ	97285,5	27,224	38433	34,7	113808	31,8	7905	2,212	357357	100
	СПГ+5%Н ₂	99322,6	27,179	139204	33,1	122949	33,6	3965	1,085	365441	100
4000	СПГ	147280	30,26	49455	36,6	154956	31,8	6435	1,322	486712	100
	СПГ+5%Н ₂	151722	30,48	178039	35,8	167457	33,6	502,5	0,101	497722	100
5200	СПГ	198509	35,5	49948	32,2	177971	31,8	2715	0,486	559007	100
	СПГ+5%Н ₂	207988	36,38	169149	29,6	192325	33,6	2191	0,383	571652	100

4 Кинематический расчет

Величина отношения радиуса кривошипа к длине шатуна, $\lambda=0,293$.

Кинематически расчет при этих условиях, если длинна шатуна:

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

Перемещение поршня:

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

Расчет S_x производится через каждые 10° угла поворота коленчатого вала.

Скорость поршня:

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

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

$$\omega = 3,14 \cdot 5200/30 = 544,5 \text{ рад/с} \quad (4.4)$$

Средняя скорость поршня:

$$V_{п.ср} = S_n/30 = 0,071 \cdot 5200/30 = 13,25 \text{ м/с} \quad (4.5)$$

Ускорение поршня:

$$j = \omega^2 R (\cos\varphi + \lambda \cos 2\varphi), \text{ м/с}^2 \quad (4.6)$$

5 Динамический расчет двигателя работающего на газе

Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма:

- масса поршневой группы:

$$m_n = m_n \cdot F_n = 80 \cdot 0,005278 = 0,422 \text{ кг} \quad (5.1)$$

- масса шатуна:

$$m_{ш} = m_{ш} \cdot F_n = 100 \cdot 0,005278 = 0,527 \text{ кг} \quad (5.2)$$

- масса неуравновешенных частей:

$$m_k = m_k \cdot F_n = 120 \cdot 0,005278 = 0,633 \text{ кг} \quad (5.3)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца:

$$m_{ш.п.} = 0,275 \cdot m_{ш} = 0,275 \cdot 0,527 = 0,1451 \text{ кг} \quad (5.4)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа:

$$m_{ш.к.} = 0,725 \cdot m_{ш} = 0,725 \cdot 0,527 = 0,382 \text{ кг} \quad (5.5)$$

Массы, совершающие возвратно-поступательное движение:

$$m_j = m_n + m_{ш.п.} = 0,422 + 0,1451 = 0,567 \text{ кг} \quad (5.6)$$

Массы, совершающие вращательное движение:

$$m_R = m_K + m_{ш.к} = 0,633 + 0,382 = 1,016 \text{ кг} \quad (5.7)$$

Силы инерции:

$$P_j = -m_j j = 0,746 \cdot j \text{ (кН)} \quad (5.8)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна одного цилиндра:

$$K_{Ru} = -m_{ш.к.} \cdot R \cdot \omega^2 \cdot 10^{-3} = -4027,722 \text{ кН} \quad (5.9)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа:

$$K_{Rk} = -m_{к.} \cdot R \cdot \omega^2 \cdot 10^{-3} = -6666,5 \text{ кН} \quad (5.10)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа:

$$K_R = K_{Ru} + K_{Rk} = -10694,3 \text{ кН} \quad (5.11)$$

Суммарные силы.

Сила, сосредоточенная на оси поршневого пальца:

$$P = \Delta P_r + P_j \text{ (кН)} \quad (5.12)$$

Нормальная сила:

$$N = P \operatorname{tg} \beta \text{ (кН)} \quad (5.13)$$

Сила, действующая вдоль шатуна:

$$S = P \cdot (1 / \cos \beta) \text{ (кН)} \quad (5.14)$$

Сила (кН), действующая по радиусу кривошипа:

$$K = P \cdot \cos(\varphi + \beta) / \cos \beta \text{ (кН)} \quad (5.15)$$

Полная тангенциальная сила:

$$T = \frac{P \sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta} \text{ (кН)} \quad (5.16)$$

Крутящий момент одного цилиндра:

$$M_{кр.ц} = T \cdot R \text{ (Н м)} \quad (5.17)$$

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

$$\theta = 720 / i = 720 / 4 = 180^\circ \quad (5.18)$$

Средний крутящий момент двигателя:

- по данным теплового расчета:

$$M_{кр.ц} = M_i = \frac{M_e}{\eta_M} = 106 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.19)$$

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

$$M_{кр.ср.} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{M_{кр.i} + M_{кр.i+1}}{2} \right) \cdot 10^\circ}{360^\circ} = 109,01 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.20)$$

Ошибка:

$$\Delta = ((168-161) / 168) \cdot 100 = 3\% \quad (5.21)$$

Максимальный и минимальный крутящие моменты:

$$M_{кр. max} = 109,01 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (5.22)$$

$$M_{кр. min} = 100,61 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (5.23)$$

Суммарная сила, действующая на шатунную шейку по радиусу кривошипа:

$$P_K = K + K_{Rш}, \text{ Н} \quad (5.24)$$

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

$$R_{ш.ш. cp} = \sum_{i=1}^n ((R_{ш.ш.i} + R_{ш.ш.i+1}) / 2) \cdot 10^\circ / 720^\circ = 6628 \text{ Н} \quad (5.25)$$

Суммарная сила, действующая на колено вала по радиусу кривошипа:

$$K_{PK} = P_K + K_{Rk}, \text{ Н} \quad (5.26)$$

Результирующая сила, действующая на колено вала:

$$R_k = \sqrt{R_{ш.ш.}^2 + K_{Rk}^2} \quad (5.27)$$

Сила, действующая на первую коренную шейку:

$$R_{к.ш.1} = -0,5 \cdot R_{k1} \quad (5.28)$$

Сила, действующая на вторую коренную шейку:

$$R_{к.ш.2} = \sqrt{T_{k2}^2 + K_{k2}^2}, \quad (5.29)$$

где:

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

$$-K_{pk2} \cdot \sin 180^\circ = -0.5 \cdot (T_1 - T_2); \quad (5.30)$$

$$K_{k2} = -0.5 \cdot (K_{pk1} + T_2 \cdot \sin \gamma_{k(1-2)} - K_{pk2} \cdot \cos \gamma_{k(1-2)}) = -0.5 \cdot (T_1 + T_2 \cdot \sin 180^\circ - K_{pk2} \cdot \cos 180^\circ) = -0.5 \cdot (K_{pk1} - K_{pk2}). \quad (5.31)$$

Сила, действующая на третью коренную шейку:

$$R_{к.ш.3} = \sqrt{T_{k3}^2 + K_{k3}^2}, \quad (5.32)$$

где:

$$T_{k3} = -0.5 \cdot (T_2 + T_3 \cdot \cos \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} \cdot \sin \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0.5 \cdot (T_2 + T_3 \cdot \cos 0^\circ - K_{pk3} \cdot \sin 0^\circ) \cdot \cos 180^\circ = 0.5 \cdot (T_2 + T_3); \quad (5.33)$$

$$K_{k2} = -0.5 \cdot (K_{pk2} + T_3 \cdot \sin \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} \cdot \cos \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0.5 \cdot (K_{pk2} + T_3 \cdot \sin 0^\circ - K_{pk3} \cdot \cos 0^\circ) \cdot \cos 180^\circ = 0.5 \cdot (K_{pk2} - K_{pk3}). \quad (5.34)$$

По диаграммам определяем:

- для 1 (5)-й коренной шейки:

$$R_{к.ш.1cp} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш.1i} + R_{к.ш.1i+1}) / 2) \cdot 10^\circ / 720^\circ = 3929 \quad (5.35)$$

$$R_{к.ш.1max} = 5529H \quad (5.36)$$

$$R_{к.ш.1min} = 3057H \quad (5.37)$$

- для 2 (4)-й коренной шейки:

$$R_{к.ш2ср} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш2i} + R_{к.ш2i+1})/2) * 10^\circ / 720^\circ = 3397H \quad (5.38)$$

$$R_{к.ш2max} = 12492H \quad (5.39)$$

$$R_{к.ш2min} = 518H \quad (5.40)$$

- для 3-й коренной шейки:

$$R_{к.ш3ср} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш3i} + R_{к.ш3i+1})/2) * 10^\circ / 720^\circ = 6628H \quad (5.41)$$

$$R_{к.ш3max} = 9716H \quad (5.42)$$

$$R_{к.ш3min} = 2358H \quad (5.43)$$

Равномерность крутящего момента:

$$\mu = (M_{кр.max} - M_{кр.min}) / M_{кр.ср.} = [499,87 - (201,57)] / 147,93 = 4,74 \quad (5.44)$$

Избыточная работа крутящего момента:

$$L_{изб} = A \cdot 4 \cdot \pi / (4 \cdot 90) = 13961 \cdot 4 \cdot \pi / 360 = 492,05 \text{ Дж}, \quad (5.45)$$

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

$$I_0 = L_{изб} / (\delta \cdot \omega^2) = 492,02 / (0,015 \cdot 544,5^2) = 0,110 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (5.46)$$

6 Безопасность и экологичность газопоршневого двигателя с добавкой водорода

6.1 Оценка безопасности и экологичности газопоршневого двигателя с добавкой водорода

Целью бакалаврской работы было повышение эффективности рабочего процесса газопоршневого двигателя за счет добавки водорода. В результате этого был спроектирован газопоршневой двигатель с непосредственным впрыском водорода в цилиндр, с целью улучшения наполнения цилиндра, так как при подаче водорода во впускной коллектор он за счет малой плотности сильно вытесняет от туда другие газы, даже при минимальной его добавки, так как его плотность в 13 раз меньше плотности воздуха.

6.1.1 Оценка взрыво-пожаробезопасности газопоршневого двигателя с добавкой водорода

При работе на газовом топливе, а особенно с добавками водорода, находящегося в отдельной системе питания, условия для выполнения требований по взрывобезопасности сильно ухудшаются, так автомобиль с заправленным баллоном нельзя хранить в закрытом помещении и .т.д. согласно требованиям по взрыво-пожаро- опасности к автомобильному транспорту.

6.1.2 Оценка экологичности, по нормируемым продуктам отработавших газов, газопоршневого двигателя с добавкой водорода

Водород являясь промоутером процесса горения обеспечивает повышение эффективности процесса и большую полноту выгорания топлива, что сказывается на концентрациях токсичных компонентов в отработавших газах, рассмотрим каждый токсичный компонент в отдельности:

- Продукты неполного сгорания (CH , CO и сажа) - сгорание газового топлива имеет недостаток, а именно при работе на забалластированных смесях имеет место неполнота сгорания топлива, что повышает токсичность по CH и CO , следовательно добавляя водород в рабочую смесь мы решаем эти проблемы и значительно снижаем токсичность по продуктам неполного сгорания.
- Продукты неполного окисления азота (NO и NO_2) - добавка водорода повышает скорость тепловыделения и следовательно условия для увеличения термических оксидов азота в продуктах сгорания.
- Двуокись углерода (CO_2) - добавка водорода уменьшает количество атомов углерода в рабочей смеси, и при этом повышает скорость сгорания, тем самым снижая выбросы парникового газа примерно на 7-10%.

6.1.3 Оценка экологичности, по шуму, газопоршневого двигателя с добавкой водорода

Повышение скорости распространения пламени при добавке водорода увеличивает жесткость работы на полных и мощностных нагрузках, но в тоже время на низких нагрузках при добавке водорода повышается расвномерность работы, что положительно сказывается на вибрациях и шуме от работы двигателя. Следовательно повышение жеткости сгорания повысит шум от работы двигателя, что потребует установки дополнительных элементов шумоизоляции моторного отсека.

6.2 Выводы об безопасности и экологичности газопоршневого двигателя с добавкой водорода

1. Пожаробезопасность не изменится, а взрывоопасность увеличится.

2. Шум двигателя на основных режимах работы возрастет, снижение возможно только при работе на низких нагрузках.

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. Для соблюдения требований правил пожаро-взрыво-безопасности требуется хранение автомобиля только в открытом хорошо вентилируемом помещении, и при выезде на рейс требуется проверка герметичности всех топливных систем, также балло должен располагаться в автомобиле в вентилируемом пространстве.

7 Сравнительный анализ показателей работы двигателя на природном газе и на природном газе с добавкой водорода

Анализ результатов сравнения характеристик двигателя работе на природном газе и при добавке водорода в него представлено на рисунках 7.1 - 7.6.

Так добавка водорода дает увеличение на 5% крутящего момента и мощности на каждые 5% своей добавки, это подтверждают результаты приведенные на рисунках 7.1 и 7.2.

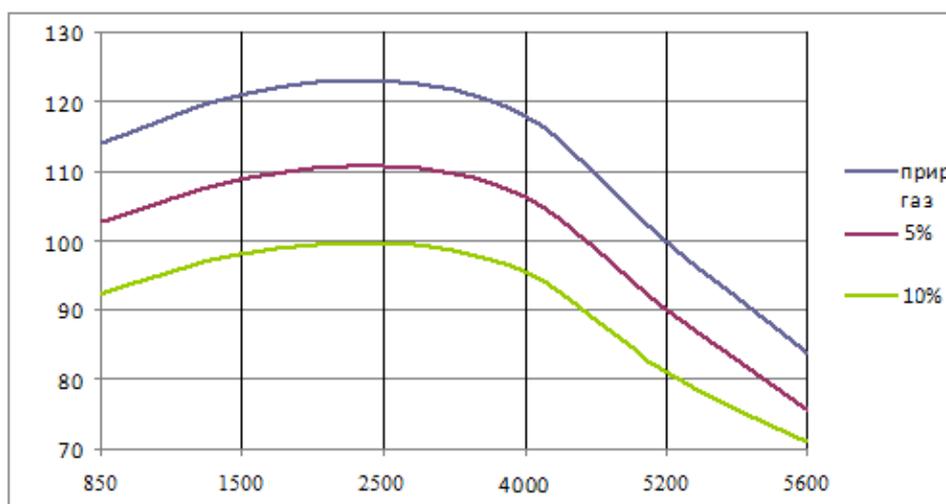


Рисунок 7.1 – Влияние добавки водорода на крутящий момент при работе с различной частотой вращения коленчатого вала

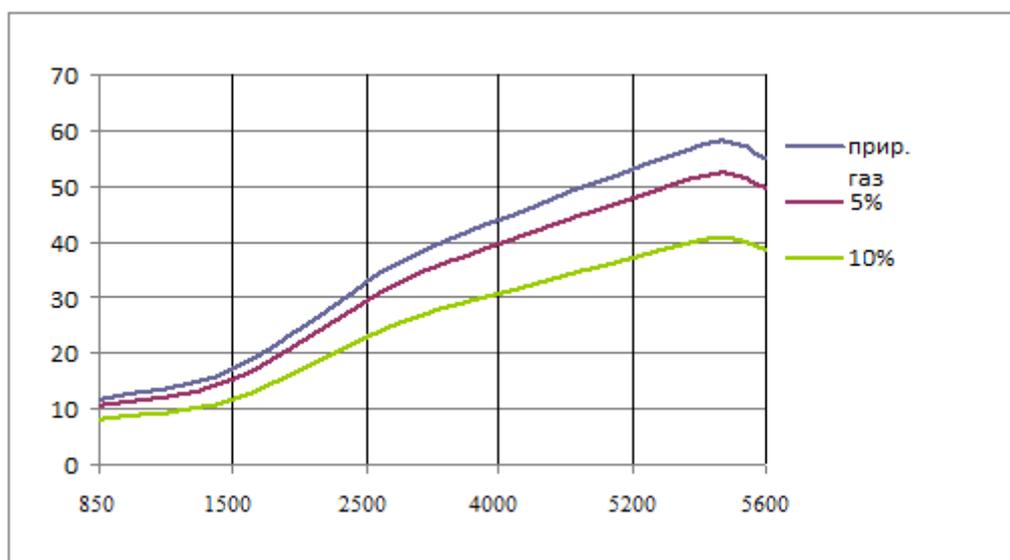


Рисунок 7.2 – Влияние добавки водорода на изменения мощности при работе с различной частотой вращения коленчатого вала

Следовательно, раз добавка водорода повышает энергетические показатели, то следовательно она снижает удельный эффективный расход топлива причем в той же пропорции, как это показано на рисунке 7.3. Водород это самый энергоемкий газ на единицу своей массы, следовательно вводя в цилиндр 5% водорода по массе топлива мы имеем 10% снижение суммарной массы смесового топлива при сохранении его энергоемкости, что и отражается на характеристиках часового расхода топлива приведенных на рисунке 7.4.

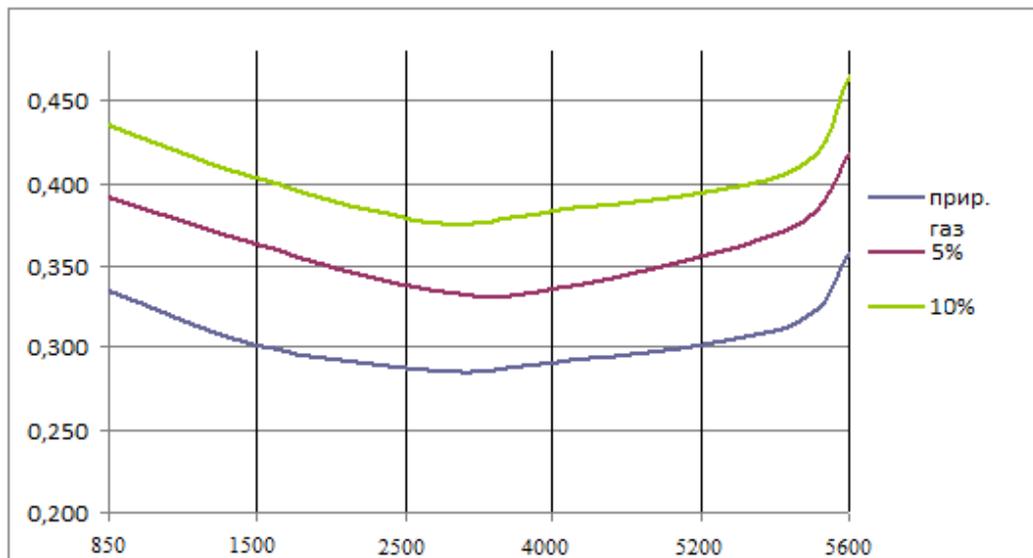


Рисунок 7.3 – Влияние добавки водорода на эффективный удельный расход топлива при работе с различной частотой вращения коленчатого вала

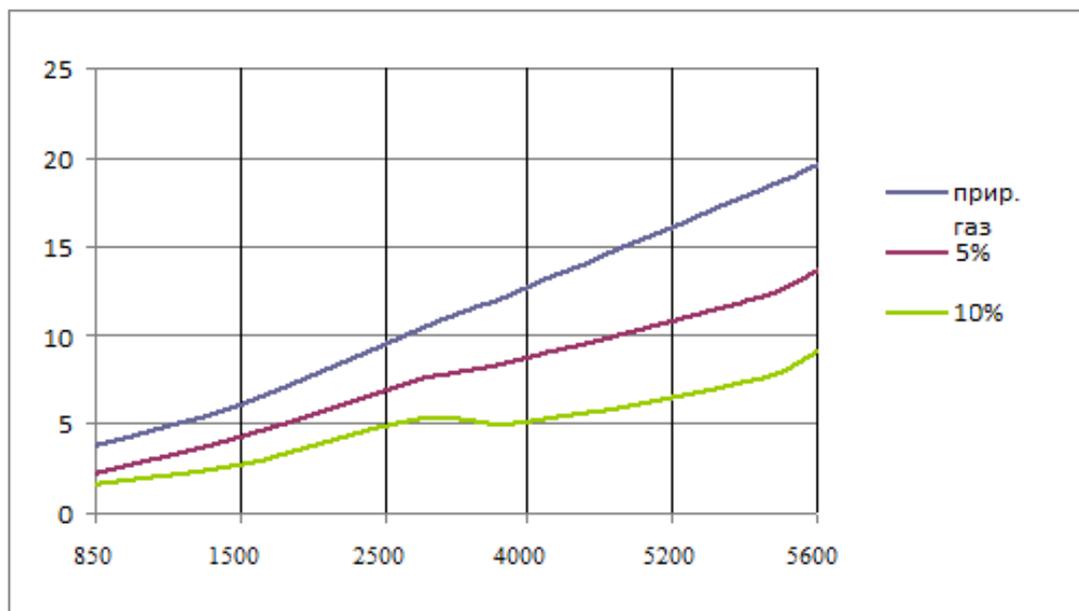


Рисунок 7.4 – Влияние добавки водорода на часового расхода топлива при работе с различной частотой вращения коленчатого вала

Так как тепловой расчет проводился по методике И.И.Вибе то мы можем оценить как по результатам расчетов изменились характеристики тепловыделения и жесткости сгорания, которые проиллюстрированы на рисунках 7.5 и 7.6.

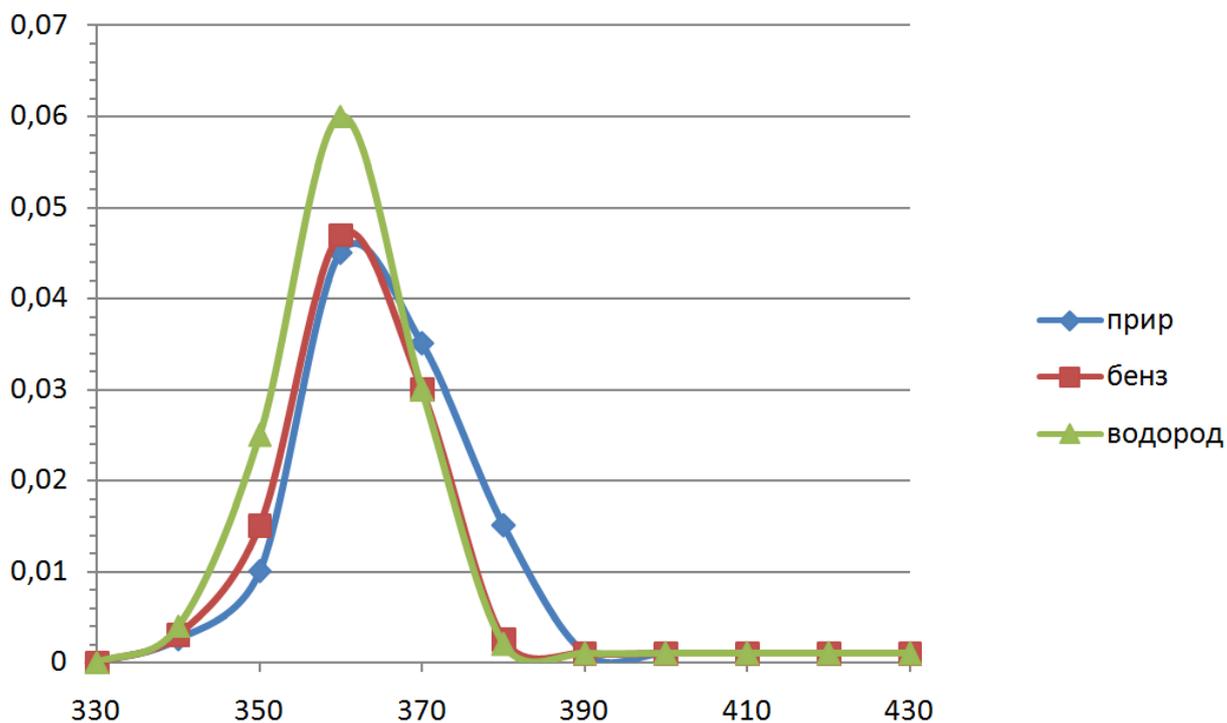


Рисунок 7.5 – Влияние добавки водорода на жесткость процесса сгорания.

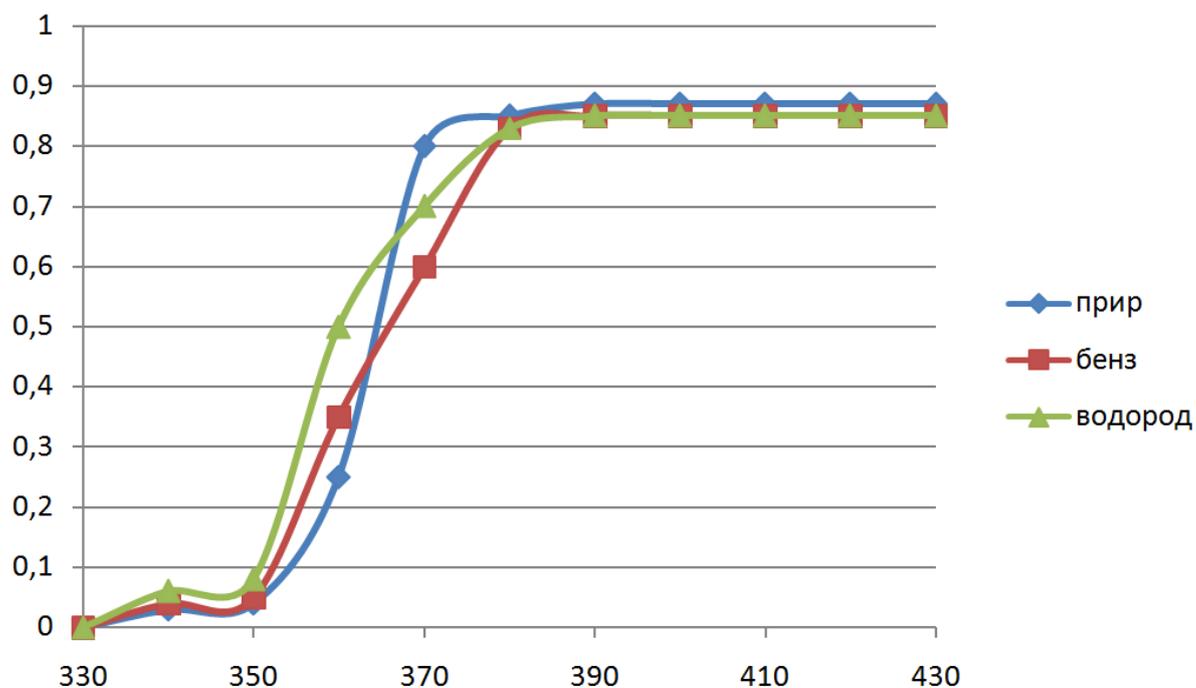


Рисунок 7.6 - Влияние добавки водорода на характеристику тепловыделения при работе на бензине, на СПГ и на природном газе с добавкой 5% от массы топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе применен способ повышения эффективности процесса сгорания газопоршневого ДВС за счет активирующей добавки, в роли которой выступила добавка водорода. Полученные результаты показали значительную эффективность применения добавки водорода для повышения энергетических показателей работы газопоршневого ДВС, особенно если добавлять водород на такте сжатия непосредственно в камеру сгорания, как это предложено и реализовано в данной работе. Проведенные расчеты основных параметров работы двигателя и нагрузок в КШМ показали, повышение энергетических показателей работы при добавке 5% водорода от массы СПГ – эффективная мощность увеличилась на 5-7%, а увеличение крутящего момента также составило 5-7%, при этом эффективный КПД двигателя при использовании предложенного топлива по результатам расчета увеличивается в среднем на 10-15%, что говорит о целесообразности дальнейших исследований по вопросу повышения эффективности процесса сгорания за счет добавки водорода в углеводородное топливо, особенно если есть возможность подавать его непосредственно в цилиндр, для недопущения эффекта вытеснения при впуске в коллектор.

В разделе экологичность и безопасность проекта была проведена оценка влияния добавки водорода на токсичность продуктов сгорания и взрывопожаро- безопасность автомобиля.

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.//DepartmentofMechanicalEngineering, 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 HuanL. Study of air fuel ratio on engineperformance ofdirectinjection hydrogen-fueled engine [Text] / Lee KarHuan //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 // InstitutoTecnológico 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 [Текст]. В 3-х т. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982.
- 9 Кузнецов В.Р., Собольников В.А. “Турбулентность и горение”[Текст]. М. Наука, 1986.
- 10 Войнов В.В. “Процессы сгорания в двигателях внутреннего сгорания”[Текст]. М. Наука, 1984.

- 11 Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания”[Текст]. М. Машиностроение, 1981.
- 12 Nlootat G., et al, A Model for Converting SI Engine Flame Arrival Signals into Flame Contours [Текст], 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 [Текст], 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 [Текст], 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 [Текст] / 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 [Текст] / 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 [Текст] / 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 [Текст] / A.H. Shamekhi, N. Khatibzadeh, A. Shamekhi // Iran. J. Chem. Chem. Eng. Vol. 27, No.1, 2008. - С. 73-83.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1 - Результаты теплового расчета проектируемого газопоршневого двигателя, при $n = 800 \text{ мин}^{-1}$

Давление, МПа	$\sigma \cdot 10^{-2}$	$\psi(\varphi)$	Кэф. молекулярного изменения смеси	Средний коэффициент изменения смеси на участке	Характеристика тепловыделения	Угол от начала сгорания, град. ПКВ	Угол до ВМТ, град. ПКВ	Объем рабочего тела, м ³	Предполагаемая температура, К	Расчетная температура, К	Средняя температура на участке, К	Доля топлива, сгоревшего на участке	Сред. знач. доли топлива сгор. на участке	K_{1-2}	K_{1-2}
1,5340	0,0630	1,2992	1,0000	1,0000	0,0000	0	-18	0,1453	774,8805	779,8930	774,0524	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,5828	0,0563	1,2672	1,0000	1,0000	0,0000	1	-17	0,1417	773,2242	784,8006	775,5150	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,6317	0,0499	1,2370	1,0000	1,0000	0,0000	2	-16	0,1384	777,8057	789,6462	780,0785	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,6804	0,0439	1,2086	1,0000	1,0000	0,0001	3	-15	0,1352	782,3513	794,5284	784,6740	0,0001	0,0001	1,2590	8,7220
1,7290	0,0383	1,1819	1,0000	1,0001	0,0002	4	-14	0,1322	786,9967	799,6092	789,4786	0,0002	0,0003	1,2590	8,7219
1,7775	0,0331	1,1570	1,0001	1,0002	0,0005	5	-13	0,1294	791,9606	805,1193	794,7559	0,0003	0,0006	1,2590	8,7218
1,8264	0,0282	1,1339	1,0002	1,0004	0,0012	6	-12	0,1268	797,5513	811,3624	800,8618	0,0006	0,0011	1,2590	8,7217
1,8761	0,0237	1,1127	1,0005	1,0006	0,0023	7	-11	0,1245	804,1722	818,7169	808,2481	0,0009	0,0018	1,2590	8,7215
1,9274	0,0196	1,0932	1,0008	1,0011	0,0041	8	-10	0,1223	812,3240	827,6361	817,4644	0,0013	0,0027	1,2590	8,7213
1,9813	0,0159	1,0755	1,0014	1,0017	0,0068	9	-9	0,1203	822,6048	838,6444	829,1552	0,0019	0,0039	1,2590	8,7210
2,0389	0,0126	1,0597	1,0021	1,0027	0,0107	10	-8	0,1185	835,7056	852,3310	844,0535	0,0027	0,0054	1,2590	8,7207
2,1018	0,0096	1,0458	1,0032	1,0039	0,0160	11	-7	0,1170	852,4014	869,3374	862,9684	0,0036	0,0072	1,2591	8,7204
2,1716	0,0071	1,0336	1,0047	1,0056	0,0232	12	-6	0,1156	873,5355	890,3405	886,7662	0,0047	0,0094	1,2591	8,7202
2,2501	0,0049	1,0234	1,0065	1,0077	0,0326	13	-5	0,1145	899,9970	916,0279	916,3432	0,0060	0,0120	1,2591	8,7200
2,3392	0,0031	1,0150	1,0089	1,0104	0,0446	14	-4	0,1135	932,6895	947,0675	952,5901	0,0075	0,0149	1,2591	8,7199
2,4406	0,0018	1,0084	1,0119	1,0137	0,0595	15	-3	0,1128	972,4907	984,0692	996,3471	0,0091	0,0183	1,2591	8,7201
2,5562	0,0008	1,0037	1,0156	1,0178	0,0778	16	-2	0,1123	1020,2036	1027,5421	1048,3517	0,0110	0,0220	1,2591	8,7205
2,6872	0,0002	1,0009	1,0200	1,0226	0,0997	17	-1	0,1120	1076,4998	1077,8466	1109,1789	0,0130	0,0260	1,2590	8,7212
2,8347	0,0000	1,0000	1,0252	1,0282	0,1257	18	0	0,1119	1141,8579	1135,1471	1179,1795	0,0151	0,0302	1,2590	8,7222
2,9990	0,0002	1,0009	1,0312	1,0347	0,1559	19	1	0,1120	1216,5010	1199,3670	1258,4196	0,0173	0,0346	1,2589	8,7236
3,1798	0,0008	1,0037	1,0382	1,0421	0,1905	20	2	0,1123	1300,3382	1270,1531	1346,6278	0,0195	0,0390	1,2589	8,7253
3,3757	0,0018	1,0084	1,0460	1,0503	0,2295	21	3	0,1128	1392,9174	1346,8526	1443,1562	0,0216	0,0432	1,2588	8,7272
3,5846	0,0031	1,0150	1,0546	1,0593	0,2727	22	4	0,1135	1493,3950	1428,5088	1546,9621	0,0236	0,0472	1,2588	8,7293
3,8031	0,0049	1,0234	1,0641	1,0691	0,3199	23	5	0,1145	1600,5292	1513,8776	1656,6154	0,0253	0,0507	1,2587	8,7314

Продолжение таблицы А1

4,0273	0,0071	1,0336	1,0742	1,0796	0,3705	24	6	0,1156	1712,7015	1601,4675	1770,3346	0,0267	0,0535	1,2586	8,7335
4,2520	0,0096	1,0458	1,0849	1,0905	0,4240	25	7	0,1170	1827,9676	1689,6010	1886,0527	0,0278	0,0555	1,2586	8,7353
4,4716	0,0126	1,0597	1,0960	1,1017	0,4795	26	8	0,1185	1944,1378	1776,4942	2001,5093	0,0283	0,0566	1,2585	8,7369
4,6802	0,0159	1,0755	1,1074	1,1130	0,5361	27	9	0,1203	2058,8807	1860,3491	2114,3621	0,0283	0,0566	1,2585	8,7380
4,8715	0,0196	1,0932	1,1187	1,1243	0,5927	28	10	0,1223	2169,8435	1939,4509	2222,3114	0,0277	0,0554	1,2584	8,7386
5,0401	0,0237	1,1127	1,1298	1,1351	0,6481	29	11	0,1245	2274,7792	2012,2617	2323,2244	0,0266	0,0532	1,2584	8,7387
5,1808	0,0282	1,1339	1,1405	1,1455	0,7013	30	12	0,1268	2371,6696	2077,5038	2415,2519	0,0250	0,0499	1,2585	8,7382
5,2897	0,0331	1,1570	1,1505	1,1550	0,7512	31	13	0,1294	2458,8342	2134,2247	2496,9246	0,0229	0,0458	1,2585	8,7373
5,3642	0,0383	1,1819	1,1596	1,1637	0,7970	32	14	0,1322	2535,0151	2181,8393	2567,2239	0,0205	0,0410	1,2585	8,7361
5,4033	0,0439	1,2086	1,1678	1,1714	0,8380	33	15	0,1352	2599,4327	2220,1447	2625,6192	0,0179	0,0357	1,2586	8,7345
5,4072	0,0499	1,2370	1,1750	1,1780	0,8738	34	16	0,1384	2651,8057	2249,3086	2672,0706	0,0152	0,0303	1,2586	8,7327
5,3779	0,0563	1,2672	1,1811	1,1836	0,9041	35	17	0,1417	2692,3354	2269,8305	2706,9960	0,0125	0,0250	1,2587	8,7309
5,3185	0,0630	1,2992	1,1861	1,1881	0,9291	36	18	0,1453	2721,6565	2282,4813	2731,2069	0,0100	0,0200	1,2588	8,7292
5,2329	0,0701	1,3328	1,1901	1,1916	0,9491	37	19	0,1491	2740,7573	2288,2255	2745,8188	0,0077	0,0155	1,2588	8,7276
5,1258	0,0775	1,3682	1,1932	1,1943	0,9645	38	20	0,1530	2750,8803	2288,1366	2752,1456	0,0058	0,0116	1,2589	8,7262
5,0017	0,0853	1,4052	1,1955	1,1963	0,9761	39	21	0,1572	2753,4110	2283,3127	2751,5898	0,0042	0,0083	1,2589	8,7250
4,8654	0,0935	1,4440	1,1972	1,1978	0,9844	40	22	0,1615	2749,7685	2274,8019	2745,5387	0,0029	0,0058	1,2589	8,7241
4,7210	0,1020	1,4843	1,1983	1,1987	0,9902	41	23	0,1660	2741,3088	2263,5457	2735,2795	0,0019	0,0039	1,2590	8,7234
4,5721	0,1108	1,5263	1,1991	1,1994	0,9941	42	24	0,1707	2729,2501	2250,3422	2721,9380	0,0012	0,0025	1,2590	8,7229
4,4214	0,1200	1,5700	1,1996	1,1998	0,9966	43	25	0,1756	2714,6258	2235,8324	2706,4457	0,0008	0,0015	1,2590	8,7225
4,2714	0,1295	1,6152	1,1999	1,2000	0,9981	44	26	0,1807	2698,2655	2220,5038	2689,5330	0,0004	0,0009	1,2590	8,7223
4,1235	0,1394	1,6620	1,2001	1,2001	0,9990	45	27	0,1859	2680,8005	2204,7093	2671,7437	0,0002	0,0005	1,2590	8,7222

Таблица А2 - Результаты теплового расчета проектируемого газопоршневого двигателя работающего на СПГ=90% и Н₂
= 10%, при n = 800 мин⁻¹

Давление, МПа	$\sigma \cdot 10^{-2}$	$\psi(\varphi)$	Кэф. молекулярного изменения смеси	Средний коэффициент изменения смеси на участке	Характеристика тепло-выделения	Угол от начала сгорания, град. ПКВ	Угол до ВМТ, град. ПКВ	Объем рабочего тела, м ³	Предполагаемая температура, К	Расчетная температура, К	Средняя температура на участке, К	Доля топлива, сгоревшего на участке	Сред. знач. доли топлива сгор. на участке	k ₁₋₂	K ₁₋₂
1,6954	0,0439	1,2086	1,0000	1,0000	0,0000	0	-15	0,1352	793,2049	797,8084	795,3180	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,7437	0,0383	1,1819	1,0000	1,0000	0,0000	1	-14	0,1322	797,4311	802,3040	799,6454	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,7913	0,0331	1,1570	1,0000	1,0000	0,0000	2	-13	0,1294	801,8598	806,8736	804,4070	0,0001	0,0002	1,2590	8,7220
1,8382	0,0282	1,1339	1,0000	1,0001	0,0002	3	-12	0,1268	806,9541	811,8333	810,1607	0,0002	0,0005	1,2590	8,7219
1,8850	0,0237	1,1127	1,0001	1,0002	0,0007	4	-11	0,1245	813,3673	817,6314	817,6531	0,0005	0,0010	1,2590	8,7217
1,9325	0,0196	1,0932	1,0002	1,0004	0,0017	5	-10	0,1223	821,9390	824,8467	827,8126	0,0009	0,0018	1,2590	8,7215
1,9819	0,0159	1,0755	1,0005	1,0007	0,0035	6	-9	0,1203	833,6861	834,1814	841,7366	0,0015	0,0030	1,2590	8,7213
2,0349	0,0126	1,0597	1,0009	1,0012	0,0065	7	-8	0,1185	849,7871	846,4503	860,6713	0,0023	0,0045	1,2590	8,7210
2,0935	0,0096	1,0458	1,0015	1,0020	0,0110	8	-7	0,1170	871,5556	862,5627	885,9790	0,0033	0,0066	1,2590	8,7207
2,1600	0,0071	1,0336	1,0024	1,0031	0,0175	9	-6	0,1156	900,4024	883,4951	919,0923	0,0045	0,0091	1,2591	8,7205
2,2371	0,0049	1,0234	1,0037	1,0046	0,0266	10	-5	0,1145	937,7822	910,2542	961,4531	0,0061	0,0121	1,2591	8,7204
2,3274	0,0031	1,0150	1,0054	1,0065	0,0387	11	-4	0,1135	985,1240	943,8274	1014,4343	0,0078	0,0157	1,2590	8,7206
2,4335	0,0018	1,0084	1,0076	1,0090	0,0544	12	-3	0,1128	1043,7446	985,1231	1079,2465	0,0099	0,0198	1,2590	8,7210
2,5581	0,0008	1,0037	1,0103	1,0120	0,0742	13	-2	0,1123	1114,7484	1034,8996	1156,8326	0,0121	0,0243	1,2590	8,7219
2,7031	0,0002	1,0009	1,0137	1,0158	0,0985	14	-1	0,1120	1198,9168	1093,6893	1247,7565	0,0146	0,0292	1,2590	8,7232
2,8699	0,0000	1,0000	1,0178	1,0202	0,1277	15	0	0,1119	1296,5962	1161,7208	1352,0959	0,0172	0,0344	1,2589	8,7250
3,0589	0,0002	1,0009	1,0226	1,0254	0,1621	16	1	0,1120	1407,5957	1238,8493	1469,3510	0,0198	0,0397	1,2588	8,7272
3,2693	0,0008	1,0037	1,0281	1,0313	0,2018	17	2	0,1123	1531,1063	1324,5014	1598,3815	0,0225	0,0449	1,2587	8,7297
3,4992	0,0018	1,0084	1,0344	1,0379	0,2467	18	3	0,1128	1665,6567	1417,6460	1737,3866	0,0249	0,0498	1,2587	8,7323
3,7449	0,0031	1,0150	1,0414	1,0451	0,2965	19	4	0,1135	1809,1166	1516,7978	1883,9364	0,0271	0,0541	1,2586	8,7350
4,0017	0,0049	1,0234	1,0489	1,0529	0,3506	20	5	0,1145	1958,7561	1620,0586	2035,0591	0,0288	0,0577	1,2585	8,7375
4,2632	0,0071	1,0336	1,0570	1,0612	0,4083	21	6	0,1156	2111,3620	1725,1986	2187,3846	0,0301	0,0602	1,2584	8,7397

Продолжение таблицы А2

4,5223	0,0096	1,0458	1,0654	1,0696	0,4685	22	7	0,1170	2263,4071	1829,7725	2337,3323	0,0308	0,0615	1,2584	8,7414
4,7711	0,0126	1,0597	1,0739	1,0782	0,5301	23	8	0,1185	2411,2574	1931,2630	2481,3290	0,0307	0,0615	1,2583	8,7425
5,0015	0,0159	1,0755	1,0825	1,0867	0,5915	24	9	0,1203	2551,4005	2027,2380	2616,0361	0,0300	0,0600	1,2583	8,7429
5,2058	0,0196	1,0932	1,0909	1,0949	0,6515	25	10	0,1223	2680,6718	2115,5073	2738,5636	0,0286	0,0571	1,2583	8,7426
5,3776	0,0237	1,1127	1,0988	1,1025	0,7086	26	11	0,1245	2796,4554	2194,2624	2846,6483	0,0265	0,0530	1,2583	8,7417
5,5115	0,0282	1,1339	1,1062	1,1096	0,7617	27	12	0,1268	2896,8412	2262,1848	2938,7803	0,0240	0,0479	1,2584	8,7402
5,6042	0,0331	1,1570	1,1129	1,1159	0,8096	28	13	0,1294	2980,7195	2318,5135	3014,2629	0,0211	0,0421	1,2585	8,7382
5,6547	0,0383	1,1819	1,1188	1,1213	0,8517	29	14	0,1322	3047,8063	2363,0628	3073,2019	0,0179	0,0359	1,2585	8,7360
5,6636	0,0439	1,2086	1,1238	1,1259	0,8876	30	15	0,1352	3098,5976	2396,1904	3116,4278	0,0148	0,0297	1,2586	8,7337
5,6339	0,0499	1,2370	1,1279	1,1296	0,9173	31	16	0,1384	3134,2580	2418,7203	3145,3588	0,0118	0,0237	1,2587	8,7314
5,5697	0,0563	1,2672	1,1313	1,1325	0,9410	32	17	0,1417	3156,4596	2431,8303	3161,8252	0,0091	0,0183	1,2588	8,7292
5,4764	0,0630	1,2992	1,1338	1,1348	0,9592	33	18	0,1453	3167,1908	2436,9187	3167,8760	0,0068	0,0136	1,2588	8,7274
5,3598	0,0701	1,3328	1,1357	1,1364	0,9728	34	19	0,1491	3168,5611	2435,4671	3165,5927	0,0049	0,0097	1,2589	8,7259
5,2256	0,0775	1,3682	1,1371	1,1375	0,9826	35	20	0,1530	3162,6242	2428,9171	3156,9319	0,0033	0,0067	1,2589	8,7246
5,0793	0,0853	1,4052	1,1380	1,1383	0,9892	36	21	0,1572	3151,2395	2418,5737	3143,6115	0,0022	0,0044	1,2589	8,7237
4,9253	0,0935	1,4440	1,1386	1,1388	0,9936	37	22	0,1615	3135,9836	2405,5434	3127,0488	0,0014	0,0028	1,2590	8,7231
4,7676	0,1020	1,4843	1,1390	1,1391	0,9964	38	23	0,1660	3118,1140	2390,7088	3108,3448	0,0008	0,0017	1,2590	8,7227
4,6091	0,1108	1,5263	1,1392	1,1393	0,9981	39	24	0,1707	3098,5756	2374,7337	3088,3078	0,0005	0,0009	1,2590	8,7224
4,4517	0,1200	1,5700	1,1394	1,1394	0,9990	40	25	0,1756	3078,0400	2358,0905	3067,4998	0,0003	0,0005	1,2590	8,7222

Таблица А3 - Результаты теплового расчета проектируемого газопоршневого двигателя, при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

Давление, МПа	$\sigma \cdot 10^2$	$\psi(\varphi)$	Коэф. молекулярного изменения смеси	Средний коэффициент молекулярного изменения смеси на участке	Характеристика тепловыделения	Угол от начала сгорания, град. ПКВ	Угол до ВМТ, град. ПКВ	Объем рабочего тела, м ³	Предполагаемая температура, К	Расчетная температура, К	Средняя температура на участке, К	Доля топлива, сгоревшего на участке	Сред. знач. доли топлива сгор. на участке	k_{1-2}	K_{1-2}
1,4279	0,0775	1,3682	1,0000	1,0000	0,0000	0	-20	0,1530	759,6077	764,7787	759,3410	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,4758	0,0701	1,3328	1,0000	1,0000	0,0000	1	-19	0,1491	759,0743	769,8757	761,4609	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,5241	0,0630	1,2992	1,0000	1,0000	0,0000	2	-18	0,1453	763,8474	774,9205	766,2124	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,5728	0,0563	1,2672	1,0000	1,0000	0,0000	3	-17	0,1417	768,5773	779,9702	770,9579	0,0000	0,0001	1,2590	8,7220
1,6217	0,0499	1,2370	1,0000	1,0000	0,0001	4	-16	0,1384	773,3384	785,1217	775,7960	0,0001	0,0002	1,2590	8,7219

Продолжение таблицы АЗ

1,6708	0,0439	1,2086	1,0001	1,0001	0,0003	5	-15	0,1352	778,2536	790,5154	780,8763	0,0002	0,0004	1,2590	8,7219
1,7204	0,0383	1,1819	1,0002	1,0002	0,0008	6	-14	0,1322	783,4991	796,3384	786,4032	0,0004	0,0007	1,2590	8,7218
1,7705	0,0331	1,1570	1,0003	1,0004	0,0015	7	-13	0,1294	789,3073	802,8257	792,6384	0,0006	0,0011	1,2590	8,7217
1,8216	0,0282	1,1339	1,0005	1,0007	0,0026	8	-12	0,1268	795,9694	810,2617	799,9029	0,0009	0,0017	1,2590	8,7215
1,8742	0,0237	1,1127	1,0009	1,0011	0,0043	9	-11	0,1245	803,8364	818,9794	808,5772	0,0012	0,0025	1,2590	8,7213
1,9289	0,0196	1,0932	1,0014	1,0017	0,0068	10	-10	0,1223	813,3180	829,3583	819,0994	0,0017	0,0034	1,2590	8,7211
1,9866	0,0159	1,0755	1,0020	1,0025	0,0102	11	-9	0,1203	824,8807	841,8201	831,9613	0,0023	0,0046	1,2590	8,7209
2,0482	0,0126	1,0597	1,0030	1,0036	0,0148	12	-8	0,1185	839,0420	856,8220	847,7021	0,0030	0,0060	1,2590	8,7206
2,1148	0,0096	1,0458	1,0042	1,0049	0,0209	13	-7	0,1170	856,3621	874,8467	866,8973	0,0039	0,0077	1,2591	8,7204
2,1876	0,0071	1,0336	1,0057	1,0067	0,0286	14	-6	0,1156	877,4325	896,3892	890,1459	0,0048	0,0097	1,2591	8,7201
2,2679	0,0049	1,0234	1,0077	1,0089	0,0382	15	-5	0,1145	902,8593	921,9401	918,0510	0,0060	0,0119	1,2591	8,7200
2,3569	0,0031	1,0150	1,0100	1,0115	0,0502	16	-4	0,1135	933,2428	951,9645	951,1979	0,0072	0,0144	1,2591	8,7200
2,4558	0,0018	1,0084	1,0129	1,0147	0,0646	17	-3	0,1128	969,1529	986,8787	990,1264	0,0086	0,0172	1,2591	8,7201
2,5658	0,0008	1,0037	1,0164	1,0184	0,0819	18	-2	0,1123	1011,0998	1027,0230	1035,3008	0,0101	0,0203	1,2591	8,7204
2,6876	0,0002	1,0009	1,0205	1,0228	0,1021	19	-1	0,1120	1059,5018	1072,6338	1087,0763	0,0118	0,0236	1,2590	8,7210
2,8217	0,0000	1,0000	1,0252	1,0279	0,1257	20	0	0,1119	1114,6509	1123,8157	1145,6650	0,0135	0,0270	1,2590	8,7217
2,9682	0,0002	1,0009	1,0306	1,0336	0,1527	21	1	0,1120	1176,6791	1180,5150	1211,1030	0,0153	0,0305	1,2590	8,7227
3,1266	0,0008	1,0037	1,0367	1,0401	0,1832	22	2	0,1123	1245,5269	1242,4988	1283,2217	0,0170	0,0341	1,2589	8,7240
3,2960	0,0018	1,0084	1,0435	1,0473	0,2173	23	3	0,1128	1320,9166	1309,3404	1361,6259	0,0188	0,0376	1,2589	8,7254
3,4748	0,0031	1,0150	1,0511	1,0551	0,2549	24	4	0,1135	1402,3353	1380,4138	1445,6816	0,0205	0,0409	1,2588	8,7270
3,6606	0,0049	1,0234	1,0592	1,0636	0,2958	25	5	0,1145	1489,0278	1454,8997	1534,5156	0,0220	0,0439	1,2588	8,7287
3,8505	0,0071	1,0336	1,0680	1,0727	0,3397	26	6	0,1156	1580,0034	1531,8029	1627,0300	0,0233	0,0466	1,2587	8,7303
4,0412	0,0096	1,0458	1,0774	1,0822	0,3863	27	7	0,1170	1674,0566	1609,9823	1721,9300	0,0243	0,0487	1,2587	8,7319
4,2287	0,0126	1,0597	1,0871	1,0921	0,4350	28	8	0,1185	1769,8034	1688,1914	1817,7667	0,0251	0,0502	1,2586	8,7333
4,4089	0,0159	1,0755	1,0972	1,1023	0,4852	29	9	0,1203	1865,7299	1765,1274	1912,9911	0,0255	0,0509	1,2586	8,7345
4,5775	0,0196	1,0932	1,1074	1,1125	0,5361	30	10	0,1223	1960,2523	1839,4871	2006,0179	0,0255	0,0509	1,2586	8,7354
4,7302	0,0237	1,1127	1,1176	1,1226	0,5870	31	11	0,1245	2051,7836	1910,0231	2095,2933	0,0251	0,0501	1,2585	8,7360
4,8632	0,0282	1,1339	1,1276	1,1325	0,6371	32	12	0,1268	2138,8031	1975,6005	2179,3636	0,0242	0,0485	1,2585	8,7362
4,9732	0,0331	1,1570	1,1373	1,1419	0,6856	33	13	0,1294	2219,9242	2035,2458	2256,9397	0,0230	0,0461	1,2585	8,7360
5,0574	0,0383	1,1819	1,1466	1,1509	0,7317	34	14	0,1322	2293,9552	2088,1887	2326,9525	0,0215	0,0430	1,2585	8,7355
5,1141	0,0439	1,2086	1,1552	1,1591	0,7747	35	15	0,1352	2359,9497	2133,8915	2388,5960	0,0197	0,0393	1,2586	8,7347
5,1425	0,0499	1,2370	1,1630	1,1666	0,8140	36	16	0,1384	2417,2423	2172,0651	2441,3557	0,0176	0,0353	1,2586	8,7336

Продолжение таблицы А3

5,1427	0,0563	1,2672	1,1701	1,1732	0,8493	37	17	0,1417	2465,4691	2202,6705	2485,0194	0,0155	0,0310	1,2587	8,7323
5,1159	0,0630	1,2992	1,1763	1,1790	0,8803	38	18	0,1453	2504,5697	2225,9059	2519,6707	0,0133	0,0266	1,2587	8,7310
5,0640	0,0701	1,3328	1,1816	1,1839	0,9068	39	19	0,1491	2534,7718	2242,1807	2545,6655	0,0111	0,0223	1,2587	8,7296
4,9898	0,0775	1,3682	1,1861	1,1879	0,9291	40	20	0,1530	2556,5592	2252,0771	2563,5931	0,0091	0,0182	1,2588	8,7282
4,8964	0,0853	1,4052	1,1897	1,1912	0,9473	41	21	0,1572	2570,6269	2256,3045	2574,2259	0,0072	0,0145	1,2588	8,7270
4,7872	0,0935	1,4440	1,1926	1,1938	0,9618	42	22	0,1615	2577,8248	2255,6491	2578,4608	0,0056	0,0112	1,2589	8,7259
4,6657	0,1020	1,4843	1,1949	1,1957	0,9730	43	23	0,1660	2579,0968	2250,9233	2577,2584	0,0042	0,0085	1,2589	8,7249
4,5352	0,1108	1,5263	1,1966	1,1972	0,9814	44	24	0,1707	2575,4200	2242,9196	2571,5841	0,0031	0,0062	1,2589	8,7241
4,3989	0,1200	1,5700	1,1978	1,1982	0,9876	45	25	0,1756	2567,7482	2232,3728	2562,3574	0,0022	0,0044	1,2589	8,7235
4,2594	0,1295	1,6152	1,1987	1,1990	0,9920	46	26	0,1807	2556,9666	2219,9325	2550,4124	0,0015	0,0030	1,2590	8,7230
4,1189	0,1394	1,6620	1,1993	1,1995	0,9950	47	27	0,1859	2543,8581	2206,1475	2536,4713	0,0010	0,0020	1,2590	8,7227
3,9793	0,1495	1,7103	1,1997	1,1998	0,9970	48	28	0,1913	2529,0844	2191,4615	2521,1324	0,0006	0,0013	1,2590	8,7224
3,8419	0,1600	1,7602	1,1999	1,2000	0,9982	49	29	0,1969	2513,1804	2176,2182	2504,8705	0,0004	0,0008	1,2590	8,7223
3,7077	0,1708	1,8115	1,2001	1,2001	0,9990	50	30	0,2026	2496,5606	2160,6725	2488,0465	0,0002	0,0005	1,2590	8,7222

Таблица А4 - Результаты теплового расчета проектируемого газопоршневого двигателя работающего на СПГ=90% и Н₂ = 10%, при n = 1500 мин⁻¹

Давление, МПа	$\sigma \cdot 10^2$	$\psi(\varphi)$	Кэф. молекулярного изменения смеси	Средний коэффициент молекулярного изменения смеси на участке	Характеристика тепловыделения	Угол от начала сгорания, град. ПКВ	Угол до ВМТ, град. ПКВ	Объем рабочего тела, м ³	Предполагаемая температура, К	Расчетная температура, К	Средняя температура на участке, К	Доля топлива, сгоревшего на участке	Сред. знач. доли топлива сгор. на участке	k_{1-2}	K_{1-2}
1,5340	0,0630	1,2992	1,0000	1,0000	0,0000	0	-18	0,1453	774,8805	779,8954	774,0539	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,5829	0,0563	1,2672	1,0000	1,0000	0,0000	1	-17	0,1417	773,2273	784,8358	775,5391	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,6318	0,0499	1,2370	1,0000	1,0000	0,0000	2	-16	0,1384	777,8510	789,8098	780,2061	0,0001	0,0001	1,2590	8,7220
1,6808	0,0439	1,2086	1,0000	1,0000	0,0001	3	-15	0,1352	782,5613	795,0091	785,0875	0,0001	0,0003	1,2590	8,7219
1,7300	0,0383	1,1819	1,0001	1,0001	0,0004	4	-14	0,1322	787,6137	800,7087	790,4926	0,0003	0,0006	1,2590	8,7218
1,7800	0,0331	1,1570	1,0001	1,0002	0,0011	5	-13	0,1294	793,3716	807,2660	796,8385	0,0006	0,0011	1,2590	8,7217
1,8314	0,0282	1,1339	1,0003	1,0004	0,0022	6	-12	0,1268	800,3055	815,1186	804,6475	0,0009	0,0019	1,2590	8,7215
1,8850	0,0237	1,1127	1,0006	1,0008	0,0040	7	-11	0,1245	808,9895	824,7799	814,5428	0,0014	0,0028	1,2590	8,7212
1,9419	0,0196	1,0932	1,0010	1,0012	0,0069	8	-10	0,1223	820,0962	836,8320	827,2415	0,0021	0,0041	1,2590	8,7210

Продолжение таблицы А4

2,0036	0,0159	1,0755	1,0015	1,0019	0,0110	9	-9	0,1203	834,3869	851,9147	843,5424	0,0029	0,0057	1,2590	8,7206
2,0716	0,0126	1,0597	1,0023	1,0029	0,0167	10	-8	0,1185	852,6979	870,7101	864,3094	0,0038	0,0077	1,2591	8,7203
2,1475	0,0096	1,0458	1,0034	1,0041	0,0244	11	-7	0,1170	875,9208	893,9225	890,4481	0,0050	0,0100	1,2591	8,7201
2,2334	0,0071	1,0336	1,0048	1,0057	0,0343	12	-6	0,1156	904,9754	922,2514	922,8758	0,0063	0,0126	1,2591	8,7199
2,3309	0,0049	1,0234	1,0066	1,0076	0,0470	13	-5	0,1145	940,7762	956,3596	962,4834	0,0078	0,0157	1,2591	8,7199
2,4420	0,0031	1,0150	1,0087	1,0101	0,0627	14	-4	0,1135	984,1906	996,8360	1010,0907	0,0095	0,0191	1,2591	8,7202
2,5680	0,0018	1,0084	1,0114	1,0130	0,0817	15	-3	0,1128	1035,9907	1044,1535	1066,3949	0,0114	0,0228	1,2590	8,7207
2,7102	0,0008	1,0037	1,0146	1,0164	0,1045	16	-2	0,1123	1096,7990	1098,6257	1131,9156	0,0134	0,0267	1,2590	8,7215
2,8694	0,0002	1,0009	1,0183	1,0205	0,1313	17	-1	0,1120	1167,0322	1160,3639	1206,9387	0,0154	0,0308	1,2590	8,7227
3,0454	0,0000	1,0000	1,0226	1,0251	0,1621	18	0	0,1119	1246,8451	1229,2393	1291,4629	0,0175	0,0350	1,2589	8,7242
3,2377	0,0002	1,0009	1,0275	1,0302	0,1971	19	1	0,1120	1336,0807	1304,8526	1385,1558	0,0196	0,0392	1,2589	8,7259
3,4445	0,0008	1,0037	1,0330	1,0360	0,2363	20	2	0,1123	1434,2309	1386,5176	1487,3224	0,0215	0,0431	1,2588	8,7279
3,6634	0,0018	1,0084	1,0390	1,0422	0,2794	21	3	0,1128	1540,4139	1473,2595	1596,8931	0,0234	0,0467	1,2587	8,7299
3,8909	0,0031	1,0150	1,0455	1,0490	0,3261	22	4	0,1135	1653,3722	1563,8333	1712,4336	0,0249	0,0498	1,2587	8,7320
4,1226	0,0049	1,0234	1,0524	1,0561	0,3759	23	5	0,1145	1771,4950	1656,7611	1832,1810	0,0261	0,0523	1,2586	8,7340
4,3536	0,0071	1,0336	1,0597	1,0635	0,4282	24	6	0,1156	1892,8671	1750,3882	1954,1042	0,0270	0,0540	1,2585	8,7357
4,5782	0,0096	1,0458	1,0673	1,0711	0,4821	25	7	0,1170	2015,3413	1842,9558	2075,9870	0,0274	0,0548	1,2585	8,7371
4,7907	0,0126	1,0597	1,0749	1,0787	0,5369	26	8	0,1185	2136,6327	1932,6843	2195,5299	0,0273	0,0546	1,2585	8,7381
4,9853	0,0159	1,0755	1,0825	1,0862	0,5915	27	9	0,1203	2254,4272	2017,8622	2310,4620	0,0267	0,0534	1,2584	8,7386
5,1568	0,0196	1,0932	1,0900	1,0935	0,6449	28	10	0,1223	2366,4968	2096,9335	2418,6551	0,0256	0,0513	1,2584	8,7387
5,3005	0,0237	1,1127	1,0971	1,1005	0,6962	29	11	0,1245	2470,8134	2168,5763	2518,2321	0,0241	0,0483	1,2585	8,7383
5,4128	0,0282	1,1339	1,1039	1,1070	0,7445	30	12	0,1268	2565,6508	2231,7665	2607,6594	0,0222	0,0445	1,2585	8,7375
5,4914	0,0331	1,1570	1,1101	1,1128	0,7890	31	13	0,1294	2649,6679	2285,8221	2685,8170	0,0200	0,0401	1,2585	8,7363
5,5354	0,0383	1,1819	1,1156	1,1181	0,8291	32	14	0,1322	2721,9660	2330,4236	2752,0407	0,0177	0,0353	1,2586	8,7348
5,5449	0,0439	1,2086	1,1206	1,1227	0,8644	33	15	0,1352	2782,1153	2365,6092	2806,1326	0,0152	0,0304	1,2586	8,7331
5,5218	0,0499	1,2370	1,1248	1,1266	0,8947	34	16	0,1384	2830,1499	2391,7469	2848,3401	0,0127	0,0255	1,2587	8,7314
5,4687	0,0563	1,2672	1,1284	1,1298	0,9202	35	17	0,1417	2866,5303	2409,4841	2879,3051	0,0104	0,0208	1,2587	8,7298
5,3892	0,0630	1,2992	1,1313	1,1324	0,9410	36	18	0,1453	2892,0798	2419,6820	2899,9894	0,0082	0,0165	1,2588	8,7282
5,2875	0,0701	1,3328	1,1336	1,1344	0,9575	37	19	0,1491	2907,8991	2423,3398	2911,5839	0,0064	0,0127	1,2588	8,7268
5,1679	0,0775	1,3682	1,1353	1,1360	0,9702	38	20	0,1530	2915,2688	2421,5182	2915,4094	0,0048	0,0095	1,2589	8,7256
5,0347	0,0853	1,4052	1,1367	1,1371	0,9797	39	21	0,1572	2915,5499	2415,2675	2912,8209	0,0034	0,0069	1,2589	8,7246
4,8920	0,0935	1,4440	1,1376	1,1380	0,9866	40	22	0,1615	2910,0919	2405,5688	2905,1236	0,0024	0,0048	1,2589	8,7238

Продолжение таблицы А4

4,7432	0,1020	1,4843	1,1383	1,1385	0,9914	41	23	0,1660	2900,1553	2393,2909	2893,5064	0,0016	0,0033	1,2590	8,7232
4,5914	0,1108	1,5263	1,1388	1,1389	0,9947	42	24	0,1707	2886,8574	2379,1667	2878,9988	0,0011	0,0021	1,2590	8,7228
4,4389	0,1200	1,5700	1,1390	1,1391	0,9968	43	25	0,1756	2871,1403	2363,7852	2862,4507	0,0007	0,0013	1,2590	8,7225
4,2877	0,1295	1,6152	1,1392	1,1393	0,9982	44	26	0,1807	2853,7611	2347,5992	2844,5315	0,0004	0,0008	1,2590	8,7223
4,1390	0,1394	1,6620	1,1394	1,1394	0,9990	45	27	0,1859	2835,3018	2330,9420	2825,7460	0,0002	0,0005	1,2590	8,7222

Таблица А5 - Результаты теплового расчета проектируемого газопоршневого двигателя, при $n = 2800 \text{ мин}^{-1}$

Давление, МПа	$\sigma \cdot 10^{-2}$	$\psi(\varphi)$	Коэф. молекулярного изменения смеси	Средний коэффициент молекулярного изменения смеси на участке	Характеристика тепловыделения	Угол от начала сгорания, град. ПКВ	Угол до ВМТ, град. ПКВ	Объем рабочего тела, м ³	Предполагаемая температура, К	Расчетная температура, К	Средняя температура на участке, К	Доля топлива, сгоревшего на участке	Сред. знач. доли топлива сгор. на участке	k_{1-2}	K_{1-2}
1,2272	0,1108	1,5263	1,0000	1,0000	0,0000	0	-24	0,1707	728,3123	733,5977	729,0100	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,2711	0,1020	1,4843	1,0000	1,0000	0,0000	1	-23	0,1660	729,7078	738,8666	732,1931	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,3160	0,0935	1,4440	1,0000	1,0000	0,0000	2	-22	0,1615	734,6784	744,1321	737,1594	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,3620	0,0853	1,4052	1,0000	1,0000	0,0000	3	-21	0,1572	739,6403	749,4302	742,1362	0,0000	0,0001	1,2590	8,7220
1,4088	0,0775	1,3682	1,0000	1,0000	0,0001	4	-20	0,1530	744,6322	754,8231	747,1762	0,0001	0,0001	1,2590	8,7220
1,4566	0,0701	1,3328	1,0000	1,0001	0,0002	5	-19	0,1491	749,7202	760,4016	752,3604	0,0001	0,0003	1,2590	8,7219
1,5055	0,0630	1,2992	1,0001	1,0001	0,0005	6	-18	0,1453	755,0005	766,2871	757,8007	0,0002	0,0005	1,2590	8,7218
1,5555	0,0563	1,2672	1,0002	1,0003	0,0010	7	-17	0,1417	760,6009	772,6328	763,6418	0,0004	0,0008	1,2590	8,7218
1,6068	0,0499	1,2370	1,0003	1,0005	0,0017	8	-16	0,1384	766,6828	779,6251	770,0624	0,0006	0,0011	1,2590	8,7216
1,6598	0,0439	1,2086	1,0006	1,0007	0,0029	9	-15	0,1352	773,4420	787,4836	777,2755	0,0008	0,0016	1,2590	8,7215
1,7149	0,0383	1,1819	1,0009	1,0011	0,0045	10	-14	0,1322	781,1089	796,4605	785,5286	0,0011	0,0023	1,2590	8,7213
1,7724	0,0331	1,1570	1,0014	1,0017	0,0068	11	-13	0,1294	789,9483	806,8396	795,1029	0,0015	0,0031	1,2590	8,7211
1,8331	0,0282	1,1339	1,0020	1,0024	0,0099	12	-12	0,1268	800,2575	818,9331	806,3104	0,0020	0,0040	1,2590	8,7209
1,8975	0,0237	1,1127	1,0028	1,0033	0,0139	13	-11	0,1245	812,3634	833,0774	819,4911	0,0026	0,0052	1,2590	8,7206
1,9664	0,0196	1,0932	1,0038	1,0045	0,0191	14	-10	0,1223	826,6188	849,6278	835,0071	0,0032	0,0065	1,2591	8,7204
2,0408	0,0159	1,0755	1,0051	1,0059	0,0255	15	-9	0,1203	843,3955	868,9501	853,2360	0,0040	0,0080	1,2591	8,7202
2,1214	0,0126	1,0597	1,0067	1,0077	0,0336	16	-8	0,1185	863,0766	891,4110	874,5615	0,0049	0,0098	1,2591	8,7200
2,2092	0,0096	1,0458	1,0087	1,0099	0,0434	17	-7	0,1170	886,0464	917,3664	899,3621	0,0059	0,0117	1,2591	8,7198
2,3051	0,0071	1,0336	1,0110	1,0124	0,0551	18	-6	0,1156	912,6777	947,1469	927,9976	0,0070	0,0139	1,2591	8,7198

Продолжение таблицы А5

2,4100	0,0049	1,0234	1,0138	1,0155	0,0690	19	-5	0,1145	943,3174	981,0428	960,7939	0,0081	0,0163	1,2591	8,7198
2,5244	0,0031	1,0150	1,0171	1,0190	0,0853	20	-4	0,1135	978,2704	1019,2862	998,0261	0,0094	0,0188	1,2591	8,7200
2,6490	0,0018	1,0084	1,0209	1,0230	0,1042	21	-3	0,1128	1017,7817	1062,0341	1039,8998	0,0108	0,0216	1,2591	8,7204
2,7839	0,0008	1,0037	1,0252	1,0276	0,1257	22	-2	0,1123	1062,0179	1109,3506	1086,5339	0,0122	0,0244	1,2590	8,7209
2,9292	0,0002	1,0009	1,0301	1,0328	0,1501	23	-1	0,1120	1111,0499	1161,1911	1137,9426	0,0137	0,0273	1,2590	8,7216
3,0844	0,0000	1,0000	1,0355	1,0386	0,1774	24	0	0,1119	1164,8354	1217,3887	1194,0205	0,0151	0,0303	1,2590	8,7225
3,2487	0,0002	1,0009	1,0416	1,0449	0,2077	25	1	0,1120	1223,2055	1277,6449	1254,5302	0,0166	0,0332	1,2589	8,7235
3,4208	0,0008	1,0037	1,0482	1,0518	0,2408	26	2	0,1123	1285,8548	1341,5250	1319,0955	0,0180	0,0360	1,2589	8,7247
3,5989	0,0018	1,0084	1,0554	1,0593	0,2768	27	3	0,1128	1352,3361	1408,4601	1387,1993	0,0193	0,0386	1,2589	8,7259
3,7807	0,0031	1,0150	1,0632	1,0673	0,3154	28	4	0,1135	1422,0625	1477,7548	1458,1890	0,0205	0,0410	1,2588	8,7272
3,9637	0,0049	1,0234	1,0714	1,0757	0,3564	29	5	0,1145	1494,3154	1548,6029	1531,2876	0,0215	0,0430	1,2588	8,7285
4,1449	0,0071	1,0336	1,0800	1,0845	0,3994	30	6	0,1156	1568,2598	1620,1088	1605,6136	0,0223	0,0446	1,2587	8,7297
4,3210	0,0096	1,0458	1,0889	1,0935	0,4440	31	7	0,1170	1642,9674	1691,3154	1680,2057	0,0229	0,0457	1,2587	8,7308
4,4886	0,0126	1,0597	1,0981	1,1027	0,4898	32	8	0,1185	1717,4440	1761,2358	1754,0538	0,0232	0,0463	1,2587	8,7318
4,6443	0,0159	1,0755	1,1074	1,1120	0,5361	33	9	0,1203	1790,6636	1828,8883	1826,1336	0,0232	0,0463	1,2586	8,7325
4,7848	0,0196	1,0932	1,1167	1,1212	0,5824	34	10	0,1223	1861,6036	1893,3320	1895,4430	0,0229	0,0457	1,2586	8,7331
4,9070	0,0237	1,1127	1,1258	1,1303	0,6281	35	11	0,1245	1929,2824	1953,7015	1961,0389	0,0222	0,0445	1,2586	8,7333
5,0084	0,0282	1,1339	1,1347	1,1390	0,6726	36	12	0,1268	1992,7955	2009,2383	2022,0718	0,0213	0,0427	1,2586	8,7334
5,0870	0,0331	1,1570	1,1433	1,1473	0,7153	37	13	0,1294	2051,3482	2059,3178	2077,8160	0,0202	0,0403	1,2586	8,7331
5,1412	0,0383	1,1819	1,1513	1,1551	0,7556	38	14	0,1322	2104,2838	2103,4694	2127,6947	0,0187	0,0375	1,2586	8,7326
5,1704	0,0439	1,2086	1,1588	1,1623	0,7931	39	15	0,1352	2151,1056	2141,3905	2171,2979	0,0171	0,0343	1,2587	8,7320
5,1747	0,0499	1,2370	1,1657	1,1688	0,8274	40	16	0,1384	2191,4903	2172,9508	2208,3923	0,0154	0,0308	1,2587	8,7311
5,1546	0,0563	1,2672	1,1719	1,1746	0,8582	41	17	0,1417	2225,2943	2198,1902	2238,9224	0,0136	0,0272	1,2587	8,7302
5,1116	0,0630	1,2992	1,1773	1,1797	0,8854	42	18	0,1453	2252,5506	2217,3068	2263,0040	0,0118	0,0236	1,2588	8,7292
5,0476	0,0701	1,3328	1,1821	1,1841	0,9090	43	19	0,1491	2273,4575	2230,6394	2280,9086	0,0100	0,0201	1,2588	8,7282
4,9651	0,0775	1,3682	1,1861	1,1878	0,9291	44	20	0,1530	2288,3597	2238,6426	2293,0414	0,0083	0,0167	1,2588	8,7272
4,8666	0,0853	1,4052	1,1894	1,1908	0,9458	45	21	0,1572	2297,7231	2241,8575	2299,9137	0,0068	0,0136	1,2589	8,7262
4,7550	0,0935	1,4440	1,1922	1,1932	0,9594	46	22	0,1615	2302,1043	2240,8810	2302,1113	0,0054	0,0108	1,2589	8,7254
4,6331	0,1020	1,4843	1,1943	1,1952	0,9702	47	23	0,1660	2302,1184	2236,3334	2300,2620	0,0042	0,0084	1,2589	8,7246
4,5037	0,1108	1,5263	1,1960	1,1967	0,9787	48	24	0,1707	2298,4056	2228,8292	2295,0031	0,0032	0,0064	1,2589	8,7240
4,3693	0,1200	1,5700	1,1973	1,1978	0,9851	49	25	0,1756	2291,6007	2218,9510	2286,9535	0,0024	0,0047	1,2590	8,7235
4,2321	0,1295	1,6152	1,1982	1,1986	0,9898	50	26	0,1807	2282,3064	2207,2302	2276,6893	0,0017	0,0034	1,2590	8,7231

Продолжение таблицы А5

4,0940	0,1394	1,6620	1,1989	1,1992	0,9932	51	27	0,1859	2271,0722	2194,1330	2264,7265	0,0012	0,0024	1,2590	8,7227
3,9566	0,1495	1,7103	1,1994	1,1996	0,9956	52	28	0,1913	2258,3807	2180,0538	2251,5106	0,0008	0,0016	1,2590	8,7225
3,8212	0,1600	1,7602	1,1997	1,1998	0,9972	53	29	0,1969	2244,6405	2165,3145	2237,4127	0,0005	0,0011	1,2590	8,7223
3,6886	0,1708	1,8115	1,2000	1,2000	0,9983	54	30	0,2026	2230,1849	2150,1686	2222,7309	0,0003	0,0007	1,2590	8,7222
3,5595	0,1820	1,8644	1,2001	1,2001	0,9990	55	31	0,2085	2215,2769	2134,8091	2207,6968	0,0002	0,0004	1,2590	8,7221

Таблица А6 - Результаты теплового расчета проектируемого газопоршневого двигателя работающего на СПГ=90% и Н₂
= 10%, при n = 2800 мин⁻¹

Давление, МПа	$\sigma \cdot 10^{-2}$	$\psi(\varphi)$	Коэф. молекулярного изменения смеси	Средний коэффициент молекулярного изменения смеси на участке	Характеристика тепловыделения	Угол от начала сгорания, град. ПКВ	Угол до ВМТ, град. ПКВ	Объем рабочего тела, м ³	Предполагаемая температура, К	Расчетная температура, К	Средняя температура на участке, К	Доля топлива, сгоревшего на участке	Сред. знач. доли топлива сгор. на участке	k ₁₋₂	K ₁₋₂
1,4279	0,0775	1,3682	1,0000	1,0000	0,0000	0	-20	0,1530	759,6077	764,7804	759,3420	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,4758	0,0701	1,3328	1,0000	1,0000	0,0000	1	-19	0,1491	759,0763	769,8993	761,4760	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,5242	0,0630	1,2992	1,0000	1,0000	0,0000	2	-18	0,1453	763,8757	775,0305	766,2924	0,0000	0,0001	1,2590	8,7220
1,5730	0,0563	1,2672	1,0000	1,0000	0,0001	3	-17	0,1417	768,7092	780,2947	771,2182	0,0001	0,0002	1,2590	8,7219
1,6224	0,0499	1,2370	1,0000	1,0001	0,0003	4	-16	0,1384	773,7272	785,8669	776,4369	0,0002	0,0004	1,2590	8,7219
1,6725	0,0439	1,2086	1,0001	1,0001	0,0007	5	-15	0,1352	779,1465	791,9764	782,1979	0,0004	0,0007	1,2590	8,7218
1,7236	0,0383	1,1819	1,0002	1,0003	0,0014	6	-14	0,1322	785,2493	798,9058	788,8157	0,0006	0,0012	1,2590	8,7216
1,7763	0,0331	1,1570	1,0004	1,0005	0,0027	7	-13	0,1294	792,3822	806,9893	796,6683	0,0009	0,0019	1,2590	8,7215
1,8313	0,0282	1,1339	1,0006	1,0008	0,0045	8	-12	0,1268	800,9544	816,6094	806,1939	0,0014	0,0027	1,2590	8,7213
1,8891	0,0237	1,1127	1,0010	1,0013	0,0072	9	-11	0,1245	811,4335	828,1923	817,8868	0,0019	0,0038	1,2590	8,7210
1,9509	0,0196	1,0932	1,0015	1,0019	0,0110	10	-10	0,1223	824,3400	842,2013	832,2896	0,0025	0,0051	1,2590	8,7207
2,0177	0,0159	1,0755	1,0022	1,0027	0,0161	11	-9	0,1203	840,2392	859,1273	849,9845	0,0033	0,0066	1,2591	8,7205
2,0907	0,0126	1,0597	1,0032	1,0037	0,0227	12	-8	0,1185	859,7298	879,4770	871,5797	0,0042	0,0084	1,2591	8,7202
2,1711	0,0096	1,0458	1,0043	1,0051	0,0311	13	-7	0,1170	883,4295	903,7574	897,6932	0,0052	0,0105	1,2591	8,7201
2,2601	0,0071	1,0336	1,0058	1,0067	0,0416	14	-6	0,1156	911,9568	932,4579	928,9329	0,0064	0,0128	1,2591	8,7200
2,3591	0,0049	1,0234	1,0076	1,0087	0,0544	15	-5	0,1145	945,9089	966,0290	965,8724	0,0077	0,0155	1,2591	8,7200
2,4691	0,0031	1,0150	1,0097	1,0110	0,0699	16	-4	0,1135	985,8360	1004,8587	1009,0245	0,0092	0,0183	1,2591	8,7202
2,5911	0,0018	1,0084	1,0123	1,0138	0,0882	17	-3	0,1128	1032,2131	1049,2468	1058,8110	0,0107	0,0214	1,2590	8,7207

Продолжение таблицы А6

2,7256	0,0008	1,0037	1,0153	1,0170	0,1095	18	-2	0,1123	1085,4090	1099,3796	1115,5321	0,0123	0,0246	1,2590	8,7213
2,8729	0,0002	1,0009	1,0187	1,0207	0,1341	19	-1	0,1120	1145,6553	1155,3048	1179,3359	0,0140	0,0279	1,2590	8,7222
3,0327	0,0000	1,0000	1,0226	1,0248	0,1621	20	0	0,1119	1213,0164	1216,9099	1250,1897	0,0157	0,0313	1,2590	8,7234
3,2044	0,0002	1,0009	1,0270	1,0294	0,1934	21	1	0,1120	1287,3629	1283,9049	1327,8568	0,0173	0,0347	1,2589	8,7247
3,3865	0,0008	1,0037	1,0318	1,0345	0,2281	22	2	0,1123	1368,3508	1355,8120	1411,8798	0,0190	0,0379	1,2589	8,7262
3,5771	0,0018	1,0084	1,0371	1,0400	0,2660	23	3	0,1128	1455,4089	1431,9645	1501,5727	0,0205	0,0409	1,2588	8,7278
3,7736	0,0031	1,0150	1,0428	1,0459	0,3070	24	4	0,1135	1547,7366	1511,5138	1596,0248	0,0218	0,0436	1,2588	8,7294
3,9730	0,0049	1,0234	1,0489	1,0521	0,3506	25	5	0,1145	1644,3131	1593,4490	1694,1164	0,0230	0,0459	1,2587	8,7310
4,1715	0,0071	1,0336	1,0553	1,0586	0,3965	26	6	0,1156	1743,9196	1676,6250	1794,5469	0,0238	0,0477	1,2586	8,7325
4,3653	0,0096	1,0458	1,0620	1,0654	0,4442	27	7	0,1170	1845,1741	1759,8010	1895,8755	0,0244	0,0488	1,2586	8,7338
4,5502	0,0126	1,0597	1,0688	1,0722	0,4931	28	8	0,1185	1946,5769	1841,6862	1996,5713	0,0247	0,0493	1,2586	8,7349
4,7220	0,0159	1,0755	1,0757	1,0791	0,5424	29	9	0,1203	2046,5657	1920,9901	2095,0715	0,0246	0,0491	1,2585	8,7357
4,8769	0,0196	1,0932	1,0825	1,0859	0,5915	30	10	0,1223	2143,5773	1996,4754	2189,8439	0,0241	0,0482	1,2585	8,7362
5,0111	0,0237	1,1127	1,0892	1,0925	0,6397	31	11	0,1245	2236,1105	2067,0095	2279,4495	0,0233	0,0465	1,2585	8,7363
5,1217	0,0282	1,1339	1,0957	1,0988	0,6862	32	12	0,1268	2322,7885	2131,6105	2362,6019	0,0221	0,0442	1,2585	8,7361
5,2064	0,0331	1,1570	1,1019	1,1048	0,7304	33	13	0,1294	2402,4154	2189,4866	2438,2195	0,0206	0,0413	1,2585	8,7355
5,2635	0,0383	1,1819	1,1076	1,1103	0,7717	34	14	0,1322	2474,0237	2240,0647	2505,4663	0,0190	0,0379	1,2586	8,7347
5,2926	0,0439	1,2086	1,1129	1,1153	0,8096	35	15	0,1352	2536,9090	2283,0072	2563,7799	0,0171	0,0342	1,2586	8,7337
5,2940	0,0499	1,2370	1,1177	1,1198	0,8438	36	16	0,1384	2590,6508	2318,2158	2612,8840	0,0151	0,0302	1,2586	8,7325
5,2687	0,0563	1,2672	1,1219	1,1237	0,8740	37	17	0,1417	2635,1173	2345,8216	2652,7855	0,0131	0,0262	1,2587	8,7312
5,2186	0,0630	1,2992	1,1256	1,1271	0,9002	38	18	0,1453	2670,4538	2366,1634	2683,7553	0,0111	0,0223	1,2587	8,7299
5,1464	0,0701	1,3328	1,1287	1,1300	0,9225	39	19	0,1491	2697,0569	2379,7552	2706,2961	0,0092	0,0185	1,2588	8,7286
5,0549	0,0775	1,3682	1,1313	1,1323	0,9410	40	20	0,1530	2715,5354	2387,2460	2721,0985	0,0075	0,0150	1,2588	8,7274
4,9473	0,0853	1,4052	1,1334	1,1342	0,9560	41	21	0,1572	2726,6616	2389,3746	2728,9895	0,0060	0,0119	1,2589	8,7263
4,8269	0,0935	1,4440	1,1350	1,1357	0,9679	42	22	0,1615	2731,3173	2386,9237	2730,8779	0,0046	0,0092	1,2589	8,7253
4,6969	0,1020	1,4843	1,1363	1,1368	0,9771	43	23	0,1660	2730,4385	2380,6770	2727,7007	0,0035	0,0070	1,2589	8,7245
4,5602	0,1108	1,5263	1,1373	1,1376	0,9841	44	24	0,1707	2724,9630	2371,3817	2720,3745	0,0026	0,0051	1,2589	8,7238
4,4195	0,1200	1,5700	1,1380	1,1382	0,9892	45	25	0,1756	2715,7860	2359,7195	2709,7555	0,0018	0,0037	1,2590	8,7233
4,2769	0,1295	1,6152	1,1385	1,1387	0,9929	46	26	0,1807	2703,7249	2346,2877	2696,6103	0,0013	0,0025	1,2590	8,7229
4,1344	0,1394	1,6620	1,1389	1,1390	0,9955	47	27	0,1859	2689,4957	2331,5892	2681,5987	0,0009	0,0017	1,2590	8,7226
3,9935	0,1495	1,7103	1,1391	1,1392	0,9972	48	28	0,1913	2673,7017	2316,0319	2665,2670	0,0006	0,0011	1,2590	8,7224
3,8551	0,1600	1,7602	1,1393	1,1393	0,9983	49	29	0,1969	2656,8323	2299,9346	2648,0511	0,0004	0,0007	1,2590	8,7223

Продолжение таблицы А6

3,7202	0,1708	1,8115	1,1394	1,1394	0,9990	50	30	0,2026	2639,2699	2283,5375	2630,2865	0,0002	0,0004	1,2590	8,7222
--------	--------	--------	--------	--------	--------	----	----	--------	-----------	-----------	-----------	--------	--------	--------	--------

Таблица А7 - Результаты теплового расчета проектируемого газопоршневого двигателя, при $n = 4200 \text{ мин}^{-1}$

Давление, МПа	$\sigma \cdot 10^2$	$\psi(\varphi)$	Кэф. молекулярного изменения смеси	Средний коэффициент молекулярного изменения смеси на участке	Характеристика тепловыделения	Угол от начала сгорания, град. ПКВ	Угол до ВМТ, град. ПКВ	Объем рабочего тела, м ³	Предполагаемая температура, К	Расчетная температура, К	Средняя температура на участке, К	Доля топлива, сгоревшего на участке	Сред. знач. доли топлива сгор. на участке	k_{1-2}	K_{1-2}
1,1803	0,1200	1,5700	1,0000	1,0000	0,0000	0	-25	0,1756	720,4617	725,7408	721,3668	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,2229	0,1108	1,5263	1,0000	1,0000	0,0000	1	-24	0,1707	722,2719	731,0132	724,7635	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,2666	0,1020	1,4843	1,0000	1,0000	0,0000	2	-23	0,1660	727,2551	736,2848	729,7425	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,3114	0,0935	1,4440	1,0000	1,0000	0,0000	3	-22	0,1615	732,2299	741,5771	734,7243	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,3573	0,0853	1,4052	1,0000	1,0000	0,0001	4	-21	0,1572	737,2186	746,9292	739,7398	0,0000	0,0001	1,2590	8,7220
1,4041	0,0775	1,3682	1,0000	1,0001	0,0002	5	-20	0,1530	742,2610	752,3995	744,8387	0,0001	0,0002	1,2590	8,7219
1,4520	0,0701	1,3328	1,0001	1,0001	0,0003	6	-19	0,1491	747,4163	758,0672	750,0906	0,0002	0,0003	1,2590	8,7219
1,5009	0,0630	1,2992	1,0001	1,0002	0,0007	7	-18	0,1453	752,7648	764,0334	755,5867	0,0003	0,0005	1,2590	8,7218
1,5509	0,0563	1,2672	1,0002	1,0003	0,0012	8	-17	0,1417	758,4085	770,4218	761,4405	0,0004	0,0008	1,2590	8,7217
1,6023	0,0499	1,2370	1,0004	1,0005	0,0020	9	-16	0,1384	764,4724	777,3793	767,7885	0,0006	0,0011	1,2590	8,7216
1,6551	0,0439	1,2086	1,0006	1,0008	0,0031	10	-15	0,1352	771,1046	785,0761	774,7905	0,0008	0,0016	1,2590	8,7215
1,7097	0,0383	1,1819	1,0009	1,0011	0,0047	11	-14	0,1322	778,4764	793,7049	782,6294	0,0011	0,0021	1,2590	8,7214
1,7663	0,0331	1,1570	1,0014	1,0016	0,0068	12	-13	0,1294	786,7823	803,4805	791,5104	0,0014	0,0028	1,2590	8,7212
1,8254	0,0282	1,1339	1,0019	1,0023	0,0096	13	-12	0,1268	796,2385	814,6375	801,6597	0,0018	0,0036	1,2590	8,7210
1,8873	0,0237	1,1127	1,0026	1,0031	0,0131	14	-11	0,1245	807,0809	827,4277	813,3222	0,0022	0,0045	1,2590	8,7208
1,9527	0,0196	1,0932	1,0035	1,0041	0,0176	15	-10	0,1223	819,5634	842,1168	826,7583	0,0028	0,0056	1,2590	8,7206
2,0220	0,0159	1,0755	1,0047	1,0053	0,0232	16	-9	0,1203	833,9531	858,9794	842,2398	0,0034	0,0068	1,2591	8,7204
2,0958	0,0126	1,0597	1,0060	1,0068	0,0300	17	-8	0,1185	850,5264	878,2929	860,0445	0,0041	0,0082	1,2591	8,7202
2,1748	0,0096	1,0458	1,0077	1,0086	0,0382	18	-7	0,1170	869,5625	900,3305	880,4496	0,0049	0,0098	1,2591	8,7200
2,2596	0,0071	1,0336	1,0096	1,0108	0,0480	19	-6	0,1156	891,3367	925,3530	903,7240	0,0057	0,0115	1,2591	8,7199
2,3506	0,0049	1,0234	1,0119	1,0133	0,0595	20	-5	0,1145	916,1114	953,5987	930,1193	0,0067	0,0134	1,2591	8,7199
2,4485	0,0031	1,0150	1,0146	1,0161	0,0729	21	-4	0,1135	944,1271	985,2734	959,8595	0,0077	0,0154	1,2591	8,7200
2,5534	0,0018	1,0084	1,0177	1,0194	0,0883	22	-3	0,1128	975,5919	1020,5391	993,1309	0,0088	0,0176	1,2591	8,7201

Продолжение таблицы А7

2,6658	0,0008	1,0037	1,0212	1,0232	0,1058	23	-2	0,1123	1010,6700	1059,5027	1030,0705	0,0099	0,0199	1,2591	8,7204
2,7855	0,0002	1,0009	1,0252	1,0274	0,1257	24	-1	0,1120	1049,4711	1102,2051	1070,7550	0,0111	0,0222	1,2590	8,7208
2,9125	0,0000	1,0000	1,0296	1,0321	0,1480	25	0	0,1119	1092,0388	1148,6109	1115,1900	0,0123	0,0247	1,2590	8,7213
3,0461	0,0002	1,0009	1,0346	1,0373	0,1727	26	1	0,1120	1138,3411	1198,6001	1163,3012	0,0136	0,0272	1,2590	8,7220
3,1858	0,0008	1,0037	1,0400	1,0430	0,1998	27	2	0,1123	1188,2612	1251,9614	1214,9265	0,0148	0,0296	1,2590	8,7228
3,3303	0,0018	1,0084	1,0460	1,0492	0,2295	28	3	0,1128	1241,5917	1308,3893	1269,8113	0,0160	0,0320	1,2589	8,7237
3,4785	0,0031	1,0150	1,0524	1,0558	0,2615	29	4	0,1135	1298,0309	1367,4839	1327,6067	0,0172	0,0343	1,2589	8,7247
3,6285	0,0049	1,0234	1,0592	1,0629	0,2958	30	5	0,1145	1357,1825	1428,7547	1387,8710	0,0182	0,0364	1,2589	8,7257
3,7787	0,0071	1,0336	1,0665	1,0704	0,3322	31	6	0,1156	1418,5596	1491,6288	1450,0761	0,0192	0,0383	1,2588	8,7267
3,9267	0,0096	1,0458	1,0742	1,0782	0,3705	32	7	0,1170	1481,5926	1555,4624	1513,6163	0,0199	0,0399	1,2588	8,7278
4,0703	0,0126	1,0597	1,0822	1,0863	0,4104	33	8	0,1185	1545,6400	1619,5565	1577,8225	0,0206	0,0412	1,2588	8,7288
4,2071	0,0159	1,0755	1,0904	1,0947	0,4516	34	9	0,1203	1610,0049	1683,1758	1641,9787	0,0210	0,0420	1,2587	8,7297
4,3348	0,0196	1,0932	1,0989	1,1031	0,4936	35	10	0,1223	1673,9525	1745,5691	1705,3420	0,0212	0,0425	1,2587	8,7305
4,4510	0,0237	1,1127	1,1074	1,1116	0,5361	36	11	0,1245	1736,7315	1805,9923	1767,1640	0,0212	0,0425	1,2587	8,7311
4,5534	0,0282	1,1339	1,1159	1,1201	0,5786	37	12	0,1268	1797,5965	1863,7310	1826,7135	0,0210	0,0420	1,2587	8,7316
4,6403	0,0331	1,1570	1,1243	1,1284	0,6206	38	13	0,1294	1855,8305	1918,1224	1883,2988	0,0205	0,0411	1,2587	8,7318
4,7099	0,0383	1,1819	1,1325	1,1365	0,6616	39	14	0,1322	1910,7672	1968,5761	1936,2895	0,0198	0,0396	1,2587	8,7319
4,7609	0,0439	1,2086	1,1405	1,1442	0,7013	40	15	0,1352	1961,8117	2014,5914	1985,1351	0,0189	0,0378	1,2587	8,7318
4,7927	0,0499	1,2370	1,1480	1,1516	0,7391	41	16	0,1384	2008,4584	2055,7722	2029,3818	0,0178	0,0356	1,2587	8,7315
4,8048	0,0563	1,2672	1,1552	1,1585	0,7747	42	17	0,1417	2050,3052	2091,8365	2068,6848	0,0165	0,0331	1,2587	8,7311
4,7974	0,0630	1,2992	1,1618	1,1648	0,8078	43	18	0,1453	2087,0643	2122,6224	2102,8159	0,0151	0,0303	1,2587	8,7305
4,7711	0,0701	1,3328	1,1678	1,1706	0,8380	44	19	0,1491	2118,5676	2148,0891	2131,6679	0,0137	0,0273	1,2587	8,7298
4,7268	0,0775	1,3682	1,1733	1,1757	0,8653	45	20	0,1530	2144,7683	2168,3127	2155,2524	0,0121	0,0243	1,2588	8,7290
4,6660	0,0853	1,4052	1,1782	1,1803	0,8896	46	21	0,1572	2165,7365	2183,4774	2173,6938	0,0106	0,0212	1,2588	8,7282
4,5904	0,0935	1,4440	1,1824	1,1843	0,9108	47	22	0,1615	2181,6512	2193,8632	2187,2191	0,0091	0,0183	1,2588	8,7274
4,5018	0,1020	1,4843	1,1861	1,1876	0,9291	48	23	0,1660	2192,7871	2199,8293	2196,1431	0,0077	0,0154	1,2588	8,7265
4,4023	0,1108	1,5263	1,1892	1,1905	0,9445	49	24	0,1707	2199,4990	2201,7956	2200,8508	0,0064	0,0128	1,2589	8,7258
4,2939	0,1200	1,5700	1,1917	1,1928	0,9573	50	25	0,1756	2202,2025	2200,2219	2201,7783	0,0052	0,0104	1,2589	8,7251
4,1789	0,1295	1,6152	1,1938	1,1947	0,9678	51	26	0,1807	2201,3540	2195,5880	2199,3919	0,0042	0,0083	1,2589	8,7245
4,0591	0,1394	1,6620	1,1955	1,1962	0,9761	52	27	0,1859	2197,4299	2188,3735	2194,1685	0,0033	0,0065	1,2589	8,7239
3,9363	0,1495	1,7103	1,1968	1,1973	0,9826	53	28	0,1913	2190,9072	2179,0407	2186,5766	0,0025	0,0050	1,2590	8,7235
3,8122	0,1600	1,7602	1,1978	1,1982	0,9876	54	29	0,1969	2182,2461	2168,0202	2177,0607	0,0019	0,0037	1,2590	8,7231

Продолжение таблицы А7

3,6881	0,1708	1,8115	1,1986	1,1988	0,9914	55	30	0,2026	2171,8753	2155,6999	2166,0283	0,0014	0,0027	1,2590	8,7228
3,5651	0,1820	1,8644	1,1991	1,1993	0,9941	56	31	0,2085	2160,1814	2142,4188	2153,8419	0,0010	0,0020	1,2590	8,7226
3,4443	0,1934	1,9186	1,1995	1,1996	0,9961	57	32	0,2146	2147,5024	2128,4635	2140,8135	0,0007	0,0014	1,2590	8,7224
3,3262	0,2051	1,9743	1,1998	1,1999	0,9974	58	33	0,2208	2134,1245	2114,0697	2127,2037	0,0005	0,0009	1,2590	8,7223
3,2115	0,2171	2,0314	1,2000	1,2000	0,9984	59	34	0,2272	2120,2829	2099,4248	2113,2239	0,0003	0,0006	1,2590	8,7222
3,1004	0,2295	2,0899	1,2001	1,2001	0,9990	60	35	0,2338	2106,1649	2084,6734	2106,6649	0,0002	0,0004	1,2590	8,7221

Таблица А8 - Результаты теплового расчета проектируемого газопоршневого двигателя работающего на СПГ=90% и Н₂ = 10%, при n = 4200 мин⁻¹

Давление, МПа	$\sigma \cdot 10^{-2}$	$\psi(\varphi)$	Коэф. молекулярного изменения смеси	Средний коэффициент молекулярного изменения смеси на участке	Характеристика теплового выделения	Угол от начала сгорания, град. ПКВ	Угол до ВМТ, град. ПКВ	Объем рабочего тела, м ³	Предполагаемая температура, К	Расчетная температура, К	Средняя температура на участке, К	Доля топлива, сгоревшего на участке	Сред. знач. доли топлива сгор. на участке	k _{1,2}	K _{1,2}
1,2272	0,1108	1,5263	1,0000	1,0000	0,0000	0	-24	0,1707	728,3123	733,5988	729,0106	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,2711	0,1020	1,4843	1,0000	1,0000	0,0000	1	-23	0,1660	729,7090	738,8830	732,2022	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,3161	0,0935	1,4440	1,0000	1,0000	0,0000	2	-22	0,1615	734,6954	744,2088	737,2076	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,3621	0,0853	1,4052	1,0000	1,0000	0,0001	3	-21	0,1572	739,7198	749,6574	742,2936	0,0001	0,0001	1,2590	8,7220
1,4092	0,0775	1,3682	1,0000	1,0000	0,0002	4	-20	0,1530	744,8674	755,3468	747,5649	0,0001	0,0003	1,2590	8,7219
1,4577	0,0701	1,3328	1,0001	1,0001	0,0005	5	-19	0,1491	750,2623	761,4319	753,1646	0,0003	0,0005	1,2590	8,7218
1,5075	0,0630	1,2992	1,0001	1,0002	0,0010	6	-18	0,1453	756,0668	768,1041	759,2740	0,0004	0,0008	1,2590	8,7217
1,5592	0,0563	1,2672	1,0003	1,0003	0,0018	7	-17	0,1417	762,4812	775,5904	766,1122	0,0006	0,0013	1,2590	8,7216
1,6131	0,0499	1,2370	1,0004	1,0006	0,0031	8	-16	0,1384	769,7432	784,1524	773,9346	0,0009	0,0019	1,2590	8,7214
1,6696	0,0439	1,2086	1,0007	1,0009	0,0049	9	-15	0,1352	778,1260	794,0836	783,0312	0,0013	0,0026	1,2590	8,7212
1,7295	0,0383	1,1819	1,0010	1,0013	0,0075	10	-14	0,1322	787,9364	805,7063	793,7239	0,0017	0,0035	1,2590	8,7210
1,7933	0,0331	1,1570	1,0015	1,0018	0,0110	11	-13	0,1294	799,5114	819,3677	806,3625	0,0023	0,0045	1,2590	8,7207
1,8619	0,0282	1,1339	1,0022	1,0026	0,0155	12	-12	0,1268	813,2136	835,4333	821,3193	0,0029	0,0058	1,2591	8,7205
1,9361	0,0237	1,1127	1,0030	1,0035	0,0213	13	-11	0,1245	829,4250	854,2800	838,9823	0,0036	0,0073	1,2591	8,7202
2,0168	0,0196	1,0932	1,0040	1,0046	0,0286	14	-10	0,1223	848,5396	876,2865	859,7466	0,0045	0,0089	1,2591	8,7200
2,1051	0,0159	1,0755	1,0052	1,0060	0,0375	15	-9	0,1203	870,9535	901,8227	884,0038	0,0054	0,0108	1,2591	8,7199
2,2018	0,0126	1,0597	1,0067	1,0076	0,0483	16	-8	0,1185	897,0540	931,2365	912,1298	0,0064	0,0128	1,2591	8,7198

Продолжение таблицы А8

2,3077	0,0096	1,0458	1,0085	1,0096	0,0611	17	-7	0,1170	927,2057	964,8401	944,4712	0,0075	0,0151	1,2591	8,7198
2,4237	0,0071	1,0336	1,0106	1,0118	0,0762	18	-6	0,1156	961,7366	1002,8940	981,3289	0,0088	0,0175	1,2591	8,7200
2,5503	0,0049	1,0234	1,0131	1,0145	0,0937	19	-5	0,1145	1000,9213	1045,5912	1022,9430	0,0100	0,0201	1,2591	8,7203
2,6879	0,0031	1,0150	1,0159	1,0175	0,1138	20	-4	0,1135	1044,9647	1093,0411	1069,4749	0,0114	0,0228	1,2590	8,7207
2,8364	0,0018	1,0084	1,0190	1,0208	0,1365	21	-3	0,1128	1093,9852	1145,2543	1120,9922	0,0128	0,0255	1,2590	8,7214
2,9956	0,0008	1,0037	1,0226	1,0246	0,1621	22	-2	0,1123	1147,9991	1202,1294	1177,4528	0,0142	0,0283	1,2590	8,7222
3,1648	0,0002	1,0009	1,0266	1,0287	0,1904	23	-1	0,1120	1206,9064	1263,4426	1238,6932	0,0156	0,0311	1,2590	8,7232
3,3428	0,0000	1,0000	1,0309	1,0333	0,2216	24	0	0,1119	1270,4801	1328,8411	1304,4198	0,0169	0,0338	1,2589	8,7243
3,5281	0,0002	1,0009	1,0356	1,0382	0,2554	25	1	0,1120	1338,3595	1397,8420	1374,2038	0,0182	0,0364	1,2589	8,7255
3,7184	0,0008	1,0037	1,0407	1,0434	0,2918	26	2	0,1123	1410,0481	1469,8358	1447,4829	0,0194	0,0387	1,2588	8,7268
3,9114	0,0018	1,0084	1,0461	1,0489	0,3305	27	3	0,1128	1484,9178	1544,0964	1523,5682	0,0204	0,0408	1,2588	8,7280
4,1042	0,0031	1,0150	1,0518	1,0547	0,3712	28	4	0,1135	1562,2186	1619,7969	1601,6568	0,0212	0,0425	1,2588	8,7293
4,2937	0,0049	1,0234	1,0577	1,0608	0,4137	29	5	0,1145	1641,0950	1696,0312	1680,8516	0,0219	0,0437	1,2587	8,7304
4,4765	0,0071	1,0336	1,0638	1,0669	0,4575	30	6	0,1156	1720,6082	1771,8401	1760,1856	0,0223	0,0446	1,2587	8,7315
4,6492	0,0096	1,0458	1,0700	1,0732	0,5020	31	7	0,1170	1799,7629	1846,2415	1838,6508	0,0224	0,0449	1,2587	8,7323
4,8085	0,0126	1,0597	1,0763	1,0794	0,5469	32	8	0,1185	1877,5387	1918,2624	1915,2310	0,0223	0,0446	1,2586	8,7330
4,9513	0,0159	1,0755	1,0825	1,0856	0,5915	33	9	0,1203	1952,9233	1986,9721	1988,9351	0,0219	0,0438	1,2586	8,7334
5,0747	0,0196	1,0932	1,0886	1,0916	0,6354	34	10	0,1223	2024,9470	2051,5140	2058,8314	0,0213	0,0425	1,2586	8,7336
5,1764	0,0237	1,1127	1,0946	1,0974	0,6779	35	11	0,1245	2092,7158	2111,1349	2124,0788	0,0204	0,0407	1,2586	8,7335
5,2547	0,0282	1,1339	1,1002	1,1029	0,7186	36	12	0,1268	2155,4418	2165,2095	2183,9555	0,0192	0,0384	1,2586	8,7333
5,3083	0,0331	1,1570	1,1056	1,1081	0,7570	37	13	0,1294	2212,4692	2213,2598	2237,8817	0,0179	0,0358	1,2586	8,7328
5,3367	0,0383	1,1819	1,1106	1,1129	0,7928	38	14	0,1322	2263,2942	2254,9679	2285,4366	0,0164	0,0328	1,2587	8,7321
5,3403	0,0439	1,2086	1,1152	1,1172	0,8256	39	15	0,1352	2307,5789	2290,1807	2326,3677	0,0148	0,0296	1,2587	8,7313
5,3197	0,0499	1,2370	1,1193	1,1211	0,8552	40	16	0,1384	2345,1565	2318,9084	2360,5928	0,0132	0,0263	1,2587	8,7304
5,2765	0,0563	1,2672	1,1230	1,1246	0,8815	41	17	0,1417	2376,0291	2341,3144	2388,1939	0,0115	0,0230	1,2588	8,7294
5,2125	0,0630	1,2992	1,1262	1,1276	0,9045	42	18	0,1453	2400,3587	2357,6991	2409,4041	0,0099	0,0198	1,2588	8,7284
5,1300	0,0701	1,3328	1,1289	1,1301	0,9243	43	19	0,1491	2418,4495	2368,4785	2424,5879	0,0083	0,0167	1,2588	8,7274
5,0315	0,0775	1,3682	1,1313	1,1322	0,9410	44	20	0,1530	2430,7262	2374,1579	2434,2166	0,0069	0,0138	1,2588	8,7265
4,9198	0,0853	1,4052	1,1332	1,1340	0,9548	45	21	0,1572	2437,7070	2375,3035	2438,8404	0,0056	0,0112	1,2589	8,7257
4,7976	0,0935	1,4440	1,1347	1,1354	0,9660	46	22	0,1615	2439,9738	2372,5139	2439,0583	0,0045	0,0089	1,2589	8,7249
4,6673	0,1020	1,4843	1,1360	1,1365	0,9749	47	23	0,1660	2438,1429	2366,3928	2435,4896	0,0035	0,0069	1,2589	8,7243
4,5316	0,1108	1,5263	1,1370	1,1373	0,9818	48	24	0,1707	2432,8363	2357,5241	2428,7465	0,0026	0,0053	1,2589	8,7237

Продолжение таблицы А8

4,3924	0,1200	1,5700	1,1377	1,1380	0,9871	49	25	0,1756	2424,6566	2346,4528	2419,4114	0,0020	0,0040	1,2590	8,7233
4,2518	0,1295	1,6152	1,1382	1,1384	0,9911	50	26	0,1807	2414,1663	2333,6697	2408,0193	0,0014	0,0029	1,2590	8,7229
4,1113	0,1394	1,6620	1,1386	1,1388	0,9939	51	27	0,1859	2401,8724	2319,6031	2395,0450	0,0010	0,0020	1,2590	8,7227
3,9723	0,1495	1,7103	1,1389	1,1390	0,9960	52	28	0,1913	2388,2176	2304,6147	2380,8969	0,0007	0,0014	1,2590	8,7225
3,8356	0,1600	1,7602	1,1391	1,1392	0,9974	53	29	0,1969	2373,5761	2289,0011	2365,9154	0,0005	0,0010	1,2590	8,7223
3,7022	0,1708	1,8115	1,1393	1,1393	0,9984	54	30	0,2026	2358,2546	2272,9977	2350,3759	0,0003	0,0006	1,2590	8,7222
3,5725	0,1820	1,8644	1,1394	1,1394	0,9990	55	31	0,2085	2342,4971	2256,7866	2334,4947	0,0002	0,0004	1,2590	8,7221

Таблица А9 - Результаты теплового расчета проектируемого газопоршневого двигателя, при $n = 5800 \text{ мин}^{-1}$

Давление, МПа	$\sigma \cdot 10^2$	$\psi(\varphi)$	Коэф. молекулярного изменения смеси	Средний коэффициент молекулярного изменения смеси на участке	Характеристика тепловыделения	Угол от начала сгорания, град. ПКВ	Угол до ВМТ, град. ПКВ	Объем рабочего тела, м ³	Предполагаемая температура, К	Расчетная температура, К	Средняя температура на участке, К	Доля топлива, сгоревшего на участке	Сред. знач. доли топлива сгор. на участке	k_{1-2}	K_{1-2}
0,9681	0,1708	1,8115	1,0000	1,0000	0,0000	0	-30	0,2026	681,8808	686,9808	683,6335	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,0038	0,1600	1,7602	1,0000	1,0000	0,0000	1	-29	0,1969	685,3862	692,1257	687,8399	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,0408	0,1495	1,7103	1,0000	1,0000	0,0000	2	-28	0,1913	690,2937	697,3372	692,7762	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,0791	0,1394	1,6620	1,0000	1,0000	0,0000	3	-27	0,1859	695,2587	702,6550	697,7897	0,0000	0,0001	1,2590	8,7220
1,1189	0,1295	1,6152	1,0000	1,0000	0,0001	4	-26	0,1807	700,3207	708,1372	702,9292	0,0001	0,0001	1,2590	8,7219
1,1601	0,1200	1,5700	1,0000	1,0001	0,0002	5	-25	0,1756	705,5378	713,8598	708,2619	0,0001	0,0003	1,2590	8,7219
1,2030	0,1108	1,5263	1,0001	1,0001	0,0005	6	-24	0,1707	710,9861	719,9169	713,8729	0,0002	0,0004	1,2590	8,7218
1,2476	0,1020	1,4843	1,0002	1,0003	0,0009	7	-23	0,1660	716,7598	726,4205	719,8653	0,0003	0,0007	1,2590	8,7218
1,2942	0,0935	1,4440	1,0003	1,0004	0,0016	8	-22	0,1615	722,9709	733,4999	726,3599	0,0005	0,0010	1,2590	8,7216
1,3430	0,0853	1,4052	1,0005	1,0006	0,0025	9	-21	0,1572	729,7489	741,3011	733,4945	0,0007	0,0013	1,2590	8,7215
1,3944	0,0775	1,3682	1,0008	1,0010	0,0039	10	-20	0,1530	737,2401	749,9862	741,4235	0,0009	0,0018	1,2590	8,7214
1,4486	0,0701	1,3328	1,0011	1,0014	0,0056	11	-19	0,1491	745,6069	759,7315	750,3164	0,0012	0,0023	1,2590	8,7212
1,5061	0,0630	1,2992	1,0016	1,0019	0,0080	12	-18	0,1453	755,0260	770,7266	760,3568	0,0015	0,0030	1,2590	8,7210
1,5672	0,0563	1,2672	1,0022	1,0026	0,0110	13	-17	0,1417	765,6875	783,1714	771,7398	0,0019	0,0038	1,2590	8,7208
1,6325	0,0499	1,2370	1,0030	1,0034	0,0148	14	-16	0,1384	777,7920	797,2740	784,6703	0,0023	0,0046	1,2590	8,7206
1,7024	0,0439	1,2086	1,0039	1,0045	0,0194	15	-15	0,1352	791,5485	813,2467	799,3593	0,0028	0,0056	1,2591	8,7204
1,7775	0,0383	1,1819	1,0050	1,0057	0,0250	16	-14	0,1322	807,1702	831,3026	816,0209	0,0034	0,0068	1,2591	8,7202

Продолжение таблицы А9

1,8584	0,0331	1,1570	1,0064	1,0072	0,0318	17	-13	0,1294	824,8715	851,6500	834,8669	0,0040	0,0080	1,2591	8,7200
1,9455	0,0282	1,1339	1,0080	1,0089	0,0398	18	-12	0,1268	844,8624	874,4881	856,1031	0,0047	0,0094	1,2591	8,7199
2,0394	0,0237	1,1127	1,0099	1,0109	0,0492	19	-11	0,1245	867,3438	900,0001	879,9225	0,0054	0,0109	1,2591	8,7198
2,1406	0,0196	1,0932	1,0120	1,0133	0,0600	20	-10	0,1223	892,5012	928,3475	906,4999	0,0062	0,0125	1,2591	8,7198
2,2494	0,0159	1,0755	1,0145	1,0159	0,0725	21	-9	0,1203	920,4985	959,6627	935,9850	0,0071	0,0142	1,2591	8,7198
2,3662	0,0126	1,0597	1,0174	1,0190	0,0867	22	-8	0,1185	951,4715	994,0427	968,4959	0,0080	0,0160	1,2591	8,7200
2,4911	0,0096	1,0458	1,0206	1,0223	0,1026	23	-7	0,1170	985,5203	1031,5420	1004,1119	0,0089	0,0179	1,2591	8,7202
2,6241	0,0071	1,0336	1,0241	1,0261	0,1205	24	-6	0,1156	1022,7034	1072,1664	1042,8671	0,0099	0,0198	1,2590	8,7206
2,7649	0,0049	1,0234	1,0281	1,0303	0,1403	25	-5	0,1145	1063,0309	1115,8676	1084,7449	0,0109	0,0218	1,2590	8,7210
2,9132	0,0031	1,0150	1,0325	1,0348	0,1621	26	-4	0,1135	1106,4589	1162,5382	1129,6720	0,0119	0,0238	1,2590	8,7216
3,0683	0,0018	1,0084	1,0372	1,0398	0,1859	27	-3	0,1128	1152,8851	1212,0093	1177,5154	0,0129	0,0258	1,2590	8,7222
3,2292	0,0008	1,0037	1,0424	1,0452	0,2117	28	-2	0,1123	1202,1457	1264,0487	1228,0796	0,0139	0,0278	1,2590	8,7229
3,3947	0,0002	1,0009	1,0480	1,0509	0,2394	29	-1	0,1120	1254,0135	1318,3614	1281,1061	0,0148	0,0296	1,2589	8,7237
3,5634	0,0000	1,0000	1,0539	1,0570	0,2691	30	0	0,1119	1308,1988	1374,5925	1336,2750	0,0157	0,0314	1,2589	8,7245
3,7335	0,0002	1,0009	1,0602	1,0635	0,3005	31	1	0,1120	1364,3512	1432,3317	1393,2081	0,0165	0,0330	1,2589	8,7254
3,9031	0,0008	1,0037	1,0668	1,0703	0,3335	32	2	0,1123	1422,0650	1491,1202	1451,4750	0,0172	0,0345	1,2589	8,7263
4,0702	0,0018	1,0084	1,0737	1,0773	0,3680	33	3	0,1128	1480,8851	1550,4595	1510,6007	0,0179	0,0357	1,2588	8,7271
4,2326	0,0031	1,0150	1,0809	1,0846	0,4038	34	4	0,1135	1540,3162	1609,8218	1570,0745	0,0184	0,0367	1,2588	8,7280
4,3879	0,0049	1,0234	1,0882	1,0920	0,4405	35	5	0,1145	1599,8327	1668,6618	1629,3616	0,0187	0,0374	1,2588	8,7287
4,5339	0,0071	1,0336	1,0957	1,0995	0,4780	36	6	0,1156	1658,8905	1726,4292	1687,9150	0,0189	0,0379	1,2588	8,7294
4,6685	0,0096	1,0458	1,1033	1,1071	0,5158	37	7	0,1170	1716,9395	1782,5817	1745,1881	0,0190	0,0380	1,2587	8,7299
4,7897	0,0126	1,0597	1,1109	1,1147	0,5538	38	8	0,1185	1773,4366	1836,5980	1800,6478	0,0189	0,0377	1,2587	8,7304
4,8955	0,0159	1,0755	1,1185	1,1222	0,5915	39	9	0,1203	1827,8589	1887,9904	1853,7872	0,0186	0,0372	1,2587	8,7307
4,9846	0,0196	1,0932	1,1259	1,1296	0,6287	40	10	0,1223	1879,7155	1936,3158	1904,1377	0,0181	0,0363	1,2587	8,7308
5,0557	0,0237	1,1127	1,1332	1,1367	0,6650	41	11	0,1245	1928,5599	1981,1859	1951,2796	0,0175	0,0351	1,2587	8,7309
5,1078	0,0282	1,1339	1,1402	1,1436	0,7001	42	12	0,1268	1973,9993	2022,2754	1994,8515	0,0168	0,0336	1,2587	8,7308
5,1406	0,0331	1,1570	1,1469	1,1501	0,7337	43	13	0,1294	2015,7036	2059,3286	2034,5576	0,0159	0,0319	1,2587	8,7306
5,1540	0,0383	1,1819	1,1533	1,1563	0,7655	44	14	0,1322	2053,4116	2092,1633	2070,1734	0,0150	0,0299	1,2587	8,7302
5,1482	0,0439	1,2086	1,1593	1,1621	0,7954	45	15	0,1352	2086,9353	2120,6728	2101,5487	0,0139	0,0278	1,2587	8,7298
5,1238	0,0499	1,2370	1,1649	1,1674	0,8232	46	16	0,1384	2116,1622	2144,8256	2128,6086	0,0127	0,0255	1,2588	8,7292
5,0819	0,0563	1,2672	1,1700	1,1723	0,8487	47	17	0,1417	2141,0550	2164,6631	2151,3521	0,0116	0,0231	1,2588	8,7287
5,0237	0,0630	1,2992	1,1746	1,1767	0,8718	48	18	0,1453	2161,6492	2180,2945	2169,8489	0,0104	0,0208	1,2588	8,7280

Продолжение таблицы А9

4,9507	0,0701	1,3328	1,1788	1,1806	0,8926	49	19	0,1491	2178,0486	2191,8910	2184,2339	0,0092	0,0184	1,2588	8,7274
4,8645	0,0775	1,3682	1,1825	1,1841	0,9110	50	20	0,1530	2190,4191	2199,6771	2194,6997	0,0080	0,0161	1,2588	8,7267
4,7670	0,0853	1,4052	1,1857	1,1871	0,9271	51	21	0,1572	2198,9804	2203,9215	2201,4885	0,0070	0,0139	1,2589	8,7261
4,6599	0,0935	1,4440	1,1885	1,1897	0,9410	52	22	0,1615	2203,9966	2204,9271	2204,8815	0,0059	0,0118	1,2589	8,7255
4,5451	0,1020	1,4843	1,1908	1,1918	0,9528	53	23	0,1660	2205,7664	2203,0195	2205,1892	0,0050	0,0100	1,2589	8,7250
4,4242	0,1108	1,5263	1,1928	1,1937	0,9628	54	24	0,1707	2204,6120	2198,5371	2202,7403	0,0041	0,0083	1,2589	8,7244
4,2991	0,1200	1,5700	1,1945	1,1952	0,9710	55	25	0,1756	2200,8685	2191,8202	2197,8710	0,0034	0,0067	1,2589	8,7240
4,1712	0,1295	1,6152	1,1958	1,1964	0,9778	56	26	0,1807	2194,8735	2183,2021	2190,9158	0,0027	0,0054	1,2589	8,7236
4,0420	0,1394	1,6620	1,1969	1,1973	0,9832	57	27	0,1859	2186,9580	2173,0008	2182,1979	0,0021	0,0043	1,2590	8,7233
3,9126	0,1495	1,7103	1,1978	1,1981	0,9875	58	28	0,1913	2177,4379	2161,5121	2172,0228	0,0017	0,0033	1,2590	8,7230
3,7841	0,1600	1,7602	1,1984	1,1987	0,9908	59	29	0,1969	2166,6077	2149,0053	2160,6716	0,0013	0,0026	1,2590	8,7227
3,6573	0,1708	1,8115	1,1990	1,1992	0,9934	60	30	0,2026	2154,7356	2135,7197	2148,3978	0,0010	0,0019	1,2590	8,7226
3,5330	0,1820	1,8644	1,1993	1,1995	0,9953	61	31	0,2085	2142,0600	2121,8636	2135,4244	0,0007	0,0014	1,2590	8,7224
3,4118	0,1934	1,9186	1,1996	1,1997	0,9967	62	32	0,2146	2128,7887	2107,6139	2121,9435	0,0005	0,0010	1,2590	8,7223
3,2939	0,2051	1,9743	1,1998	1,1999	0,9977	63	33	0,2208	2115,0983	2093,1177	2108,1173	0,0004	0,0007	1,2590	8,7222
3,1798	0,2171	2,0314	1,2000	1,2000	0,9985	64	34	0,2272	2101,1362	2078,4949	2094,0792	0,0003	0,0005	1,2590	8,7222
3,0695	0,2295	2,0899	1,2001	1,2001	0,9990	65	35	0,2338	2087,0223	2063,8408	2079,9373	0,0002	0,0004	1,2590	8,7221

Таблица А10 - Результаты теплового расчета проектируемого газопоршневого двигателя работающего на СПГ=90% и Н₂ = 10%, при n = 5800 мин⁻¹

Давление, МПа	$\sigma \cdot 10^2$	$\psi(\varphi)$	Коэф. молекулярного изменения смеси	Средний коэффициент молекулярного изменения смеси на участке	Характеристика теплового выделения	Угол от начала сгорания, град. ПКВ	Угол до ВМТ, град. ПКВ	Объем рабочего тела, м ³	Предполагаемая температура, К	Расчетная температура, К	Средняя температура на участке, К	Доля топлива, сгоревшего на участке	Сред. знач. доли топлива сгор. на участке	K_{1-2}	K_{1-2}
1,1803	0,1200	1,5700	1,0000	1,0000	0,0000	0	-25	0,1756	720,4617	725,7462	721,3695	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,2229	0,1108	1,5263	1,0000	1,0000	0,0000	1	-24	0,1707	722,2773	731,0811	724,8000	0,0000	0,0000	1,2590	8,7220
1,2668	0,1020	1,4843	1,0000	1,0000	0,0000	2	-23	0,1660	727,3228	736,5806	729,9238	0,0001	0,0001	1,2590	8,7220
1,3120	0,0935	1,4440	1,0000	1,0000	0,0001	3	-22	0,1615	732,5248	742,4135	735,2885	0,0001	0,0003	1,2590	8,7219
1,3589	0,0853	1,4052	1,0001	1,0001	0,0004	4	-21	0,1572	738,0522	748,7956	741,0867	0,0003	0,0005	1,2590	8,7218
1,4077	0,0775	1,3682	1,0001	1,0002	0,0010	5	-20	0,1530	744,1212	755,9858	747,5559	0,0005	0,0009	1,2590	8,7217

Продолжение таблицы А10

1,4591	0,0701	1,3328	1,0003	1,0004	0,0019	6	-19	0,1491	750,9905	764,2818	754,9742	0,0007	0,0015	1,2590	8,7215
1,5136	0,0630	1,2992	1,0005	1,0006	0,0034	7	-18	0,1453	758,9580	774,0154	763,6567	0,0011	0,0021	1,2590	8,7213
1,5719	0,0563	1,2672	1,0008	1,0010	0,0055	8	-17	0,1417	768,3554	785,5481	773,9500	0,0015	0,0030	1,2590	8,7211
1,6348	0,0499	1,2370	1,0012	1,0015	0,0085	9	-16	0,1384	779,5445	799,2649	786,2275	0,0020	0,0040	1,2590	8,7208
1,7033	0,0439	1,2086	1,0017	1,0021	0,0125	10	-15	0,1352	792,9104	815,5674	800,8826	0,0026	0,0052	1,2590	8,7205
1,7785	0,0383	1,1819	1,0025	1,0029	0,0178	11	-14	0,1322	808,8548	834,8649	818,3212	0,0033	0,0067	1,2591	8,7202
1,8612	0,0331	1,1570	1,0034	1,0040	0,0244	12	-13	0,1294	827,7876	857,5645	838,9520	0,0041	0,0083	1,2591	8,7200
1,9528	0,0282	1,1339	1,0046	1,0053	0,0327	13	-12	0,1268	850,1164	884,0592	863,1759	0,0050	0,0101	1,2591	8,7198
2,0543	0,0237	1,1127	1,0060	1,0068	0,0428	14	-11	0,1245	876,2354	914,7149	891,3735	0,0060	0,0121	1,2591	8,7197
2,1667	0,0196	1,0932	1,0077	1,0086	0,0549	15	-10	0,1223	906,5116	949,8555	923,8914	0,0071	0,0143	1,2591	8,7197
2,2910	0,0159	1,0755	1,0096	1,0108	0,0691	16	-9	0,1203	941,2711	989,7481	961,0273	0,0083	0,0166	1,2591	8,7198
2,4280	0,0126	1,0597	1,0120	1,0133	0,0858	17	-8	0,1185	980,7834	1034,5869	1003,0148	0,0096	0,0191	1,2591	8,7201
2,5783	0,0096	1,0458	1,0146	1,0161	0,1049	18	-7	0,1170	1025,2461	1084,4785	1050,0078	0,0108	0,0217	1,2590	8,7205
2,7420	0,0071	1,0336	1,0177	1,0194	0,1266	19	-6	0,1156	1074,7695	1139,4274	1102,0662	0,0122	0,0244	1,2590	8,7211
2,9190	0,0049	1,0234	1,0211	1,0229	0,1509	20	-5	0,1145	1129,3629	1199,3244	1159,1428	0,0135	0,0270	1,2590	8,7219
3,1088	0,0031	1,0150	1,0248	1,0269	0,1780	21	-4	0,1135	1188,9228	1263,9378	1221,0732	0,0149	0,0297	1,2590	8,7229
3,3103	0,0018	1,0084	1,0290	1,0312	0,2077	22	-3	0,1128	1253,2236	1332,9088	1287,5684	0,0161	0,0323	1,2589	8,7239
3,5220	0,0008	1,0037	1,0335	1,0359	0,2400	23	-2	0,1123	1321,9133	1405,7507	1358,2129	0,0174	0,0347	1,2589	8,7251
3,7418	0,0002	1,0009	1,0383	1,0409	0,2747	24	-1	0,1120	1394,5125	1481,8545	1432,4660	0,0185	0,0370	1,2589	8,7263
3,9671	0,0000	1,0000	1,0435	1,0462	0,3117	25	0	0,1119	1470,4195	1560,4987	1509,6699	0,0195	0,0390	1,2588	8,7276
4,1950	0,0002	1,0009	1,0489	1,0518	0,3507	26	1	0,1120	1548,9203	1640,8651	1589,0620	0,0203	0,0407	1,2588	8,7288
4,4221	0,0008	1,0037	1,0546	1,0575	0,3914	27	2	0,1123	1629,2037	1722,0594	1669,7927	0,0210	0,0420	1,2587	8,7300
4,6447	0,0018	1,0084	1,0605	1,0635	0,4335	28	3	0,1128	1710,3817	1803,1358	1750,9478	0,0215	0,0429	1,2587	8,7310
4,8591	0,0031	1,0150	1,0664	1,0695	0,4764	29	4	0,1135	1791,5139	1883,1242	1831,5741	0,0217	0,0434	1,2587	8,7319
5,0614	0,0049	1,0234	1,0725	1,0755	0,5197	30	5	0,1145	1871,6344	1961,0600	1910,7079	0,0217	0,0434	1,2586	8,7326
5,2481	0,0071	1,0336	1,0785	1,0815	0,5631	31	6	0,1156	1949,7815	2036,0136	1987,4042	0,0214	0,0428	1,2586	8,7331
5,4156	0,0096	1,0458	1,0845	1,0874	0,6059	32	7	0,1170	2025,0270	2107,1193	2060,7659	0,0209	0,0419	1,2586	8,7334
5,5611	0,0126	1,0597	1,0904	1,0932	0,6478	33	8	0,1185	2096,5048	2173,6013	2129,9711	0,0202	0,0404	1,2586	8,7335
5,6820	0,0159	1,0755	1,0960	1,0987	0,6882	34	9	0,1203	2163,4374	2234,7963	2194,2979	0,0193	0,0385	1,2586	8,7334
5,7766	0,0196	1,0932	1,1014	1,1039	0,7267	35	10	0,1223	2225,1583	2290,1717	2253,1443	0,0181	0,0363	1,2586	8,7330
5,8438	0,0237	1,1127	1,1064	1,1088	0,7630	36	11	0,1245	2281,1303	2339,3378	2306,0440	0,0169	0,0337	1,2586	8,7325
5,8831	0,0282	1,1339	1,1111	1,1133	0,7968	37	12	0,1268	2330,9578	2382,0543	2352,6759	0,0155	0,0310	1,2587	8,7318

Продолжение таблицы А10

5,8949	0,0331	1,1570	1,1155	1,1174	0,8277	38	13	0,1294	2374,3940	2418,2310	2392,8676	0,0140	0,0280	1,2587	8,7310
5,8800	0,0383	1,1819	1,1194	1,1211	0,8557	39	14	0,1322	2411,3412	2447,9221	2426,5936	0,0125	0,0250	1,2587	8,7302
5,8401	0,0439	1,2086	1,1229	1,1244	0,8807	40	15	0,1352	2441,8459	2471,3151	2453,9668	0,0110	0,0220	1,2588	8,7292
5,7772	0,0499	1,2370	1,1259	1,1272	0,9027	41	16	0,1384	2466,0876	2488,7152	2475,2255	0,0095	0,0190	1,2588	8,7283
5,6937	0,0563	1,2672	1,1286	1,1297	0,9217	42	17	0,1417	2484,3634	2500,5253	2490,7158	0,0081	0,0162	1,2588	8,7274
5,5923	0,0630	1,2992	1,1308	1,1318	0,9379	43	18	0,1453	2497,0683	2507,2240	2500,8709	0,0068	0,0136	1,2588	8,7266
5,4757	0,0701	1,3328	1,1327	1,1335	0,9515	44	19	0,1491	2504,6735	2509,3414	2506,1879	0,0056	0,0112	1,2589	8,7258
5,3468	0,0775	1,3682	1,1343	1,1349	0,9627	45	20	0,1530	2507,7022	2507,4360	2507,2043	0,0045	0,0091	1,2589	8,7251
5,2084	0,0853	1,4052	1,1355	1,1361	0,9717	46	21	0,1572	2506,7063	2502,0717	2504,4752	0,0036	0,0072	1,2589	8,7244
5,0629	0,0935	1,4440	1,1366	1,1369	0,9790	47	22	0,1615	2502,2440	2493,7984	2498,5520	0,0028	0,0057	1,2589	8,7239
4,9128	0,1020	1,4843	1,1373	1,1376	0,9846	48	23	0,1660	2494,8600	2483,1347	2489,9644	0,0022	0,0043	1,2590	8,7235
4,7601	0,1108	1,5263	1,1379	1,1382	0,9890	49	24	0,1707	2485,0687	2470,5562	2479,2053	0,0016	0,0033	1,2590	8,7231
4,6065	0,1200	1,5700	1,1384	1,1386	0,9922	50	25	0,1756	2473,3418	2456,4861	2466,7207	0,0012	0,0024	1,2590	8,7228
4,4536	0,1295	1,6152	1,1387	1,1389	0,9946	51	26	0,1807	2460,0996	2441,2915	2452,9032	0,0009	0,0017	1,2590	8,7226
4,3025	0,1394	1,6620	1,1390	1,1391	0,9964	52	27	0,1859	2445,7069	2425,2824	2438,0893	0,0006	0,0012	1,2590	8,7224
4,1543	0,1495	1,7103	1,1392	1,1392	0,9976	53	28	0,1913	2430,4718	2408,7143	2422,5601	0,0004	0,0008	1,2590	8,7223
4,0095	0,1600	1,7602	1,1393	1,1393	0,9984	54	29	0,1969	2414,6485	2391,7925	2406,5450	0,0003	0,0006	1,2590	8,7222
3,8688	0,1708	1,8115	1,1394	1,1394	0,9990	55	30	0,2026	2398,4416	2374,6781	2390,2267	0,0002	0,0004	1,2590	8,7221

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б1 – Параметры динамического расчета

Сила давления газов, Н	Pj2, Н	Сила инерции, Н	Суммарная сила, Н	Суммарные силы в КШМ, Н	Угол бета в, рад	Опрокидывающая сила, Н	Сила действующая вдоль оси шатуна, Н	Сила изгибающая шейку кривошипа, Н	Тангенциальная сила на оси кривошипа, Н	Крутящий момент 1-го цилиндра, Н*м	Крутящий момент 2-го цилиндра, Н*м	Крутящий момент 4-го цилиндра, Н*м	Крутящий момент 3-го цилиндра, Н*м	Индикаторное давление, МПа
31,2022	-1514,68	-4942,49	-4911,29	-4911,29	0	0	-4911,3	-4911,29	0	0	1E-14	4,1E-14	-4E-13	0,10679
-14,7578	-1423,33	-4817,56	-4832,32	-4832,32	0,05	-241,9	-4838,4	-4716,906	-1077,32	-40,94	-12,73	-13,536	191,28	0,09679
-60,7178	-1160,31	-4452,58	-4513,3	-4513,3	0,0986	-446,6	-4535,3	-4088,382	-1963,26	-74,6	-25,75	-26,415	188,52	0,08679
-69,9098	-757,341	-3875,94	-3945,85	-3945,85	0,1444	-573,9	-3987,4	-3130,237	-2469,97	-93,86	-38,97	-39,831	451,92	0,08479
-83,6978	-263,022	-3131,69	-3215,39	-3215,39	0,1861	-605,4	-3271,9	-2073,958	-2530,61	-96,16	-51,67	-52,651	328,86	0,08179
-97,4858	263,022	-2274,98	-2372,47	-2372,47	0,2224	-536,4	-2432,3	-1114,085	-2162,21	-82,16	-62,52	-63,446	246,03	0,07879
-111,274	757,341	-1366,45	-1477,73	-1477,73	0,252	-380,4	-1525,9	-409,4059	-1469,96	-55,86	-70,28	-70,113	199,05	0,07579
-125,062	1160,31	-466,251	-591,312	-591,312	0,2739	-166,2	-614,21	-46,10565	-612,48	-23,27	-72,43	-70,206	176,23	0,07279
-134,254	1423,33	371,756	237,502	237,502	0,2874	70,214	247,663	-27,90538	246,086	9,3513	-67,19	-61,571	166,25	0,07079
-134,254	1514,68	1104,79	970,539	970,539	0,292	291,75	1013,44	-291,7481	970,539	36,88	-54,03	-43,168	160,31	0,07079
-89,2791	1423,33	1704,57	1615,3	1615,3	0,2874	477,54	1684,41	-750,7762	1507,83	57,298	-34,55	-15,866	152,73	0,08057
-89,2791	1160,31	2158,89	2069,61	2069,61	0,2739	581,55	2149,77	-1254,326	1745,9	66,344	-12,93	17,1237	140,87	0,08057
-89,2791	757,341	2471,25	2381,97	2381,97	0,252	613,21	2459,63	-1722,041	1756,24	66,737	4,0309	50,4729	124,47	0,08057
-89,2791	263,022	2658,67	2569,39	2569,39	0,2224	580,92	2634,25	-2096,587	1594,86	60,605	7,6704	77,7071	104,67	0,08057
-84,6831	-263,022	2748	2663,32	2663,32	0,1861	501,49	2710,12	-2362,576	1327,78	50,456	-11,25	92,727	83,126	0,08157
-80,0871	-757,341	2771,15	2691,06	2691,06	0,1444	391,43	2719,38	-2526,241	1006,55	38,249	-1107	91,4538	56,162	0,08257
-75,4911	-1160,31	2759,94	2684,45	2684,45	0,0986	265,6	2697,55	-2613,396	668,551	25,405	-1368	73,0844	32,939	0,08357
-66,2991	-1423,33	2741,23	2674,93	2674,93	0,05	133,89	2678,28	-2657,543	332,645	12,641	-653,7	40,5487	16,142	0,08557
-57,1071	-1514,68	2732,91	2675,8	2675,8	4E-17	9E-14	2675,8	-2675,8	3,3E-13	1E-14	-4E-13	9,1E-14	4E-14	0,08757
-47,9151	-1423,33	2741,23	2693,32	2693,32	-0,05	-134,8	2696,69	-2675,808	-334,931	-12,73	191,28	-40,938	-13,536	0,08957
-38,7231	-1160,31	2759,94	2721,22	2721,22	-0,099	-269,2	2734,5	-2649,191	-677,707	-25,75	188,52	-74,604	-26,415	0,09157
-29,5311	-757,341	2771,15	2741,62	2741,62	-0,144	-398,8	2770,47	-2573,701	-1025,46	-38,97	451,92	-93,859	-39,831	0,09357
-20,3391	-263,022	2748	2727,66	2727,66	-0,186	-513,6	2775,6	-2419,655	-1359,86	-51,67	328,86	-96,163	-52,651	0,09557
-7,94254	263,022	2658,67	2650,73	2650,73	-0,222	-599,3	2717,63	-2162,957	-1645,34	-62,52	246,03	-82,164	-63,446	0,09827
37,3523	314,92	2471,25	2508,6	2508,6	-0,252	-645,8	2590,39	-1813,589	-1849,6	-70,28	199,05	-55,859	-70,113	0,10813
100,518	366,435	2158,89	2259,41	2259,41	-0,274	-634,9	2346,91	-1369,357	-1906,01	-72,43	176,23	-23,274	-70,206	0,12187
189,461	417,503	1704,57	1894,04	1894,04	-0,287	-559,9	1975,07	-880,3322	-1768,03	-67,19	166,25	9,35128	-61,571	0,14122

Продолжение таблицы Б1

317,147	468,062	1104,79	1421,94	1421,94	-0,292	-427,4	1484,8	-427,4412	-1421,94	-54,03	160,31	36,8805	-43,168	0,16901
505,71	518,051	371,756	877,466	877,466	-0,287	-259,4	915,008	-103,0982	-909,181	-34,55	152,73	57,2976	-15,866	0,21003
794,82	567,41	-466,251	328,569	328,569	-0,274	-92,33	341,294	25,619107	-340,331	-12,93	140,87	66,3441	17,124	0,27294
1259,82	616,076	-1366,45	-106,637	-106,637	-0,252	27,453	-110,11	-29,54391	106,077	4,0309	124,47	66,737	50,473	0,37411
2053,5	663,993	-2274,98	-221,481	-221,481	-0,222	50,076	-227,07	-104,0051	201,852	7,6704	104,67	60,6046	77,707	0,5468
3507,74	711,1	-3131,69	376,046	376,046	-0,186	-70,81	382,654	242,55309	-295,96	-11,25	83,126	50,4557	92,727	0,86322
50435	757,341	-3875,94	46559,1	46559,1	-0,144	-6772	47049	36935,251	-29144,5	-1107	56,162	38,2488	91,454	11,0737
87191,7	802,659	-4452,58	82739,1	82739,1	-0,099	-8186	83143,1	74949,485	-35991,1	-1368	32,939	25,4049	73,084	19,0712
81985,5	846,999	-4817,56	77167,9	77167,9	-0,05	-3862	77264,5	75324,886	-17203,8	-653,7	16,142	12,6405	40,549	17,9384
49754,7	890,307	-4942,49	44812,2	44812,2	-7E-17	-3E-12	44812,2	44812,222	-1,1E-11	-4E-13	4E-14	1,2E-14	9E-14	10,9257
27396,5	932,531	-4817,56	22578,9	22578,9	0,05	1130,1	22607,2	22039,627	5033,74	191,28	-13,54	-12,727	-40,938	6,06093
15857,5	973,618	-4452,58	11404,9	11404,9	0,0986	1128,4	11460,6	10331,157	4961,07	188,52	-26,41	-25,753	-74,604	3,55028
22874,9	1013,52	-3875,94	18998,9	18998,9	0,1444	2763,5	19198,9	15071,821	11892,7	451,92	-39,83	-38,967	-93,859	5,07713
14127,8	1052,19	-3131,69	10996,1	10996,1	0,1861	2070,5	11189,3	7092,5692	8654,25	328,86	-52,65	-51,675	-96,163	3,17393
9379,09	1089,57	-2274,98	7104,11	7104,11	0,2224	1606,2	7283,42	3336,014	6474,51	246,03	-63,45	-62,523	-82,164	2,14071
6632,26	1125,63	-1366,45	5265,81	5265,81	0,252	1355,6	5437,51	1458,898	5238,14	199,05	-70,11	-70,285	-55,859	1,54305
4943,48	1160,31	-466,251	4477,22	4477,22	0,2739	1258,1	4650,62	349,09701	4637,5	176,23	-70,21	-72,428	-23,274	1,1756
3850,63	1193,59	371,756	4222,39	4222,39	0,2874	1248,3	4403,04	-496,1113	4375	166,25	-61,57	-67,185	9,3513	0,93782
3113,83	1225,4	1104,79	4218,62	4218,62	0,292	1268,1	4405,1	-1268,135	4218,62	160,31	-43,17	-54,034	36,88	0,77751
2601,02	1255,73	1704,57	4305,59	4305,59	0,2874	1272,9	4489,81	-2001,204	4019,15	152,73	-15,87	-34,549	57,298	0,66593
2235,65	1284,52	2158,89	4394,54	4394,54	0,2739	1234,8	4564,74	-2663,394	3707,18	140,87	17,124	-12,933	66,344	0,58643
1971,35	1311,75	2471,25	4442,59	4442,59	0,252	1143,7	4587,45	-3211,769	3275,55	124,47	50,473	4,03092	66,737	0,52893
1778,99	1337,38	2658,67	4437,66	4437,66	0,2224	1003,3	4549,67	-3621,067	2754,52	104,67	77,707	7,67039	60,605	0,48707
1639,8	1361,39	2748	4387,81	4387,81	0,1861	826,21	4464,91	-3892,331	2187,51	83,126	92,727	-11,246	50,456	0,45679
1180,2	1383,73	2771,15	3951,35	3951,35	0,1444	574,74	3992,93	-3709,341	1477,94	56,162	91,454	-1107,5	38,249	0,35679
720,602	1404,39	2759,94	3480,54	3480,54	0,0986	344,37	3497,53	-3388,419	866,814	32,939	73,084	-1367,7	25,405	0,25679
674,642	1423,33	2741,23	3415,87	3415,87	0,05	170,97	3420,15	-3393,668	424,786	16,142	40,549	-653,75	12,641	0,24679
215,042	1440,55	2732,91	2947,95	2947,95	1E-16	3E-13	2947,95	-2947,95	1,1E-12	4E-14	9E-14	-4E-13	1E-14	0,14679
123,122	1456	2741,23	2864,35	2864,35	-0,05	-143,4	2867,94	-2845,733	-356,201	-13,54	-40,94	191,282	-12,727	0,12679
31,2022	1469,69	2759,94	2791,14	2791,14	-0,099	-276,2	2804,77	-2717,266	-695,122	-26,41	-74,6	188,52	-25,753	0,10679
31,2022	1481,58	2771,15	2802,35	2802,35	-0,144	-407,6	2831,84	-2630,714	-1048,17	-39,83	-93,86	451,923	-38,967	0,10679
31,2022	1491,67	2748	2779,21	2779,21	-0,186	-523,3	2828,05	-2465,376	-1385,56	-52,65	-96,16	328,861	-51,675	0,10679
31,2022	1499,94	2658,67	2689,87	2689,87	-0,222	-608,2	2757,77	-2194,898	-1669,64	-63,45	-82,16	246,031	-62,523	0,10679
31,2022	1506,38	2471,25	2502,45	2502,45	-0,252	-644,2	2584,04	-1809,142	-1845,07	-70,11	-55,86	199,049	-70,285	0,10679
31,2022	1510,99	2158,89	2190,09	2190,09	-0,274	-615,4	2274,91	-1327,346	-1847,53	-70,21	-23,27	176,225	-72,428	0,10679
31,2022	1513,76	1704,57	1735,78	1735,78	-0,287	-513,2	1810,04	-806,7749	-1620,3	-61,57	9,3513	166,25	-67,185	0,10679

Продолжение таблицы Б1

31,2022	1514,68	1104,79	1135,99	1135,99	-0,292	-341,5	1186,21	-341,4849	-1135,99	-43,17	36,88	160,308	-54,034	0,10679
31,2022	1513,76	371,756	402,958	402,958	-0,287	-119,1	420,198	-47,34571	-417,522	-15,87	57,298	152,728	-34,549	0,10679
31,2022	1510,99	-466,251	-435,048	-435,048	-0,274	122,25	-451,9	-33,92148	450,622	17,124	66,344	140,873	-12,933	0,10679
31,2022	1506,38	-1366,45	-1335,25	-1335,25	-0,252	343,75	-1378,8	-369,9327	1328,23	50,473	66,737	124,471	4,0309	0,10679
31,2022	1499,94	-2274,98	-2243,78	-2243,78	-0,222	507,31	-2300,4	-1053,655	2044,92	77,707	60,605	104,672	7,6704	0,10679
31,2022	1491,67	-3131,69	-3100,49	-3100,49	-0,186	583,81	-3155	-1999,847	2440,18	92,727	50,456	83,1255	-11,246	0,10679
31,2022	1481,58	-3875,94	-3844,74	-3844,74	-0,144	559,23	-3885,2	-3050,025	2406,68	91,454	38,249	56,1616	-1107,5	0,10679
31,2022	1469,69	-4452,58	-4421,38	-4421,38	-0,099	437,46	-4443	-4005,116	1923,27	73,084	25,405	32,9389	-1367,7	0,10679
31,2022	1456	-4817,56	-4786,36	-4786,36	-0,05	239,57	-4792,4	-4672,043	1067,07	40,549	12,641	16,1419	-653,75	0,10679
31,2022	1440,55	-4942,49	-4911,29	-4911,29	-1E-16	7E-13	-4911,3	-4911,29	2,4E-12	9E-14	1E-14	4,1E-14	-4E-13	0,10679
31,2022	1423,33	-4942,49	-4911,29	-4911,29	0	0	-4911,3	-4911,29	0	0	1E-14	4,1E-14	-4E-13	0,10679

Таблица Б2 - Нагрузки на коренные и шатунные шейки

Нагрузки			1-я коренная шейка	Первый кривошип				Вторая коренная шейка			Второй кривошип			Третья коренная шейка			Третий кривошип		
T1, Н	Ркшпр3	Рк.ш2,4 Н	Рк.ш1, Н	Ф _{кв} , град	Рк1, Н	T1, Н	Крк1, Н	Тк2, Н	Кк2, Н	Рк.ш2, Н	Ф _{кв} , град	T2, Н	Крк2, Н	Тк3, Н	Кк3, Н	Рк.ш3, Н	Ф _{кв} , град	T3, Н	Крк3, Н
0	1260,167182	2235,48953	7279,79	0	14559,58	0	-14559,58	1,6E-13	1117,7	1117,74	180	3,3E-13	-12324,09	7,1E-13	-12460,17	12460,17	540	1,08E-12	-12596,24
-538,6586	1213,873159	2068,395609	7202,77	10	14405,54	-1077,32	-14365,2	371,193	1020,5	1085,96	190	-334,93	-12324,1	-345,566	-12409,06	12413,87	550	-356,201	-12494,03
-981,6291	1150,609992	1590,772327	6938,13	20	13876,26	-1963,26	-13736,67	642,775	719,6	964,872	200	-677,71	-12297,48	-686,415	-12331,52	12350,61	560	-695,122	-12365,56
-1234,986	1094,296575	1166,744541	6507,53	30	13015,05	-2469,97	-12778,53	722,258	278,27	774,009	210	-1025,5	-12221,99	-1036,81	-12250,5	12294,3	570	-1048,17	-12279,01
-1265,307	968,4818228	1403,113004	5996,15	40	11992,3	-2530,61	-11722,25	585,377	-172,85	610,362	220	-1359,9	-12067,95	-1372,71	-12090,81	12168,48	580	-1385,56	-12113,67
-1081,103	742,797547	1951,227513	5488,71	50	10977,43	-2162,21	-10762,38	258,431	-524,44	584,654	230	-1645,3	-11811,25	-1657,49	-11827,22	11942,8	590	-1669,64	-11843,19
-734,9811	407,6013977	2322,232594	5082,28	60	10164,55	-1469,96	-10057,7	-189,821	-702,09	727,299	240	-1849,6	-11461,88	-1847,34	-11459,66	11607,6	600	-1845,07	-11457,43
-306,2402	-44,35389	2320,314073	4856,86	70	9713,727	-612,48	-9694,398	-646,764	-661,63	925,23	250	-1906	-11017,65	-1876,77	-10996,64	11155,65	610	-1847,53	-10975,64
123,0431	-572,252581	1962,792325	4839,66	80	9679,326	246,0862	-9676,198	-1007,06	-426,21	1093,54	260	-1768	-10528,62	-1694,16	-10491,85	10627,75	620	-1620,3	-10455,07
485,26928	-1086,05246	1428,399441	4993,65	90	9987,309	970,5386	-9940,04	-1196,24	-67,847	1198,16	270	-1421,9	-10075,73	-1278,97	-10032,76	10113,95	630	-1135,99	-9989,777
753,91608	-1453,88471	1116,286941	5253,91	100	10507,82	1507,832	-10399,07	-1208,51	323,84	1251,14	280	-909,18	-9751,39	-663,352	-9723,514	9746,115	640	-417,522	-9695,638
872,94857	-1547,39906	1324,419171	5520,76	110	11041,52	1745,897	-10902,62	-1043,11	639,97	1223,79	290	-340,33	-9622,673	55,1455	-9652,443	9652,601	650	450,6224	-9682,214
878,11895	-1325,89152	1695,817649	5752,58	120	11505,17	1756,238	-11370,33	-825,081	846,25	1181,9	300	106,077	-9677,836	717,156	-9848,031	9874,108	660	1328,235	-10018,22
797,4286	-911,364243	2002,780235	5926,33	130	11852,67	1594,857	-11744,88	-696,502	996,29	1215,61	310	201,852	-9752,297	1123,39	-10227,12	10288,64	670	2044,924	-10701,95

Продолжение таблицы Б2

663,89104	-618,607342	2621,886947	6042,02	140	12084,04	1327,782	-12010,87	-811,871	1302,6	1534,86	320	-295,96	-9405,739	1072,11	-10526,94	10581,39	680	2440,184	-11648,14
503,27313	4029,386871	49057,19563	6108,04	150	12216,07	1006,546	-12174,53	-15075,5	19731	24830,9	330	-29144	27286,96	-13368,9	7294,3206	15229,39	690	2406,68	-12698,32
334,27529	19735,85249	85506,47386	6139,95	160	12279,9	668,5506	-12261,69	-18329,8	38781	42895	340	-35991	65301,19	-17033,9	25823,892	30935,85	700	1923,274	-13653,41
166,32244	15715,88693	79857,56439	6155,17	170	12310,33	332,6449	-12305,84	-8768,23	38991	39964,9	350	-17204	65676,59	-8068,37	25678,129	26915,89	710	1067,071	-14320,34
1,639E-13	-897,82596	47488,02269	6162,05	180	12324,09	3,28E-13	-12324,09	-5,7E-12	23744	23744	360	-1E-11	35163,93	-4,3E-12	10302,174	10302,17	720	2,41E-12	-14559,58
-167,4655	-8459,57041	25222,83181	6164,33	190	12328,65	-334,931	-12324,1	2684,33	12358	12645,9	370	5033,74	12391,34	2516,87	-1084,123	2740,43	0	0	-14559,58
-338,8537	-4088,57002	13896,1004	6158,07	200	12316,14	-677,707	-12297,48	2819,39	6490,2	7076,11	380	4961,07	682,8646	1941,87	-6841,167	7111,43	10	-1077,32	-14365,2
-512,7279	-4725,00493	21279,11686	6132,47	210	12264,94	-1025,46	-12221,99	6459,08	8822,8	10934,4	390	11892,7	5423,529	4964,72	-4156,573	6474,995	20	-1963,26	-13736,67
-679,9302	-2932,82711	12859,9548	6072,16	220	12144,32	-1359,86	-12067,95	5007,06	4756,1	6905,88	400	8654,25	-2555,723	3092,14	-7667,126	8267,173	30	-2469,97	-12778,53
-822,672	-1969,63536	8494,582159	5962,65	230	11925,3	-1645,34	-11811,25	4059,93	2749,5	4903,33	410	6474,51	-6312,278	1971,95	-9017,264	9230,365	40	-2530,61	-11722,25
-924,802	-1600,11715	6176,347401	5805,08	240	11610,16	-1849,6	-11461,88	3543,87	1636,2	3903,37	420	5238,14	-8189,394	1537,97	-9475,886	9599,883	50	-2162,21	-10762,38
-953,0037	-1392,82624	4945,655571	5590,65	250	11181,3	-1906,01	-11017,65	3271,75	859,23	3382,7	430	4637,5	-9299,195	1583,77	-9678,447	9807,174	60	-1469,96	-10057,7
-884,0139	-1103,78018	4391,8422	5338,02	260	10676,04	-1768,03	-10528,62	3071,52	192,11	3077,52	440	4375	-10144,4	1881,26	-9919,401	10096,22	70	-612,48	-9694,398
-710,9698	-664,467211	4301,571479	5087,79	270	10175,57	-1421,94	-10075,73	2820,28	-420,35	2851,43	450	4218,62	-10916,43	2232,35	-10296,31	10535,53	80	246,0862	-9676,198
-454,5904	-120,683298	4444,810791	4896,84	280	9793,683	-909,181	-9751,39	2464,16	-949,05	2640,61	460	4019,15	-11649,5	2494,84	-10794,77	11079,32	90	970,5386	-9940,04
-170,1657	450,908648	4579,733318	4814,34	290	9628,69	-340,331	-9622,673	2023,75	-1344,5	2429,67	470	3707,18	-12311,69	2607,51	-11355,38	11650,91	100	1507,832	-10399,07
53,038356	943,7217049	4566,813868	4839,21	300	9678,417	106,0767	-9677,836	1584,74	-1591,1	2245,67	480	3275,55	-12860,06	2510,72	-11881,34	12143,72	110	1745,897	-10902,62
100,92612	1324,589059	4467,335213	4877,19	310	9754,386	201,8522	-9752,297	1276,33	-1758,5	2172,89	490	2754,52	-13269,36	2255,38	-12319,85	12524,59	120	1756,238	-11370,33
-147,9799	1583,417091	4677,871995	4705,2	320	9410,394	-295,96	-9405,739	1241,74	-2067,4	2411,69	500	2187,51	-13540,62	1891,19	-12642,75	12783,42	130	1594,857	-11744,88
-14572,23	1561,592069	40671,4539	19962,3	330	39924,64	-29144,5	27286,96	15311,2	-20322	25444,6	510	1477,94	-13357,63	1402,86	-12684,25	12761,59	140	1327,782	-12010,87
-17995,53	1440,375173	78342,69915	37281,4	340	74562,74	-35991,1	65301,19	18428,9	-39169	43287,8	520	866,814	-13036,71	936,68	-12605,62	12640,38	150	1006,546	-12174,53
-8601,91	1463,629091	78719,6994	33946,2	350	67892,46	-17203,8	65676,59	8814,3	-39359	40334,2	530	424,786	-13041,96	546,668	-12651,82	12663,63	160	668,5506	-12261,69
-5,49E-12	1252,149371	47760,17197	17582	360	35163,93	-1,1E-11	35163,93	6E-12	-23880	23880,1	540	1,1E-12	-12596,24	166,322	-12451,04	12452,15	170	332,6449	-12305,84
2516,8692	1210,336873	24887,90944	6687,37	370	13374,74	5033,738	12391,34	-2694,97	-12443	12731,2	550	-356,2	-12494,03	-178,1	-12409,06	12410,34	180	3,28E-13	-12324,09
2480,5328	1155,567632	13066,92487	2503,92	380	5007,841	4961,066	682,8646	-2828,09	-6524,2	7110,8	560	-695,12	-12365,56	-515,027	-12344,83	12355,57	190	-334,931	-12324,1
5946,3513	1118,507604	17733,53947	6535,5	390	13071	11892,7	5423,529	-6470,44	-8851,3	10964,1	570	-1048,2	-12279,01	-862,94	-12288,24	12318,51	200	-677,707	-12297,48
4327,1248	1027,401328	9657,850517	4511,87	400	9023,733	8654,25	-2555,723	-5019,9	-4779	6930,95	580	-1385,6	-12113,67	-1205,51	-12167,83	12227,4	210	-1025,46	-12221,99

Продолжение таблицы Б2

3237,2537	851,1449254	5777,429897	4521,18	410	9042,35	6474,507	-6312,278	-4072,07	-2765,5	4922,35	590	-1669,6	-11843,19	-1514,75	-11955,57	12051,14	220	-1359,86	-12067,95
2619,0694	564,5084171	3752,91481	4860,67	420	9721,331	5238,139	-8189,394	-3541,6	-1634	3900,38	600	-1845,1	-11457,43	-1745,21	-11634,34	11764,51	230	-1645,34	-11811,25
2318,7511	170,0385824	2494,763073	5195,71	430	10391,41	4637,502	-9299,195	-3242,52	-838,22	3349,11	610	-1847,5	-10975,64	-1848,57	-11218,76	11370,04	240	-1849,6	-11461,88
2187,5016	-319,830456	1649,81132	5523,8	440	11047,6	4375,003	-10144,4	-2997,65	-155,33	3001,67	620	-1620,3	-10455,07	-1763,15	-10736,36	10880,17	250	-1906,01	-11017,65
2109,3098	-838,555294	1466,002915	5851,61	450	11703,21	4218,62	-10916,43	-2677,31	463,33	2717,1	630	-1136	-9989,777	-1452,01	-10259,2	10361,44	260	-1768,03	-10528,62
2009,5732	-1271,62216	1997,97055	6161,66	460	12323,32	4019,146	-11649,5	-2218,33	976,93	2423,92	640	-417,52	-9695,638	-919,731	-9885,686	9928,378	270	-1421,94	-10075,73
1853,5889	-1480,49326	2667,805169	6428,86	470	12857,71	3707,178	-12311,69	-1628,28	1314,7	2092,8	650	450,622	-9682,214	-229,279	-9716,802	9719,507	280	-909,181	-9751,39
1637,7752	-1367,13634	3136,916119	6635,33	480	13270,66	3275,55	-12860,06	-973,658	1420,9	1722,5	660	1328,23	-10018,22	493,952	-9820,449	9832,864	290	-340,331	-9622,673
1377,2582	-953,508495	3282,273394	6776,12	490	13552,24	2754,516	-13269,36	-354,796	1283,7	1331,83	670	2044,92	-10701,95	1075,5	-10189,89	10246,49	300	106,0767	-9677,836
1093,7569	-418,545654	3088,040772	6858,09	500	13716,18	2187,514	-13540,62	126,335	946,24	954,639	680	2440,18	-11648,14	1321,02	-10700,22	10781,45	310	201,8522	-9752,297
738,96807	-97,697674	2495,35649	6719,57	510	13439,15	1477,936	-13357,63	464,372	329,66	569,487	690	2406,68	-12698,32	1055,36	-11052,03	11102,3	320	-295,96	-9405,739
433,40718	4022,239034	2019,726749	6532,75	520	13065,5	866,8144	-13036,71	528,23	-308,35	611,641	700	1923,27	-13653,41	-13610,6	6816,7756	15222,24	330	-29144,5	27286,959
212,39282	19697,94873	1665,1981	6524,44	530	13048,88	424,7856	-13041,96	321,143	-639,19	715,328	710	1067,07	-14320,34	-17462	25490,428	30897,95	340	-35991,1	65301,192
5,418E-13	15767,20349	1963,34024	6298,12	540	12596,24	1,08E-12	-12596,24	6,6E-13	-981,67	981,67	720	2,4E-12	-14559,58	-8601,91	25558,506	26967,2	350	-17203,8	65676,593
-178,1003	-897,82596	2065,556902	6249,55	550	12499,1	-356,201	-12494,03	178,1	-1032,8	1048,02	0	0	-14559,58	-5,5E-12	10302,174	10302,17	360	-1,1E-11	35163,93
-347,5611	-8989,26464	2271,381131	6192,54	560	12385,08	-695,122	-12365,56	-191,098	-999,82	1017,92	10	-1077,3	-14365,2	1978,21	-986,9314	2210,735	370	5033,738	12391,335
-524,0861	-4503,19509	2445,23559	6161,83	570	12323,66	-1048,17	-12279,01	-457,543	-728,83	860,549	20	-1963,3	-13736,67	1498,9	-6526,905	6696,805	380	4961,066	682,86461
-692,778	-5223,29772	2557,890766	6096,33	580	12192,65	-1385,56	-12113,67	-542,208	-332,43	636,003	30	-2470	-12778,53	4711,37	-3677,5	5976,702	390	11892,7	5423,5288
-834,8208	-3432,1263	2533,50208	5980,15	590	11960,3	-1669,64	-11843,19	-430,486	60,47	434,712	40	-2530,6	-11722,25	3061,82	-7138,987	7767,874	400	8654,25	-2555,723
-922,5347	-2394,60682	2271,176432	5802,52	600	11605,05	-1845,07	-11457,43	-158,569	347,53	381,995	50	-2162,2	-10762,38	2156,15	-8537,328	8805,393	410	6474,507	-6312,278
-923,7668	-1883,94483	1733,03302	5565,03	610	11130,05	-1847,53	-10975,64	188,786	458,97	496,28	60	-1470	-10057,7	1884,09	-9123,546	9316,055	420	5238,139	-8189,394
-810,149	-1492,30486	976,6011902	5289,94	620	10579,88	-1620,3	-10455,07	503,909	380,33	631,331	70	-612,48	-9694,398	2012,51	-9496,797	9707,695	430	4637,502	-9299,195
-567,9973	-1023,91657	398,6107212	5027,08	630	10054,16	-1135,99	-9989,777	691,04	156,79	708,604	80	246,086	-9676,198	2310,54	-9910,301	10176,08	440	4375,003	-10144,4
-208,7612	-453,842436	1000,838462	4852,31	640	9704,624	-417,522	-9695,638	694,031	-122,2	704,707	90	970,539	-9940,04	2594,58	-10428,23	10746,16	450	4218,62	-10916,43
225,31119	165,3715766	1669,562353	4846,35	650	9692,694	450,6224	-9682,214	528,605	-358,43	638,665	100	1507,83	-10399,07	2763,49	-11024,28	11365,37	460	4019,146	-11649,5
664,11741	723,0864734	1957,117544	5052,95	660	10105,89	1328,235	-10018,22	208,831	-442,2	489,028	110	1745,9	-10902,62	2726,54	-11607,15	11923,09	470	3707,178	-12311,69
1022,4618	1173,670706	1879,125221	5447,78	670	10895,57	2044,924	-10701,95	-144,343	-334,19	364,033	120	1756,24	-11370,33	2515,89	-12115,2	12373,67	480	3275,55	-12860,06

Продолжение таблицы Б2

1220,092	1494,774431	1597,788559	5950,5	680	11900,99	2440,184	-11648,14	-422,663	-48,37	425,422	130	1594,86	-11744,88	2174,69	-12507,12	12694,77	490	2754,516	-13269,36
1203,3399	1696,085235	1495,18951	6462,19	690	12924,37	2406,68	-12698,32	-539,449	343,72	639,65	140	1327,78	-12010,87	1757,65	-12775,75	12896,09	500	2187,514	-13540,62
961,63681	1626,380842	1788,911648	6894,1	700	13788,2	1923,274	-13653,41	-458,364	739,44	869,98	150	1006,55	-12174,53	1242,24	-12766,08	12826,38	510	1477,936	-13357,63
533,53543	1472,473876	2164,483184	7180,02	710	14360,04	1067,071	-14320,34	-199,26	1029,3	1048,43	160	668,551	-12261,69	767,682	-12649,2	12672,47	520	866,8144	-13036,71
1,203E-12	1479,55459	2278,163138	7279,79	720	14559,58	2,41E-12	-14559,58	166,322	1126,9	1139,08	170	332,645	-12305,84	378,715	-12673,9	12679,55	530	424,7856	-13041,96

Таблица Б3 - Таблица крутящего момента двигателя с шагом в 10 градусов ПКВ

1-й		2-й		3-й		4-й		
$M_{кр.ц}, Нм$	$\varphi^{\circ}_{кривош}$	$M_{кр.ц}, Нм$						
0	0,0	1,86E-14	180,0	-1,6E-13	360,0	6,06E-14	540,0	-8,2E-14
-61,7772	10,0	-18,8159	190,0	84,692	370,0	-20,1678	550,0	-16,0688
-111,398	20,0	-38,1008	200,0	196,6959	380,0	-40,7166	560,0	6,480863
-139,526	30,0	-57,7468	210,0	167,2159	390,0	-61,5385	570,0	-91,5955
-141,729	40,0	-76,7528	220,0	133,7212	400,0	-81,6247	580,0	-166,386
-119,257	50,0	-92,7112	230,0	117,6368	410,0	-98,8384	590,0	-193,17
-78,337	60,0	-103,927	240,0	121,2231	420,0	-109,992	600,0	-171,033
-28,2463	70,0	-106,326	250,0	137,9166	430,0	-111,341	610,0	-107,997
21,21328	80,0	-96,9488	260,0	158,4546	440,0	-99,5264	620,0	-16,8074
62,03231	90,0	-74,5736	270,0	174,5935	450,0	-72,8294	630,0	89,22285
89,44341	100,0	-40,9492	280,0	181,084	460,0	-32,396	640,0	197,1822
102,225	110,0	-1,48734	290,0	176,1664	470,0	17,07241	650,0	293,9765
102,0204	120,0	35,0601	300,0	160,9569	480,0	67,61203	660,0	365,6494
92,12342	130,0	58,21937	310,0	138,254	490,0	109,438	670,0	398,0348
76,22788	140,0	58,83301	320,0	103,956	500,0	133,2579	680,0	372,2748
57,48651	150,0	-155,033	330,0	71,30844	510,0	132,7957	690,0	106,5576
38,0162	160,0	-230,376	340,0	46,75047	520,0	106,7266	700,0	-38,8826
18,81788	170,0	-172,888	350,0	20,86388	530,0	59,38656	710,0	-73,8198
1,86E-14	180,0	-1,6E-13	360,0	6,06E-14	540,0	1,34E-13	720,0	5,16E-14

Таблица Б4 - Таблица сил, действующих на шатунную шейку КВ с шагом в 10 градусов ПКВ

Суммарная сила, действующая на шатунную шейку по радиусу кривошипа, кН	Рш.ш. , (кН)	Суммарная сила, действующая на колено вала по радиусу кривошипа, (кН)	Результирующая сила, действующая на колено вала, (кН)	Полная тангенциальная сила, (кН)	Сила, действующая по радиусу кривошипа, (кН)
-12,9695	12,9695	-22,3652	22,36521	0	-7,97406
-12,5812	12,7010	-21,9769	22,04573	-1,740203	-7,58579
-11,4985	11,9189	-20,8942	21,12852	-3,137961	-6,50305
-9,94793	10,6962	-19,3437	19,73893	-3,930311	-4,95253
-8,24336	9,1593	-17,6391	18,08528	-3,992378	-3,24796
-6,70796	7,5021	-16,1037	16,45037	-3,359352	-1,71255
-5,59829	6,0175	-14,994	15,15555	-2,206677	-0,60288
-5,051	5,1133	-14,4467	14,46864	-0,795671	-0,05559
-5,0666	5,1017	-14,4623	14,47468	0,597557	-0,07119
-5,53167	5,8011	-14,9274	15,02934	1,747389	-0,53626
-6,26778	6,7552	-15,6635	15,86487	2,519533	-1,27238
-7,08781	7,6504	-16,4836	16,73319	2,879578	-2,0924
-7,84119	8,3512	-17,2369	17,47486	2,873813	-2,84578
-8,43763	8,8277	-17,8334	18,0212	2,595026	-3,44223
-8,84858	9,1054	-18,2443	18,37025	2,147264	-3,85317
-9,09278	9,2359	-18,4885	18,55931	1,619338	-4,09738
-9,21479	9,2768	-18,6105	18,64132	1,070879	-4,21938
-9,26346	9,2786	-18,6592	18,66674	0,530081	-4,26806
-9,27511	9,2751	-18,6709	18,67086	5,24E-16	-4,27971
-9,26301	9,2782	-18,6588	18,66628	-0,530024	-4,2676
-9,22418	9,2864	-18,6199	18,65083	-1,073262	-4,22877
-9,11134	9,2554	-18,5071	18,57844	-1,626672	-4,11593
-8,87511	9,1347	-18,2709	18,39834	-2,162052	-3,87971
-8,4596	8,8535	-17,8553	18,04532	-2,611584	-3,46419
-7,89436	8,4197	-17,2901	17,5362	-2,927512	-2,89896
-7,17175	7,7720	-16,5675	16,83605	-2,995105	-2,17635

Продолжение таблицы Б4

-6,37455	6,9349	-15,7703	16,00501	-2,730953	-1,37914
-5,64009	6,0186	-15,0358	15,18187	-2,100664	-0,64468
-5,13283	5,2608	-14,5286	14,5743	-1,153497	-0,13742
-4,99248	4,9927	-14,3882	14,38829	-0,041897	0,002927
-5,26523	5,3571	-14,661	14,6942	0,987608	-0,26982
-5,83145	6,0577	-15,2272	15,31525	1,639982	-0,83604
-6,34366	6,5566	-15,7394	15,82642	1,657268	-1,34825
0,507549	4,3965	-8,8882	9,903124	-4,367126	5,502954
8,453225	10,6569	-0,94252	6,557549	-6,48946	13,44863
16,23398	16,9487	6,838236	8,39519	-4,870087	21,22939
13,53588	13,5359	4,14013	4,14013	-4,54E-15	18,53128
5,404152	5,9073	-3,9916	4,650199	2,38569	10,39956
-0,36551	1,6669	-9,76126	9,895818	1,626349	4,629893
6,487095	8,5312	-2,90865	6,257791	5,54073	11,4825
0,939986	4,8032	-8,45576	9,679199	4,710308	5,935392
-1,93097	4,2329	-11,3267	11,93664	3,766795	3,064435
-3,30612	4,6809	-12,7019	13,127	3,313711	1,689288
-4,06247	5,3070	-13,4582	13,88467	3,414735	0,932937
-4,72398	6,1163	-14,1197	14,64444	3,884974	0,27143
-5,52717	7,1044	-14,9229	15,57615	4,46351	-0,53177
-6,50475	8,1547	-15,9005	16,64373	4,918127	-1,50934
-7,57141	9,1294	-16,9672	17,71734	5,100957	-2,57601
-8,60128	9,9301	-17,997	18,66866	4,962435	-3,60587
-9,48518	10,5131	-18,8809	19,41768	4,533998	-4,48977
-10,1613	10,8821	-19,5571	19,94106	3,894479	-5,16591
-10,2502	10,6603	-19,6459	19,86297	2,928338	-5,25477
-10,0779	10,2762	-19,4737	19,57702	2,008688	-5,08254
-10,1842	10,2690	-19,5799	19,62418	1,316915	-5,18879
-9,72752	9,7453	-19,1233	19,13229	0,587715	-4,73211
-9,63651	9,6365	-19,0323	19,03225	1,71E-15	-4,6411
-9,56964	9,5865	-18,9654	18,97389	-0,568107	-4,57423
-9,5145	9,5834	-18,9103	18,945	-1,146947	-4,5191

Продолжение таблицы Б4

-9,38159	9,5404	-18,7773	18,85718	-1,733479	-4,38618
-9,12138	9,4067	-18,5171	18,65933	-2,299288	-4,12597
-8,68854	9,1237	-18,0843	18,29736	-2,784182	-3,69314
-8,06355	8,6383	-17,4593	17,73209	-3,098371	-3,06815
-7,2744	7,9217	-16,6702	16,96263	-3,136375	-2,279
-6,41122	6,9974	-15,807	16,05366	-2,803561	-1,41581
-5,62501	5,9874	-15,0208	15,16021	-2,051532	-0,6296
-5,10413	5,1851	-14,4999	14,52856	-0,912564	-0,10872
-5,02901	5,0519	-14,4248	14,43277	0,480913	-0,0336
-5,51575	5,8353	-14,9115	15,03264	1,904564	-0,52034
-6,56696	7,2545	-15,9627	16,25766	3,082761	-1,57155
-8,04922	8,8815	-17,445	17,84426	3,753744	-3,05382
-9,70904	10,4047	-19,1048	19,46756	3,740723	-4,71363
-11,2258	11,6214	-20,6215	20,83952	3,006382	-6,23037
-12,2876	12,4010	-21,6834	21,74782	1,672861	-7,29224