

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

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(наименование института полностью)

Кафедра «Энергетические машины и системы управления»
(наименование)

13.03.03 Энергетическое машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

«Альтернативные источники энергии транспортных средств»

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Двигатель с непосредственным впрыском в цилиндр компримированного природного газа

Студент

В.Ю. Тропанец

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, В.В. Смоленский

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

Тольятти 2022

АННОТАЦИЯ

Применение непосредственного впрыска в цилиндр компримированного природного газа в автомобильных двигателях позволит снизить нагрузку на ископаемые углеводородные источники энергии. Анализ возможностей применения непосредственного впрыска как основного или второго топлива, является актуальной задачей бакалаврской работы и соответствует профилю направления обучения.

Целью бакалаврской работы является оценка возможностей эффективного применения непосредственного впрыска в поршневых двигателях внутреннего сгорания.

В бакалаврской работе представлены результаты проектирования двигателя с искровым зажиганием с двух топливной системой питания, рассчитанной на работу с бензином и газовым топливом (компримированный природный газ). Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка состоит из аннотации, введения, 4 разделов, заключения с основными результатами и выводами, содержит 32 рисунка, 14 таблиц, списка использованных источников (37 источников). Основной текст изложен на 63 страницах.

Графическая часть работы содержит 8 листов формата А1 иллюстрирующих материал, представленный в пояснительной записке.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Непосредственный впрыск газа, его свойства и перспективы	7
1.1 Прямой впрыск гомогенной смеси.....	9
1.2 Инженерные газовые форсунки.....	14
1.3 Электромагнитные газовые форсунки.....	15
1.4 Пьезофорсунки.....	19
2 Тепловой расчет проектируемого двигателя	22
3 Кинематический и динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя	39
3.1 Кинематический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя.....	39
3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя	41
4 Анализ влияния вида топлива (бензин, КПП) на рабочий процесс ДВС...	50
4.1 Влияния вида топлива (бензин, КПП) на максимальную температуру и давление цикла	50
4.2 Влияния вида топлива (бензин, КПП) на эффективные показатели цикла	53
4.3 Анализ конструкции спроектированного двигателя.....	56
Заключение	58
Список используемых источников	60

ВВЕДЕНИЕ

Всего за полтора десятилетия дизельный двигатель с непосредственным впрыском почти полностью вытеснил камерный дизельный двигатель, прежде всего по причинам расхода топлива, крутящего момента и производительности.

Уже несколько лет бензиновый двигатель готовится последовать такому же примеру.

На протяжении почти столетия предпринимались неоднократные попытки разработки двигателей с непосредственным впрыском бензина, но только в последние два десятилетия, появились первые технологии для успешного выхода на рынок (внедрения концепции прямого впрыска бензина компанией Mitsubishi в Европе).

В отличие от дизельного, при создании бензинового двигателя с непосредственным впрыском возникает ряд серьезных трудностей, поэтому выход на рынок бензинового двигателя займет больше времени.

Однако выигрыш в мощности и крутящем моменте, большой потенциал для снижения расхода топлива и выбросов CO₂, а также выбросов загрязняющих веществ заставляют этот путь.

При ближайшем рассмотрении можно выделить три направления развития с разными результатами [6,7]:

- Прямой впрыск однородной (гомогенной) смеси: разработка прямого впрыска более или менее однородной смеси сравнительно проста. Для него не требуется никаких специальных видов топлива, так как существующая доочистка выхлопных газов в принципе может быть сохранена. Это делает этот метод пригодным для использования во всем мире. При этой процедуре оптимизация мощности и крутящего момента, а также динамическое поведение находятся на переднем плане. Созданная под влиянием первых заметных успехов в

автоспорте, эта концепция подходит для особо мощных и, следовательно, спортивных автомобилей.

- Прямой впрыск расслоенной смеси: прямой впрыск с расслоенной смесью дорабатывается, в первую очередь, для снижения расхода топлива и выбросов CO₂. В дополнение к концепции «настенных направляющих» от Mitsubishi, процессы с воздушной направляющей также нашли свое применение в серийном производстве в Европе. Однако из-за задействованного принципа ожидаемые выгоды от потребления этих процессов еще не материализовались, особенно в более высоком диапазоне нагрузки и скорости. Следовательно, все еще существуют обоснованные сомнения относительно значения этих концепций, поскольку они слишком сложны и не могут использоваться во всем мире из-за повышенных усилий по доочистке выхлопных газов в сверхстехиометрическом диапазоне и необходимого топлива, не содержащего серы. Помня об этих аспектах, в течение некоторого времени метод управления лучом снова вышел на первый план. Хотя он предъявляет еще более высокие требования к смесеобразованию, можно ожидать экономии расхода топлива до 20%. Это тот же значительный порядок величины, который был достигнут в дизельном двигателе при переходе с камерных двигателей на прямой впрыск. В результате дизельный двигатель имеет преимущество в потреблении только от 10 до 15% по объему.
- Прямой впрыск гомогенной смеси и управляемое самовоспламенение, воспламенение от сжатия: в области исследований в течение длительного времени исследовались процессы с прямым впрыском, которые работают с однородной смесью и контролируемым воспламенением от сжатия. Они также известны под английскими названиями «HCCI» (однородное зажигание от сжатия) и «CAI» (контролируемое самовоспламенение)

и разрабатываются как новый процесс сгорания для бензиновых и дизельных двигателей. Из-за большого потенциала концепций с наименьшими выбросами и хорошей эффективностью сгорания на них возлагаются большие надежды. В отношении топлива, специально разработанного для этих процессов сгорания, может осуществиться давняя мечта: из сегодняшних процессов сгорания для бензиновых двигателей, с одной стороны, и для дизельных двигателей, с другой стороны, должен появиться оптимальный общий новый процесс сгорания, который сочетает в себе преимущества обоих двигателей.

Помимо прямого впрыска топлива, сейчас активно исследуется прямой впрыск природного газа, метана и водорода. Помимо сокращения топлива и CO_2 , это также снижает выбросы загрязняющих веществ. Также можно использовать возобновляемые источники энергии, такие как возобновляемый метан и возобновляемый водород. Эти разработки очень многообещающие, но все еще находятся в стадии исследований / предварительных разработок.

1 Непосредственный впрыск газа, его свойства и перспективы

Идея современного прямого впрыска в бензиновых двигателях состоит в том, чтобы объединить преимущества дизельного двигателя с преимуществами бензинового двигателя. Преимуществами дизельных двигателей являются низкие газообменные потери, контроль качества (регулирование нагрузки исключительно в зависимости от количества подаваемого топлива) и низкие тепловые потери стенок. Небольшие размеры, хорошие характеристики и низкий уровень выбросов вредных веществ говорят в пользу бензинового двигателя [8].

Для бензиновых двигателей с прямым впрыском существует два различных режима работы (стратегии работы), которые существенно различаются по времени впрыска, положению дроссельной заслонки и составу смеси.

В более высоком диапазоне нагрузок двигатель работает с однородным составом смеси, как бензиновый двигатель с внешним смесеобразованием, и в режиме частичной нагрузки с расслоением заряда. Это необходимо, потому что для достижения режима без дросселирования в режиме частичной нагрузки с образованием гомогенной смеси, заряд в камере сгорания двигателя должен быть так обеднен, чтобы воспламенение больше не могло быть безопасно инициировано из-за предела воспламенения при соотношении воздух-топливо λ , равном 1,5. Чтобы обеспечить надежное воспламенение и воспламенение топливовоздушной смеси, смесь должна быть образована таким образом, чтобы в области свечи зажигания в момент начала зажигания была горючая смесь. На рисунке 1 показаны различные режимы работы с прямым впрыском для реализации гомогенного смесеобразования и смесеобразования с расслоенным зарядом (рисунок 1а) [9].

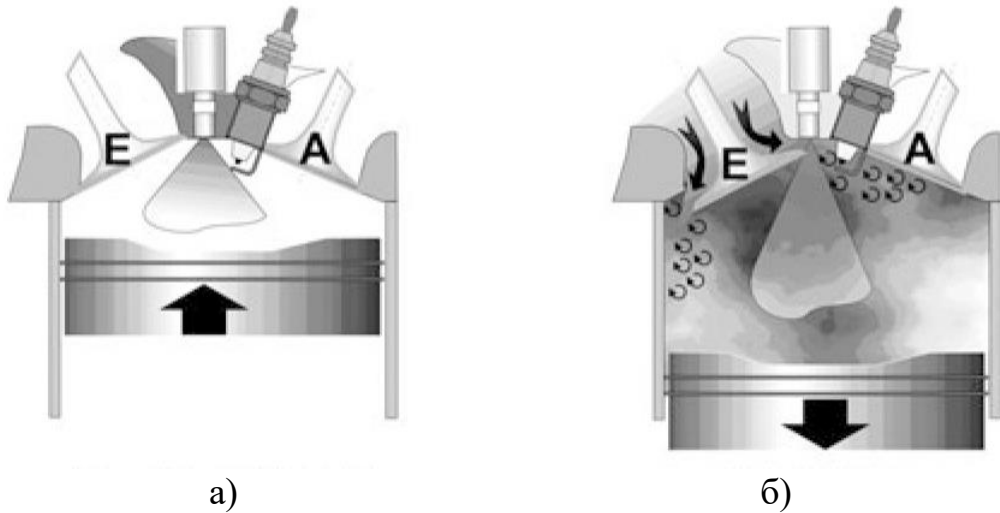


Рисунок 1 – Состав смеси и режимы работы в бензиновом двигателе с непосредственным впрыском. (а) режим смесеобразования с расслоенным зарядом, (б) режим гомогенного смесеобразования

При более высоких нагрузках и при полной нагрузке топливо впрыскивается в камеру сгорания в режиме впрыска такта всасывания, когда поршень движется вниз, рисунок 1б. Подобно подготовке топлива в бензиновых двигателях с внешним смесеобразованием (впрыск во впускной коллектор), топливо впрыскивается во время процесса впуска и заранее смешивается воздухом, поступающим с высокой скоростью.

При последующем сжатии это приводит к однородному распределению смеси с приблизительно постоянным соотношением воздух-топливо во всей камере сгорания в точке воспламенения. При полной нагрузке существуют почти идентичные граничные условия в отношении производительности для впрыска во впускной коллектор (дроссельная заслонка полностью открыта) и для прямого впрыска (работа без дроссельной заслонки). Тем не менее, бензиновые двигатели с прямым впрыском имеют более высокую производительность. Это происходит из-за отвода тепла в камере сгорания в связи с полным испарением топлива во время процесса всасывания в цилиндре двигателя, что также может улучшить детонационные характеристики. Кроме того, когда топливо впрыскивается непосредственно в камеру сгорания, устраняется эффект топливной пленки на стенке во впускном коллекторе. Это приводит к лучшему поведению при холодном

пуске и в случае изменения нагрузки, лучшему поведению при эксплуатации и меньшим выбросам загрязняющих веществ [10].

В режиме послойной зарядки при частичной нагрузке бензиновый двигатель с прямым впрыском в идеале должен работать с полностью открытой дроссельной заслонкой. Как и в случае с дизельным двигателем, управление нагрузкой происходит исключительно за счет количества впрыскиваемого топлива (контроль качества), которое впрыскивается непосредственно в камеру сгорания во время движения поршня вверх, непосредственно перед зажиганием. Этот процесс называется впрыском на такте сжатия, рисунок 1а. В идеале в центре камеры сгорания должно находиться облако горючей смеси, окруженное воздухом. Таким образом, заряд расслаивается в камере сгорания, и тепловые потери в стенку камеры сгорания, которые обычно сопровождают процесс сгорания уменьшаются за счет изолирующего слоя воздуха. Если обобщить, то в зоне горения состав смеси близок к стехиометрическому, а с учетом не использованного воздуха у стенок камеры сгорания коэффициент избытка воздуха может варьироваться от 1,5 до 7, с большими градиентами соотношения воздух-топливо, возникающими в камере сгорания в точке воспламенения. На рисунке 2 показано распределение рабочих режимов впрыска непосредственного впрыска по всей карте режимов работы двигателя [11].

1.1 Прямой впрыск гомогенной смеси

При полной нагрузке существуют почти идентичные граничные условия в отношении производительности для впрыска во впускной коллектор (дроссельная заслонка полностью открыта) и для прямого впрыска (работа без дроссельной заслонки). Тем не менее, бензиновые двигатели с прямым впрыском имеют улучшенный заряд благодаря более высокой производительности. Это связано с отбором тепла из камеры сгорания за счет

испарения топлива в камере сгорания, что также отвечает за лучшее детонационное поведение при прямом впрыске [12].

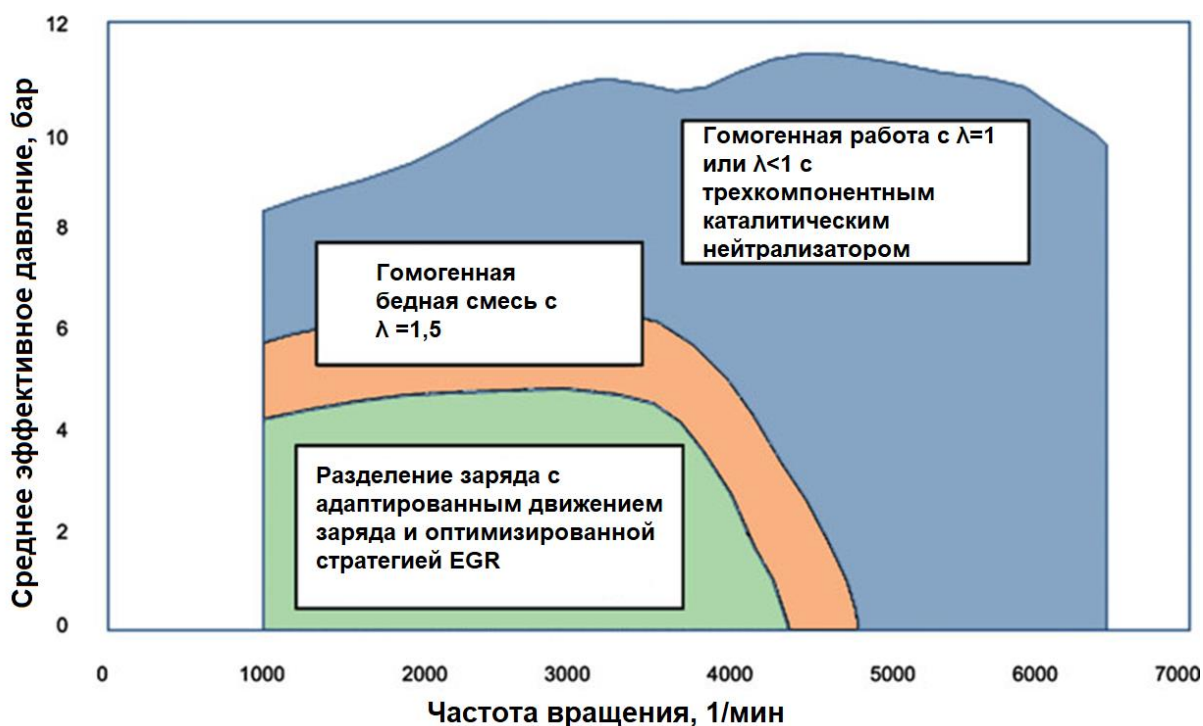


Рисунок 2 – Распределение рабочих режимов впрыска непосредственного впрыска на карте нагрузка/частота вращения

Грубая оценка при нормальных условиях и полной нагрузке (стехиометрический режим) подтверждает, что теоретическая степень подачи может быть на 9% выше. Однако необходимо учитывать, что даже при впрыске во впускной коллектор испарение топлива вызывает охлаждение смеси во впускном коллекторе, что также приводит к увеличению заряда. Более высокие скорости подачи при прямом впрыске могут быть оправданы следующим образом [13]:

- В случае впрыска во впускной коллектор относительные скорости между топливом и воздухом от низкой до средней (соотношение давлений: топливо/воздух примерно 3...5/1) приводят к смешиванию давления и распыления сжатого воздуха. При прямом впрыске происходит в основном распыление под давлением из-за высоких относительных скоростей между топливом и воздухом (соотношение

давлений: топливо / воздух примерно 50...200/1). При высоких относительных скоростях возникают капли топлива значительно меньшего диаметра, чем при низких относительных скоростях. Это приводит к значительному увеличению количества капель топлива, что также увеличивает общую площадь поверхности топлива всех капель. Это также приводит к улучшенному теплообмену между каплями топлива и окружающим воздухом, что приводит к более быстрому образованию смеси [36].

- Во время испарения, которое следует за распылением, топливо получает необходимую энтальпию испарения из окружающей среды. При прямом впрыске два аспекта положительно влияют на испарение топлива. С одной стороны, из-за горячих стенок камеры сгорания и, следовательно, более высоких температур, имеется значительно более высокий потенциал испарения, чем во впускном коллекторе. С другой стороны, маленькие капли топлива (прямой впрыск) требуют более низкой энтальпии испарения, чем более крупные капли (впрыск во впускной коллектор). Оба вместе приводят к значительно более быстрому испарению топлива и, следовательно, к охлаждению смеси, когда впускной клапан в основном открыт. С другой стороны, при впрыске во впускной коллектор часть топлива достигает относительно холодных стенок впускного коллектора (пленки впускного коллектора) и не участвует в испарении. В частности, когда впускной клапан открывается и закрывается, пленка на стенке всасывающего трубопровода отрывается. Эти разрывы и более крупные капли топлива, присутствующие во время впрыска во впускной коллектор, требуют значительно больше времени для испарения. В некоторых случаях это происходит только в фазе сжатия после закрытия впускного клапана. Охлаждение смеси в результате испарения топлива меньше, чем при прямом впрыске, и, таким образом, вызывает меньшее увеличение заряда, чем прямое введение топлива в камеру сгорания [37].

- Топливо, которое все еще испаряется во впускном коллекторе во время впрыска во впускной коллектор, вызывает там понижение температуры и давления. По сравнению с прямым впрыском это приводит к более низкому перепаду давления на впускном клапане, что является невыгодным с точки зрения наполнения.
- Объем впрыскиваемого жидкого топлива намного меньше (примерно в 700 раз), чем объем газообразного топлива. Основываясь на этих соображениях, можно предположить, что при прямом впрыске на такте впуска по сравнению с впрыском во впускной коллектор увеличение заряда и, следовательно, повышение производительности от 5 до 8%, в зависимости от существующих граничных условий (условия потока, впрыск параметры), вполне реально. Это соответствует улучшениям (детонация, степень сжатия), теоретически оцененным в различных статьях.

Топливная форсунка является центральным функциональным элементом или компонентом непосредственного впрыска газообразного топлива. Важную роль играют не только расположение в камере сгорания и геометрическая конструкция самой форсунки, но также приведение в действие или привод открывающего элемента для выпуска впрыска - поперечное сечение имеет особое значение. Поэтому требования, которые предъявляются к инжекционным клапанам высокого и низкого давления, а также к системам, ранее использовавшимся в Технологическом университете Граца и Венском технологическом университете, поясняются и сравниваются ниже [14].

При разработке форсунок прямого впрыска необходимо выполнить следующие требования и задачи:

- (высокий) уровень давления для сверхкритической закачки,
- разброс объема между холостым ходом и номинальной мощностью,
- количество импульсов впрыска за цикл,

- герметичность или максимально допустимая утечка,
- смазка и охлаждение форсунки,
- открытие и закрытие иглы, а также подпрыгивание иглы.

Для того, чтобы иметь возможность воспользоваться степенями свободы, которые предлагает непосредственный впрыск, система впрыска должна соответствовать высоким требованиям. Наименьшие количества холостого хода должны быть введены таким же образом, как и количество полной нагрузки в режиме наддува с высокой циклической стабильностью за короткое время. Требуемый разброс впрыскиваемого количества составляет около 20 для двигателя с наддувом (см. Таблицу 6). Если геометрия форсунки рассчитана на максимальный расход при полной нагрузке (и при постоянном давлении в рампе), форсунка с возможностью частичного хода или стабильной баллистической работой является необходимым условием для надежной работы на холостом ходу [15].

На холостом ходу коэффициент вариации среднего эффективного давления ($COV(p_i)$) относительно низок и составляет около 4, несмотря на небольшой объем впрыска и высокое общее воздушное отношение ($\lambda \approx 11$). Это достигается очень поздним впрыском незадолго до ВМТ, что, в свою очередь, приводит к сильному расслоению заряда с локально богатыми зонами в камере сгорания. Кроме того, игла инжектора не открывается полностью из-за короткого времени впрыска. игла работает в так называемом баллистическом режиме. Такая работа двигателя возможна только при очень малых циклических колебаниях подъема иглы. При внешнем или более раннем внутреннем смесеобразовании и соответствующей гомогенизации вплоть до воспламенения такие малые количества топлива не могут быть эффективно преобразованы или вообще не могут быть преобразованы без дросселирования.

Чтобы иметь возможность впрыскивать требуемую массу топлива со сверхкритической степенью сжатия даже при высоких оборотах двигателя и высоком давлении в цилиндре (например, в режиме наддува и/или с поздним

впрыском), необходимо выбрать давление впрыска и сечение сопла. быть соответственно большим. Это, в свою очередь, затрудняет работу при низких нагрузках двигателя и на холостом ходу из-за необходимости большого разброса. В таблице 1 приведены типичные значения требований к системе непосредственного впрыска водорода для автомобильных двигателей [16].

Таблица 1 – Требования к форсунке высокого давления для автомобильных двигателей с непосредственным впрыском водорода (объем 1-го цилиндра $V_h \approx 500 \text{ см}^3$)

Параметр	Единица измерения	Параметр	Комментарий
максимальная скорость	мин ⁻¹	7000	
мин	мг/аспид	1,5	праздная толпа
Максимум	мг/аспид	30	Сумма полной загрузки
максимальная продолжительность впрыска	РС	< 3 ^a	Временное окно между ES и OT
область печати	бар	до 300	для сверхкритического впрыска
импульсов за цикл	—	> 2	
Максимальная утечка	г/ч	< 1	

^a для предотвращения обратной вспышки, когда впускные клапаны открыты

1.2 Инженерные газовые форсунки

В частности, в случае внутреннего смесеобразования решающую роль играет впрыскивающий элемент. Для обеспечения постоянной массы впрыска, не зависящей от противодействия в камере сгорания, соотношение давления в камере сгорания или цилиндре p_{Cyl} и давления на входе топлива p_{Kst} всегда должно быть как минимум критическим. Это критическое отношение давлений составляет $p_{Cyl}/p_{Kst} = 0,528$ для водорода и около 0,55 для метана. В случае сверхкритической степени сжатия вдуваемая масса для данной плотности топлива зависит только от времени открытия форсунки. Таким образом, на количество подаваемого топлива можно влиять через давление топлива, продолжительность впрыска и выходное сечение сопла. В

самом узком сечении форсунки из-за геометрических условий может быть достигнуто максимальное число Маха = 1. Максимальный объемный расход получается в соответствии с площадью поперечного сечения, доступной для потока, и, следовательно, с помощью плотность, массовый расход [17].

Исходя из упрощенного рассмотрения сопла Лавалья, в котором скорость звука (Мах = 1) достигается в критическом сечении, критическая степень сжатия равна:

$$P_{кр} = \frac{p}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} . \quad (1)$$

Однако, показатель изоэнтропии зависит от давления и температуры:

$$k = \frac{C_p}{C_v} . \quad (2)$$

Для достижения критической степени сжатия в самом узком поперечном сечении сопла и, следовательно, скорости потока, не зависящей от давления, на практике должно поддерживаться отношение давления подачи топлива к давлению в цилиндре больше двух. Поскольку на самом деле это трехмерные процессы течения, которые не соответствуют упрощенному предположению об идеальном сопле Лавалья, это значение является приблизительным. При более низких соотношениях давлений поток больше не зависит от давления.

Различные концепции форсунок более подробно объясняются ниже.

1.3 Электромагнитные газовые форсунки

1.3.1 Электромагнитный инжектор типа А (тарельчатый клапан)

Основной принцип работы используемых магнитных форсунок высокого давления основан на работе пластинчатого или тарельчатого клапана, который приводится в действие электромагнитным способом. Соленоид управляется сигналом «пикового удержания», генерируемым

усилителем. Бустеру требуется сигнал с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) в качестве входа, и он использует его для генерации пропорционального сигнала «удерживания пика». Если магнитная катушка находится под напряжением, игла форсунки, удерживаемая в закрытом состоянии под действием пружины и силы газа, перемещается в открытое положение при превышении необходимого усилия [18].

Концепция уплотнения основана на технологии клапана компрессора. Герметизация осуществляется на прецизионно обработанных параллельных поверхностях иглы и седла с помощью пружины и силы газа. Таким образом, внутренний диаметр уплотнительной поверхности определяет максимально возможный поток. Соотношения площади и силы должны быть выбраны таким образом, чтобы предотвратить непреднамеренное открытие иглы из-за давления в камере сгорания. В отличие от других форсунок, поверхность уплотнения не коническая, а плоская.

Сечение реализованного инжектора с названиями основных узлов показано на рис. 16. Основным преимуществом данной системы является простота замены насадки. Поскольку уплотнительное седло конструктивно отделено от патрубка, его можно привинтить. Неизбежный мертвый объем между уплотнительным седлом и отверстиями форсунки означает, что часть массы топлива проходит через отверстия форсунки только после закрытия иглы форсунки. В зависимости от противодействия в цилиндре небольшая часть остается в форсунке и лишь потом участвует в сгорании или не сгорает вовсе. Тем не менее, винтовая конструкция позволяет быстро и легко адаптироваться к различным геометриям сопла, напр. В. были разработаны с использованием 3D-моделирования CFD [19].

Эта конструкция форсунки также может использоваться для прямого впрыска природного газа. Однако для демонстрации прямого впрыска низкого давления при давлении до 20 бар вероятно непреднамеренное открытие форсунки. Кроме того, форма сопла с большим мертвым объемом представляет собой значительный источник углеводородов в отношении

первичных выбросов. Природный газ, остающийся в мертвом объеме после закачки, не может быть сожжен или сожжен только частично, как при закачке водорода. При этом возникает риск того, что несгоревший природный газ попадет в выхлопные газы в виде несгоревших углеводородов во время такта выпуска, и уровень исходных выбросов НС значительно возрастет [20].

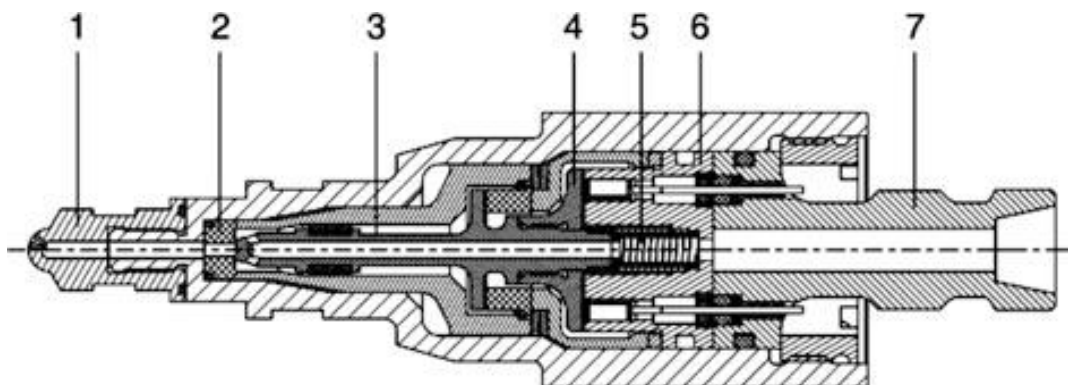


Рисунок 3 – Поперечное сечение магнитной форсунки высокого давления. Основные компоненты: 1 сопло, 2 седло иглы, 3 игла сопла (подъемник клапана), 4 анкерная пластина, 5 пружина, 6 магнитная катушка, 7 газовое соединение.

Хотя используемый инжектор высокого давления имеет очень хорошие характеристики открытия и закрытия, иногда происходит подпрыгивание седла, когда игла форсунки опущена. Впоследствии это было значительно улучшено за счет включения в инжектор активного закрывающего магнита. Это означает, что процесс закрывания происходит не пассивно с использованием силы пружины и газа, а активно с использованием собственной электромагнитной катушки.

Проведенное сравнение процесса смесеобразования с одним и тем же магнитным инжектором при одинаковых граничных условиях (давление инъекции = 50 бар), показало, что, процессы, лежащие в основе закачки водорода и природного газа под высоким давлением, очень похожи. Поэтому варьирование параметров давления впрыска и времени впрыска также

приводит к одинаковым тенденциям распространения струи и смесеобразования.

1.3.2 Магнитный инжектор типа В (Delphi)

Компания Delphi разработала первую почти серийную форсунку прямого впрыска природного газа [21].

Как и во всех прототипах форсунок, описанных в литературе для использования в легковых автомобилях, здесь была реализована концепция открытия наружу для давления впрыска менее 20 бар. Поскольку давление в форсунке должно быть как можно ниже (в данном случае макс. 16 бар), но пиковое давление в цилиндре значительно превышает 100 бар при высоких нагрузках, большая разница давлений с клапанами, открывающимися внутрь, таит в себе риск открытия и соответственно требуются сильные клапанные пружины или усилие открывания. Напротив, с клапанами, открывающимися наружу, герметизация облегчается при высоком давлении в цилиндре. Поскольку герметизация газовых форсунок в течение всего срока службы имеет особое значение, а также может быть достигнута более высокая пропускная способность газа, реализована концепция форсунки, открывающейся наружу.

Конструкция впрыскивающих клапанов для максимального давления 16 бар представляет собой компромисс между противоречивыми факторами: высокое давление способствует достижению высокой производительности, а низкое давление способствует увеличению запаса хода автомобиля и герметизации инжектор. Вот почему эти клапаны рассчитаны на диапазон рабочего давления от 6 до 16 бар в зависимости от нагрузки. Электрическое управление практически идентично клапанам прямого впрыска бензина [22].

Текущее аппаратное обеспечение форсунок совместимо со стандартными бензиновыми форсунками высокого давления, и является результатом непрерывного процесса оптимизации, поддерживаемого CFD, а также моделированием методом конечных элементов и мехатронным моделированием. Разработка включала оптимизацию материалов и отделки

поверхности, а также усовершенствование конструкции клапанной группы форсунки и геометрии поверхности уплотнения.

Расход форсунок-прототипов достаточен для удовлетворения жестких требований современных двигателей с наддувом. Благодаря регулируемой настройке рабочего давления можно добиться как точного дозирования в диапазоне холостого хода, так и соответственно большого объема впрыска при полной нагрузке.

Наиболее требовательным критерием для форсунки CNG-DI является герметичность и постоянная дозировка количества в течение срока службы. Предполагается от 300 до 500 миллионов впрысков при условии, что процесс горения основан на однократном впрыске. Процесс разработки форсунок показывает значительное улучшение утечек форсунок, которые в последнем поколении оцениваются примерно как нулевые.

1.4 Пьезофорсунки

Использование пьезотехнологии имеет ряд преимуществ. С одной стороны, на изменение длины пьезоэлемента может влиять величина приложенного напряжения, что позволяет реализовать переменный ход иглы. За счет уменьшения эффективного поперечного сечения потока можно напрямую влиять на впрыскиваемую массу, что особенно важно при работе с малой частичной нагрузкой и на холостом ходу. С другой стороны, время открытия и закрытия форсунки очень короткое, что сокращает время, необходимое для подачи топлива при заданной массе впрыска, или, наоборот, большее количество топлива может быть впрыснуто в имеющийся объем. Время [23].

1.4.1 Пьезофорсунка типа А (непрямого действия)

Изменения длины, которые могут быть достигнуты с помощью пьезоэлектрического кристалла, очень малы. Поэтому используется пьезостек. Несколько дискообразных пьезокристаллов соединены между собой

таким образом, что их изменения длины складываются. Однако в описанном случае это обеспечивает линейное расширение лишь в несколько сотых миллиметра. По этой причине для реализации необходимого хода иглы используется механическое увеличение хода. Закрывающее усилие в основном создается предварительно нагруженной пружиной. На приведенном ниже рисунке (рисунок 4) показано поперечное сечение форсунки высокого давления непрямого действия [24].

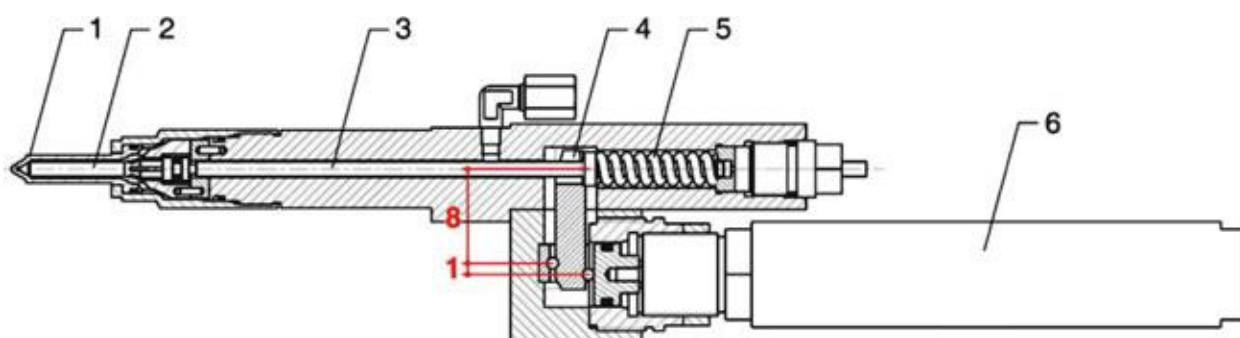


Рисунок 4 – Поперечное сечение пьезофорсунки высокого давления непрямого действия. Основные узлы: 1 игольчатый жиклер, 2 жиклер иглы, 3 нажимной шток (ограничительный шток), 4 вилкообразный передаточный рычаг (отношение примерно 1:8), 5 пружина (создает предварительную нагрузку для безопасного закрытия иглы), 6 пьезопровод (вырабатывает ход в несколько сотых миллиметра).

1.4.2 Пьезофорсунка типа В (прямого действия)

В отличие от форсунок непрямого действия, в типе В игла форсунки приводится в действие непосредственно пьезоэлектрическим приводом. Таким образом, этот инжектор обходится без уже описанного и конструктивно очень сложного преобразования изменения длины пьезоблока с помощью рычага. Эффективный ход иглы форсунки как минимум вдвое меньше, чем у форсунок типа А [25].

Игла и шток форсунки соединены с пьезоэлементом с помощью гидравлической муфты (включая поршень). Он содержит жидкость, которая ведет себя как твердое тело, когда поршень движется с высокой скоростью, что позволяет поднять иглу. С другой стороны, если движение медленное, например, в случае термически индуцированного изменения длины,

жидкость может протекать мимо поршня, чтобы компенсировать это без движения иглы. Главные цели – обеспечить плотное закрытие форсунки и отсутствие люфта вне зависимости от тепловой нагрузки. В принципе, функцию гидравлической муфты (гидравлического звена) можно представить аналогично функции элемента компенсации зазора гидравлического клапана (HVA). Для открытия и закрытия клапана пьезопривод заряжается до напряжения 1000 В или разряжается до 0 В через выходной каскад. В принципе, подъем клапана (приблизительно) пропорционален напряжению на пьезоприводе [26].

Выводы по 1-му разделу бакалаврской работы

Проведенный обзор вопросов непосредственного впрыска газа в цилиндр двигателя показал наличие уже выпускаемых, хоть и в рамках тестовых партий аналогов у ряда иностранных производителей. А также значительный интерес к данной проблеме у исследователей. Показана возможность и перспективность таких разработок.

2 Тепловой расчет проектируемого двигателя

Согласно заданию на бакалаврскую работу, требуется провести тепловой расчет для оценки влияния ПГ на рабочий процесс ДВС с искровым зажиганием. Для этого приводится сравнение результатов расчета для 2-х видов топлива (таблица 2): бензин (базовое топливо) и сжатый природный газ. Состав природного газа и некоторые его характеристики приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Физико-технические характеристики исследуемых топлив

Характеристика топлива	Бензин Аи-95	Компримированный природный газ
Октановое число по исследовательскому методу	95	110
Объемная теплота сгорания низшая, кДж/м, не менее	-	31800
Молекулярная масса	115	19,98478
Плотность, кг/м ³	760	0,82752
Массовая теплота сгорания, МДж/кг	43929,5	44604,5
Элементарный состав, % (массы)		
– Углерод	85,5	68,84
– Водород	14,5	22,06
– Кислород	0	0,98
– Азот	0	8,12

Таблица 3 – Состав газа природного топливного компримированного для двигателей внутреннего сгорания по ГОСТ 27577-2000

Состав КПГ	Объемная доля в КПГ	Плотность по воздуху	Плотность при 20 ° С, кг/м ³	Газовая постоянная, Дж/(кг·К)	Молекулярная масса	Массовая доля в КПГ
Метан, CH ₄	0,9	0,5546	0,7170978	518,3	16,04	0,8134235
Этан, C ₂ H ₆	0,0296	1,046	1,352478	277	30,07	0,0504565
Пропан, C ₃ H ₈	0,0017	1,549	2,002857	189	44,1	0,0042913
Бутан, C ₄ H ₁₀	0,0055	2,07	2,67651	143	58,12	0,0185535
Пентан, C ₅ H ₁₂	0,0042	2,637	3,409641	103,4	72,15	0,0180490
Водород, H ₂	0,0014	0,0695	0,0898635	4,124	2,02	0,0001585
Угарный газ, CO	0,0014	0,9671	1,2504603	297	28,01	0,0022064
Углекислый газ, CO ₂	0,0047	1,528	1,975704	188,9	44,01	0,0117034
Азот, N ₂	0,0515	0,967	1,250331	296,8	28,01	0,0811573

Основные характеристики двигателя форкамерного газового двигателя на базе прототипа бензинового двигателя Ford (1,7 л) [27]. Параметры проектированного двигателя: рабочий объем одного цилиндра 0.425 л (дм³) всего двигателя 1,7 л, ход поршня 84,24 мм, диаметр 80 мм, степень сжатия базового двигателя 10,5, степень сжатия двигателя с непосредственным впрыском компримированного природного газа составляет 14.

Тепловой расчет производится по методике И.И. Вибе, с учетом рекомендаций по расчету основных параметров, предложенных в учебниках [1,2,3,4,5]. Результаты расчета представлены в виде таблиц и графиков.

Так как при изменении скоростного режима при работе на внешней скоростной характеристике максимальный коэффициент избытка воздуха ограничен 1 в связи с требованиями к токсичности отработавших газов, то результаты расчета параметров рабочего тела проводятся (таблица 4) для каждого вида топлива, без учета частоты вращения.

Таблица 4 – Результаты расчета параметров рабочего тела

L ₀ , кмоль возд./кг топл.	I ₀ , кг возд./кг топл.	M ₁ , кмоль гор.см./кг топл.	M _{CO2} , кмоль CO ₂ /кг топл.	M _{H2O} , кмоль H ₂ O/кг топл.	M _{N2} , кмоль N ₂ /кг топл.	M ₂ , кмоль пр.сг./кг топл.	μ _o
Бензин Аи-95							
0,51683	14,957	0,52552	0,07125	0,0725	0,409327	0,553077	1,052432
Компримированный природный газ							
0,52345	15,148	0,57349	0,054033	0,1103	0,415288	0,579622	1,0107

Анализ результатов расчета процесса впуска (таблица 5) показал увеличение удельного объема рабочего тела в конце процесса наполнения при работе на компримированном природном газе, что показывает снижение энергоемкости наполнения цилиндров количество заряда поступившего в цилиндр двигателя.

Анализ результатов расчета параметров в конце сжатия и начала воспламенения (таблица 6) показал снижение коэффициента молекулярного изменения рабочей смеси при переходе на газовое топливо.

Таблица 5 – Результаты расчета процесса впуска

п, мин ⁻¹	Δp_a , МПа	p_a , МПа	T_r , К	p_r , МПа	γ_r	T_a , К	η_v	V_a , м ³ /кг	$\omega_{вп}$, м/с
Бензин Аи-95									
840	0,0004	0,0995766	1080	0,103878	0,033389	329,2715	0,85337	0,9066	16,2472
2000	0,0024	0,0975997	1100	0,105645	0,033546	328,4757	0,856957	0,9228	38,6837
3200	0,0061	0,0938552	1137	0,108991	0,033684	328,1726	0,860588	0,9587	61,894
4600	0,0127	0,0873024	1182	0,114847	0,036653	330,2043	0,809826	1,037	88,9726
5200	0,016226	0,083774	1212	0,118	0,038558	332,0782	0,779164	1,0869	100,578
Компримированный природный газ									
840	0,000423	0,0995766	1060	0,103878	0,02277	316,7084	0,970497	0,9403	16,2472
2000	0,0024	0,0975997	1070	0,105645	0,023401	316,4507	0,951417	0,9585	38,6837
3200	0,0061	0,0938552	1090	0,108991	0,024713	316,9221	0,912385	0,9983	61,894
4600	0,0127	0,0873024	1135	0,114847	0,027106	318,7747	0,841786	1,0795	88,9726
5200	0,016226	0,083774	1158	0,118	0,028609	320,1208	0,803193	1,1297	100,578

Таблица 6 – Результаты расчета параметров в конце сжатия и начала воспламенения

п, мин ⁻¹	μ	n_l	Угол опережения зажигания, ° ПКВ	V_y , м ³ /кг	P_y , МПа	T_y , К
Бензин Аи-95						
840	1,0507382	1,3759	20	0,117967	1,647257	708,7295
2000	1,0507305	1,376	24	0,133893	1,38969	678,6322
3200	1,050724	1,376	28	0,155817	1,14348	649,8319
4600	1,05058	1,3758	32	0,189021	0,90814	626,0684
5200	1,050486	1,375635	35	0,215741	0,774706	609,578
Компримированный природный газ						
840	1,010462	1,374673	20	0,100817	2,143919	731,1279
2000	1,010455	1,3747	24	0,117516	1,747821	694,7807
3200	1,010442	1,3747	28	0,140244	1,393638	661,1314
4600	1,010417	1,3745	32	0,173522	1,076894	632,0926
5200	1,01040224	1,374326	35	0,200413	0,902141	611,5795

Анализ результатов коэффициентов термодинамического расчета (таблица 7) показал увеличение коэффициента использования теплоты в связи с уменьшением тепловых потерь в стенку цилиндра и систему охлаждения, связанных с увеличением степени сжатия при работе на газовом топливе.

Анализ результатов расчета процесса расширения и выпуска (таблица 8) показал, что при переходе на компримированный природный газ происходит снижение температуры конца сгорания и отработавших газов,

что приводит к ухудшению условий прогрева трехкомпонентного каталитического нейтрализатора. Также следует отметить снижение степени последующего расширения, что показывает на сколько снизилось теплоиспользование при удлинении процесса сгорания.

Таблица 7 – Коэффициенты термодинамического расчета

$n, \text{мин}^{-1}$	ζ	$q_z, \text{Дж/кг}$	$E_2, \text{МПа}$	$\varphi_z, \text{град, пкв.}$	m
Бензин Аи-95					
840	0,86	2291,1	53,068155	50	3
2000	0,88	2344,1	53,345106	56	3
3200	0,9	2397	52,505769	62	3
4600	0,9	2390,2	48,40038	68	3
5200	0,91	2412,285	46,60962	75	3
Компримированный природный газ					
840	0,9	2430,644	72,381905	50	3
2000	0,9	2429,1	70,958917	56	3
3200	0,9	2426	68,04781	62	3
4600	0,9	2420,4	62,782355	68	3
5200	0,9	2416,848	59,903974	75	3

Таблица 8 – Результаты расчета процесса расширения и выпуска

$n, \text{мин}^{-1}$	$V_z', \text{м}^3$	$T_z', \text{К}$	$P_z', \text{МПа}$	δ	n_2	$P_b, \text{МПа}$	$T_b, \text{К}$	$T_r, \text{К}$	$\Delta, \%$
Бензин Аи-95									
840	0,1561	2714,64	5,011338	5,809941	1,1845	0,623446	1962,14	1079,71	-0,0273
2000	0,1682	2717,34	4,654147	5,4864	1,184	0,6202	1987	1101,28	0,116
3200	0,185	2721,9	4,23862	5,18245	1,183	0,60495	2013	1137,08	0,0074
4600	0,2117	2681,65	3,648024	4,8979	1,184	0,55572	2001	1182,94	0,0795
5200	0,2479	2632,52	3,058815	4,38478	1,185	0,53047	2002	1212,92	0,0761
Компримированный природный газ									
840	0,1414	2718,8312	5,745673	6,651924	1,1853	0,607989	1913,745	1061,93	0,1816
2000	0,1541	2669,28	5,174847	6,22085	1,186	0,59164	1898	1069,06	-0,0882
3200	0,1714	2623	4,570733	5,82339	1,187	0,56406	1885	1089,77	-0,0214
4600	0,1978	2580,22	3,896786	5,4577	1,1884	0,5185	1873,6	1133,64	-0,1197
5200	0,2347	2504,67	3,187859	4,81353	1,191	0,4907	1856	1154,03	-0,3427

Анализ результатов расчета индикаторных показателей рабочего цикла (таблица 9) показал, повышение примерно на 1-2% мощностных показателей работы двигателя при переходе на газовое топливо, это связано с отсутствием вытеснения свежей смеси за счет впрыска газа в цилиндр

двигателя, а также повышения степени сжатия с 10,5 в базовом варианте до 14 за счет большей детонационной стойкости природного газа.

Таблица 9 – Результаты расчета индикаторных показателей рабочего цикла

n , мин ⁻¹	L_i , кДж	P_i , Мпа	N_i , кВт	η_i	g_i , г/кВт ч
Бензин Аи-95					
840	1,2601988	1,536267	18,24892	0,524885	156,1284
2000	1,2798327	1,532933	43,35549	0,521554	157,1257
3200	1,2920989	1,489624	67,40896	0,50468	162,3789
4600	1,2744659	1,358302	88,35787	0,489035	167,574
5200	1,2527951	1,274012	93,68452	0,476738	171,8963
Компримированный природный газ					
840	1,4463474	1,656563	19,67787	0,534881	150,892
2000	1,4327655	1,609738	45,52775	0,530185	152,2285
3200	1,4183323	1,530106	69,24089	0,525517	153,5807
4600	1,3881563	1,3849	90,08806	0,515537	156,5537
5200	1,3645866	1,30087	95,65957	0,507526	159,0251

Анализ результатов расчета эффективных показателей рабочего цикла (таблица 10) показал, что все эффекты, которые мы наблюдали у индикаторных показателей также присутствуют и у эффективных показателей работы двигателя.

Таблица 10 – Результаты расчета эффективных показателей рабочего цикла

n , мин ⁻¹	$V_{п.ср}$, м/с	p_m , Мпа	p_e , Мпа	η_m	η_e	g_e , г/(кВт.ч)	N_e , кВт	M_e , Н.м	G_T , кг/ч
Бензин Аи-95									
840	2,3632	0,0607	1,4756	0,96049	0,50414	162,55145	17,5278	199,26	2,84917
2000	5,6267	0,0976	1,4354	0,93634	0,48835	167,80776	40,5956	193,8299	6,81226
3200	9,0027	0,1357	1,3539	0,90888	0,4587	178,65771	61,2669	182,8298	10,9458
4600	12,941	0,1802	1,1781	0,86731	0,42414	193,21181	76,6334	159,0859	14,8065
5200	14,629	0,1993	1,0747	0,84356	0,40216	203,77578	79,0281	145,1275	16,104
Компримированный природный газ									
840	2,3632	0,0607	1,5959	0,96336	0,51528	156,63172	18,9568	215,5047	2,96923
2000	5,6267	0,0976	1,5122	0,93938	0,49805	162,05199	42,7679	204,2016	6,93062
3200	9,0027	0,1357	1,3944	0,91129	0,4789	168,53041	63,0988	188,2966	10,6341
4600	12,941	0,1802	1,2047	0,86986	0,42791	179,97666	78,3636	162,6777	14,1036
5200	14,629	0,1993	1,1016	0,84679	0,42977	187,79844	81,0032	148,7545	15,2123

Анализ результатов расчета теплового баланса (таблица 11) показал, значительное снижение доли потерь на теплоотдачу в окружающую среду в

газовом варианте. Это связано с повышением степени сжатия и работой на режиме впрыска газа в начале такта сжатия.

Таблица 11 – Результаты расчета теплового баланса

n , мин ⁻¹	Q_0 , Дж/с	Q_e , Дж/с	q_e , %	Q_B , Дж/с	q_B , %	Q_r , Дж/с	q_r , %	$Q_{ост}$, Дж/с	$q_{ост}$, %
Бензин Аи-95									
840	34767	17528	50,414	5170,44	14,8715	11247,44	32,3505	821,7292	2,3635
2000	83128	40596	48,835	12826,1	15,4294	27645,701	33,257	2060,134	2,47828
3200	133568	61267	45,87	24840,7	18,5979	46675,267	34,9451	784,7469	0,58753
4600	180678	76633	42,414	32141,5	17,7894	66882,806	37,0177	5020,424	2,77866
5200	196512	79028	40,216	41695,8	21,218	75482,626	38,4113	305,0172	0,15522
Компримированный природный газ									
840	36789	18957	51,528	5170,44	14,0542	1930,458	32,4292	1,988514	1,98851
2000	85871	42768	49,805	12826,1	14,9364	28246,766	32,8943	2,364753	2,36475
3200	131758	63099	47,89	20991,9	15,9322	4570,526	33,8277	2,350104	2,3501
4600	174746	78364	44,844	27063	15,4871	62810,298	35,9438	3,724825	3,72483
5200	188482	81003	42,977	29488,2	15,6451	69802,338	37,0339	4,344472	4,34447

Приведем основные термодинамические параметры работы двигателя по результатам теплового расчета в таблице 12 и 13 для базового и модернизированного двигателя, соответственно.

Таблица 12 – Основные термодинамические параметры работы базового двигателя

Угол ПКВ, град.	Объем цилиндра	P_i , частота вращения 840 мин ⁻¹	P_i , частота вращения 2000 мин ⁻¹	P_i , частота вращения 3200 мин ⁻¹	P_i , частота вращения 4600 мин ⁻¹	P_i , частота вращения 5200 мин ⁻¹
230	0,411164	0,119308219	0,116939603	0,112454777	0,104600763	0,100370816
231	0,408841	0,120242056	0,1178549	0,113335042	0,105419435	0,101156279
232	0,406473	0,121206724	0,118800417	0,11424437	0,106265136	0,101967673
233	0,404062	0,122203137	0,119777049	0,115183623	0,107138667	0,102805768
234	0,401606	0,123232246	0,120785726	0,116153696	0,108040861	0,103671361
235	0,399108	0,124295042	0,121827423	0,117155524	0,108972587	0,104565288
236	0,396566	0,125392559	0,122903151	0,118190083	0,109934751	0,105488417
237	0,393981	0,126525876	0,124013969	0,119258389	0,110928301	0,106441657
238	0,391353	0,127696119	0,125160979	0,120361503	0,111954221	0,107425953
239	0,388684	0,128904461	0,126345332	0,121500532	0,113013541	0,108442293
240	0,385972	0,130152128	0,127568229	0,122676631	0,114107336	0,109491707
241	0,383219	0,131440397	0,128830922	0,123891003	0,115236725	0,110575269
242	0,380425	0,132770602	0,130134718	0,125144908	0,116402877	0,111694103
243	0,37759	0,134144136	0,131480984	0,126439657	0,117607013	0,112849377
244	0,374714	0,135562452	0,132871142	0,12777662	0,118850408	0,114042315
245	0,371799	0,137027068	0,134306681	0,129157229	0,120134392	0,115274193
246	0,368844	0,138539568	0,135789154	0,130582977	0,121460355	0,116546345

Продолжение таблицы 12

247	0,365851	0,14010161	0,137320184	0,132055426	0,122829747	0,117860162
248	0,362819	0,141714921	0,138901467	0,133576205	0,124244085	0,119217099
249	0,35975	0,143381311	0,140534773	0,13514702	0,125704954	0,120618675
250	0,356643	0,145102667	0,142221955	0,13676965	0,127214009	0,12206648
251	0,353499	0,146880964	0,143964948	0,138445957	0,128772982	0,123562175
252	0,35032	0,148718268	0,145765776	0,140177889	0,130383682	0,125107495
253	0,347105	0,150616737	0,147626556	0,14196748	0,132048004	0,126704256
254	0,343856	0,152578631	0,1495495	0,14381686	0,133767926	0,128354359
255	0,340572	0,154606314	0,151536928	0,145728257	0,135545521	0,13005979
256	0,337255	0,156702259	0,153591262	0,147704004	0,137382957	0,131822631
257	0,333906	0,158869055	0,155715041	0,149746542	0,139282506	0,133645058
258	0,330525	0,161109416	0,157910924	0,151858427	0,141246543	0,135529353
259	0,327113	0,163426179	0,160181693	0,154042337	0,143277558	0,137477902
260	0,32367	0,165822322	0,162530265	0,156301076	0,14537816	0,139493209
261	0,320199	0,168300961	0,164959696	0,158637584	0,147551081	0,141577895
262	0,316699	0,170865364	0,167473189	0,161054941	0,149799187	0,143734709
263	0,313171	0,173518959	0,170074102	0,163556379	0,152125481	0,145966531
264	0,309617	0,176265339	0,172765958	0,166145284	0,154533113	0,148276383
265	0,306038	0,179108273	0,175552451	0,16882521	0,157025388	0,150667435
266	0,302434	0,182051717	0,178437459	0,171599887	0,159605773	0,153143014
267	0,298806	0,185099822	0,181425051	0,174473228	0,162277908	0,15570661
268	0,295155	0,188256948	0,184519498	0,177449343	0,165045613	0,158361889
269	0,291483	0,191527672	0,187725289	0,180532547	0,167912901	0,1611127
270	0,287791	0,194916802	0,191047135	0,183727374	0,170883988	0,163963087
271	0,284079	0,198429392	0,19448999	0,187038586	0,173963303	0,166917297
272	0,280349	0,202070752	0,198059058	0,190471192	0,177155501	0,169979798
273	0,276603	0,205846465	0,201759813	0,194030453	0,180465476	0,173155282
274	0,27284	0,209762404	0,205598008	0,197721906	0,183898375	0,176448689
275	0,269063	0,213824743	0,209579699	0,201551374	0,187459613	0,17986521
276	0,265272	0,218039983	0,213711253	0,205524983	0,191154886	0,183410311
277	0,261469	0,222414962	0,217999377	0,209649182	0,194990189	0,187089743
278	0,257656	0,226956882	0,222451126	0,213930758	0,198971836	0,190909559
279	0,253833	0,231673323	0,227073932	0,21837686	0,203106471	0,194876136
280	0,250002	0,236572273	0,231875624	0,222995017	0,207401096	0,198996188
281	0,246164	0,241662146	0,236864447	0,227793161	0,211863085	0,20327679
282	0,24232	0,246951806	0,242049092	0,23277965	0,216500212	0,207725396
283	0,238472	0,252450599	0,247438719	0,237963296	0,221320666	0,212349865
284	0,234622	0,258168378	0,253042983	0,243353386	0,226333085	0,217158479
285	0,23077	0,26411553	0,258872067	0,248959715	0,231546575	0,222159973
286	0,226919	0,270303013	0,26493671	0,254792611	0,23697074	0,227363561
287	0,223069	0,276742384	0,271248241	0,260862972	0,242615711	0,232778958
288	0,219222	0,283445837	0,27781861	0,267182293	0,248492177	0,238416419
289	0,21538	0,290426238	0,28466043	0,273762706	0,254611417	0,244286761
290	0,211544	0,297697167	0,29178701	0,280617012	0,260985333	0,250401401
291	0,207715	0,305272954	0,299212396	0,287758722	0,267626488	0,256772388
292	0,203896	0,313168727	0,306951415	0,295202099	0,274548141	0,26341244
293	0,200087	0,321400455	0,315019719	0,302962197	0,281764291	0,270334985
294	0,19629	0,329984995	0,32343383	0,31105491	0,289289714	0,277554194
295	0,192507	0,33894014	0,332211189	0,319497014	0,297140006	0,285085027
296	0,188739	0,348284674	0,341370208	0,328306217	0,305331633	0,292943278
297	0,184988	0,358038424	0,350930317	0,337501214	0,313881975	0,301145614
298	0,181256	0,368222314	0,360912027	0,347101731	0,322809371	0,309709628

Продолжение таблицы 12

299	0,177543	0,378858424	0,371336979	0,357128585	0,332133177	0,318653883
300	0,173852	0,389970047	0,382228004	0,367603738	0,341873811	0,327997962
301	0,170184	0,401581751	0,393609182	0,378550353	0,352052806	0,33776252
302	0,16654	0,413719438	0,40555059	0,389992852	0,362692868	0,347969332
303	0,162923	0,426410406	0,417944916	0,401956971	0,373817924	0,358641348
304	0,159333	0,439683409	0,430954411	0,414469821	0,385453178	0,369802742
305	0,155773	0,45356872	0,444564058	0,427559942	0,397625166	0,381478962
306	0,152244	0,468098183	0,458805069	0,441257362	0,4103618	0,393696781
307	0,148747	0,483305274	0,473710255	0,455593641	0,423692424	0,406484341
308	0,145284	0,49922515	0,489314074	0,470601925	0,437647852	0,419871195
309	0,141857	0,515894689	0,505652675	0,486316989	0,452260411	0,433888347
310	0,138467	0,533352534	0,522763931	0,502775264	0,467563971	0,448568282
311	0,135116	0,551639114	0,540687469	0,52001487	0,48359397	0,463944985
312	0,131805	0,57079666	0,559464681	0,538075625	0,500387423	0,480053956
313	0,128535	0,590869199	0,579138722	0,556999041	0,517982922	0,496932208
314	0,125308	0,611902537	0,599754487	0,576828306	0,536420615	0,514618242
315	0,122127	0,633944205	0,621358563	0,597608237	0,555742165	0,533152015
316	0,118991	0,657043388	0,64399916	0,61938521	0,575990682	0,552574871
317	0,115903	0,681250811	0,667725996	0,642207052	0,597210628	0,572929448
318	0,112864	0,706618589	0,692590149	0,666122902	0,619447679	0,594259551
319	0,109875	0,733200019	0,71864386	0,691183014	0,642748552	0,616609979
320	0,106938	0,761049327	0,745940278	0,717438518	0,667160775	0,640026312
321	0,104054	0,790221336	0,774533138	0,744941109	0,692732399	0,664554628
322	0,101224	0,820771064	0,804476365	0,773742663	0,719511646	0,69024117
323	0,098451	0,85275323	0,835823592	0,803894777	0,747546476	0,717131928
324	0,095734	0,886221656	0,868627572	0,835448203	0,776884062	0,745272136
325	0,093076	0,921228557	0,902939484	0,868452176	0,807570167	0,774705678
326	0,090478	0,957823702	0,938808108	0,902953629	0,839648412	0,805684707
327	0,087941	0,996053426	0,97627886	0,938996256	0,873159406	0,838072702
328	0,085465	1,035959489	1,015392672	0,976619438	0,908139747	0,87196733
329	0,083054	1,077577761	1,056184699	1,015857002	0,944783116	0,907493308
330	0,080706	1,120936715	1,098682852	1,056735805	0,983010269	0,944805062
331	0,078424	1,166055739	1,142906132	1,099274134	1,022943383	0,984089404
332	0,076209	1,212943227	1,188862767	1,143479916	1,064748287	1,025568112
333	0,074062	1,261594485	1,236548155	1,189406624	1,108638937	1,069500277
334	0,071983	1,311989424	1,285942608	1,237080459	1,154881791	1,11618423
335	0,069974	1,364090075	1,337008909	1,286650618	1,203799838	1,165958858
336	0,068036	1,417837945	1,389689726	1,338339319	1,255775969	1,219204064
337	0,06617	1,47315125	1,443799514	1,392449287	1,311255296	1,276340102
338	0,064376	1,529922087	1,499524858	1,449370686	1,370745996	1,337825518
339	0,062656	1,588013613	1,557045963	1,509586908	1,434818189	1,404153418
340	0,06101	1,647257328	1,616665356	1,573678465	1,50410036	1,475845803
341	0,059439	1,70716565	1,678819765	1,642324155	1,579272847	1,553445724
342	0,057944	1,768141095	1,744090104	1,716298569	1,661057982	1,637507106
343	0,056526	1,830448054	1,813208182	1,796465025	1,750206544	1,728582109
344	0,055185	1,894567475	1,887058544	1,88376309	1,847480356	1,827206022
345	0,053922	1,961214405	1,966673689	1,979190035	1,953630979	1,933879777
346	0,052737	2,031349639	2,053220981	2,083775859	2,06937467	2,049050273
347	0,051632	2,106182353	2,147979792	2,198551842	2,195363957	2,173088883
348	0,050606	2,187160311	2,252307908	2,324513029	2,332156389	2,306268592
349	0,049661	2,275944388	2,367596942	2,462575396	2,480181232	2,448740437
350	0,048796	2,374364802	2,495217331	2,61352888	2,639705089	2,600510029

Продолжение таблицы 12

351	0,048012	2,484357716	2,636454374	2,777987734	2,810797638	2,761415107
352	0,04731	2,607882651	2,792437565	2,956339965	2,993298901	2,931105212
353	0,046689	2,746823126	2,96406604	3,148697875	3,186789636	3,109024634
354	0,046151	2,902874844	3,151933357	3,354851893	3,39056658	3,29439988
355	0,045695	3,077427072	3,356255041	3,574230111	3,603624393	3,486232814
356	0,045321	3,271443539	3,576802408	3,805866051	3,824646048	3,683300549
357	0,045031	3,485349221	3,812846284	4,048377215	4,052003315	3,884162934
358	0,044823	3,718929065	4,063114281	4,299956904	4,283768629	4,08717817
359	0,044698	3,971244429	4,325765293	4,558381452	4,517739184	4,290526702
360	0,044657	4,240572886	4,598384714	4,821034533	4,751473487	4,492243079
361	0,044698	4,52437707	4,878003438	5,084949441	4,982339902	4,690255023
362	0,044823	4,819308153	5,161142893	5,346869308	5,207575986	4,882428466
363	0,045031	5,12124897	5,443887197	5,603324143	5,424356678	5,066616961
364	0,045321	5,425400484	5,721981933	5,850722437	5,629868761	5,240713528
365	0,045695	5,726413036	5,990957249	6,085453997	5,821388524	5,402702848
366	0,046151	6,01856071	6,246271026	6,303999718	5,996359237	5,550711669
367	0,046689	6,295953379	6,483466021	6,503043299	6,152464935	5,683055358
368	0,04731	6,552777001	6,698333269	6,679579489	6,287697182	5,798278791
369	0,048012	6,783548931	6,887072899	6,831013429	6,400411775	5,895190036
370	0,048796	6,983372005	7,04644298	6,955245932	6,489372908	5,972885725
371	0,049661	7,148169348	7,173887182	7,050740245	6,553782962	6,030767397
372	0,050606	7,274881743	7,267632994	7,116566794	6,593296846	6,068548547
373	0,051632	7,361611143	7,32675387	7,152423654	6,608020598	6,086252517
374	0,052737	7,407697565	7,351191023	7,158631847	6,598494725	6,08420173
375	0,053922	7,413721959	7,341733291	7,136106038	6,565663506	6,062999089
376	0,055185	7,381434143	7,299956526	7,086302598	6,510832065	6,023502593
377	0,056526	7,313611857	7,228126893	7,011148284	6,435613558	5,966794406
378	0,057944	7,213863578	7,129075079	6,912953827	6,341869152	5,894145736
379	0,059439	7,08639296	7,006050452	6,794317467	6,231643676	5,806978901
380	0,06101	6,93574601	6,862565432	6,658023858	6,107099872	5,706827997
381	0,062656	6,766562769	6,702240595	6,506943763	5,970454046	5,595299485
382	0,064376	6,583353362	6,528660352	6,343939598	5,823915659	5,474033954
383	0,06617	6,390314026	6,34524747	6,17178113	5,669633023	5,344670153
384	0,068036	6,191192931	6,155162458	5,993074697	5,509646789	5,208812236
385	0,069974	5,989209162	5,96123119	5,810208104	5,345852371	5,068000981
386	0,071983	5,787022133	5,765901452	5,625312171	5,179971897	4,923689533
387	0,074062	5,586743872	5,571226591	5,440238661	5,013535721	4,777224003
388	0,076209	5,389983509	5,378872509	5,256553348	4,847873055	4,629829063
389	0,078424	5,197912232	5,190142941	5,075542108	4,684110826	4,482598473
390	0,080706	5,011337595	5,006017371	4,898227414	4,52317958	4,336490271
391	0,083054	4,844004946	4,827196082	4,725392353	4,36582503	4,192326239
392	0,085465	4,682506821	4,654147477	4,557609318	4,212623767	4,050795102
393	0,087941	4,526803139	4,499451627	4,39527078	4,064001677	3,912458841
394	0,090478	4,376824243	4,350441365	4,238619955	3,920253705	3,777761463
395	0,093076	4,232475971	4,207023307	4,09896869	3,781563821	3,64703954
396	0,095734	4,093644166	4,069084203	3,964649848	3,648024223	3,520533861
397	0,098451	3,96019867	3,936494894	3,835537882	3,529120413	3,398401608
398	0,101224	3,831996821	3,809113797	3,711495137	3,414888352	3,280728516
399	0,104054	3,708886496	3,686789921	3,592374789	3,305192537	3,167540599
400	0,106938	3,590708748	3,569365484	3,478023394	3,199891382	3,058815098
401	0,109875	3,477300056	3,456678154	3,368283064	3,098839223	2,962141492
402	0,112864	3,368494244	3,348562957	3,262993327	3,001888029	2,869393547

Продолжение таблицы 12

403	0,115903	3,264124106	3,244853882	3,161992694	2,90888885	2,780428547
404	0,118991	3,164022755	3,145385229	3,065119966	2,819693015	2,695104062
405	0,122127	3,068024748	3,049992726	2,972215324	2,734153141	2,6132789
406	0,125308	2,975967001	2,958514435	2,883121213	2,652123942	2,534813895
407	0,128535	2,887689531	2,870791496	2,797683064	2,573462895	2,459572532
408	0,131805	2,803036046	2,786668703	2,715749858	2,498030762	2,38742145
409	0,135116	2,721854397	2,705994965	2,637174573	2,425691997	2,318230834
410	0,138467	2,643996926	2,628623644	2,561814517	2,356315053	2,251874703
411	0,141857	2,569320714	2,554412807	2,489531567	2,289772602	2,188231126
412	0,145284	2,497687749	2,483225388	2,420192337	2,225941689	2,127182361
413	0,148747	2,428965026	2,414929294	2,353668272	2,164703819	2,068614944
414	0,152244	2,363024594	2,349397444	2,289835694	2,105944997	2,012419724
415	0,155773	2,299743552	2,286507773	2,228575802	2,049555728	1,958491864
416	0,159333	2,239004008	2,226143188	2,169774632	1,995430979	1,9067308
417	0,162923	2,180693008	2,1681915	2,113322987	1,943470115	1,857040187
418	0,16654	2,124702443	2,112545328	2,059116349	1,893576817	1,809327813
419	0,170184	2,070928931	2,059101983	2,007054767	1,845658978	1,7635055
420	0,173852	2,019273688	2,007763344	1,957042728	1,799628584	1,719488994
421	0,177543	1,969642384	1,958435713	1,908989028	1,755401595	1,677197846
422	0,181256	1,921944999	1,911029669	1,862806621	1,712897805	1,636555281
423	0,184988	1,876095666	1,865459916	1,818412474	1,672040709	1,597488068
424	0,188739	1,832012511	1,821645125	1,775727416	1,632757361	1,559926385
425	0,192507	1,7896175	1,779507777	1,734675982	1,594978233	1,523803685
426	0,19629	1,748836275	1,738974006	1,695186263	1,558637076	1,489056557
427	0,200087	1,709598002	1,699973444	1,657189753	1,523670777	1,455624599
428	0,203896	1,671835212	1,662439067	1,6206212	1,490019223	1,423450277
429	0,207715	1,635483655	1,626307045	1,58541846	1,457625167	1,392478805
430	0,211544	1,600482149	1,591516598	1,551522358	1,426434096	1,362658014
431	0,21538	1,566772439	1,558009851	1,518876546	1,396394105	1,33393823
432	0,219222	1,534299056	1,525731697	1,487427371	1,367455772	1,30627216
433	0,223069	1,503009188	1,494629667	1,457123747	1,339572042	1,279614773
434	0,226919	1,47285255	1,464653804	1,427917029	1,312698109	1,253923195
435	0,23077	1,443781258	1,435756533	1,399760898	1,286791309	1,229156601
436	0,234622	1,415749715	1,407892552	1,372611241	1,261811014	1,205276115
437	0,238472	1,388714495	1,381018716	1,346426048	1,23771853	1,182244713
438	0,24232	1,362634238	1,355093931	1,321165304	1,214477005	1,160027135
439	0,246164	1,337469543	1,33007905	1,296790888	1,192051331	1,138589789
440	0,250002	1,313182872	1,305936776	1,273266484	1,170408063	1,117900675
441	0,253833	1,289738459	1,282631571	1,250557485	1,149515329	1,097929301
442	0,257656	1,267102215	1,260129566	1,228630908	1,129342757	1,078646607
443	0,261469	1,24524165	1,238398477	1,207455315	1,109861396	1,060024896
444	0,265272	1,224125787	1,217407525	1,187000733	1,091043645	1,042037762
445	0,269063	1,203725089	1,197127361	1,167238581	1,072863185	1,024660026
446	0,27284	1,184011386	1,177529994	1,1481416	1,055294915	1,007867676
447	0,276603	1,164957805	1,158588722	1,129683784	1,03831489	0,991637805
448	0,280349	1,146538708	1,140278067	1,111840321	1,021900265	0,975948558
449	0,284079	1,128729624	1,122573716	1,094587533	1,006029235	0,960779078
450	0,287791	1,111507198	1,105452459	1,077902816	0,99068099	0,946109456
451	0,291483	1,09484913	1,088892137	1,061764587	0,975835658	0,931920686
452	0,295155	1,078734124	1,072871589	1,046152237	0,961474264	0,918194617
453	0,298806	1,063141839	1,057370601	1,03104608	0,947578683	0,904913911
454	0,302434	1,048052841	1,042369861	1,016427305	0,934131598	0,892062004

Продолжение таблицы 12

455	0,306038	1,033448559	1,027850914	1,002277938	0,92111646	0,879623068
456	0,309617	1,019311241	1,013796119	0,988580796	0,908517451	0,867581974
457	0,313171	1,005623915	1,000188611	0,975319453	0,896319448	0,855924256
458	0,316699	0,992370353	0,987012261	0,9624782	0,884507989	0,844636084
459	0,320199	0,979535029	0,974251642	0,950042009	0,873069242	0,833704226
460	0,32367	0,967103094	0,961891996	0,937996505	0,861989973	0,823116027
461	0,327113	0,955060334	0,949919198	0,926327931	0,851257517	0,812859373
462	0,330525	0,943393147	0,938319729	0,915023117	0,840859753	0,802922673
463	0,333906	0,932088509	0,927080647	0,904069458	0,830785076	0,793294828
464	0,337255	0,921133951	0,916189558	0,893454881	0,821022374	0,783965211
465	0,340572	0,910517528	0,905634594	0,883167823	0,811561004	0,774923643
466	0,343856	0,900227798	0,895404381	0,873197207	0,802390769	0,766160374
467	0,347105	0,890253798	0,885488024	0,863532419	0,793501901	0,757666062
468	0,35032	0,88058502	0,875875081	0,854163287	0,784885035	0,749431753
469	0,353499	0,871211394	0,866555541	0,845080006	0,776531199	0,741448864
470	0,356643	0,862123262	0,857519808	0,836273388	0,768431785	0,733709168
471	0,35975	0,853311365	0,848758679	0,827734307	0,760578544	0,726204772
472	0,362819	0,844766822	0,840263326	0,819454216	0,75296356	0,718928111
473	0,365851	0,836481113	0,832025282	0,811424868	0,745579242	0,711871924
474	0,368844	0,828446063	0,824036422	0,803638348	0,738418306	0,705029247
475	0,371799	0,820653829	0,816288951	0,796087059	0,731473762	0,698393395
476	0,374714	0,813096882	0,808775386	0,788763714	0,724738901	0,691957953
477	0,37759	0,805767996	0,801488543	0,781661313	0,718207282	0,685716765
478	0,380425	0,798660233	0,794421527	0,774773139	0,711872724	0,679663919
479	0,383219	0,791766929	0,787567717	0,76809274	0,70572929	0,673793738
480	0,385972	0,785081689	0,780920753	0,761613922	0,699771279	0,668100772
481	0,388684	0,778598367	0,774474529	0,755330735	0,693993214	0,662579785
482	0,391353	0,772311062	0,768223178	0,749237463	0,688389838	0,65722575
483	0,393981	0,766214105	0,762161065	0,743328616	0,682956097	0,652033835
484	0,396566	0,760302047	0,756282776	0,737598919	0,677687138	0,6469994
485	0,399108	0,754569655	0,750583108	0,732043303	0,672578297	0,642117986
486	0,401606	0,749011901	0,745057064	0,726656899	0,667625091	0,637385308
487	0,404062	0,743623952	0,739699838	0,721435025	0,662823216	0,63279725
488	0,406473	0,738401164	0,734506817	0,716373186	0,658168532	0,628349854
489	0,408841	0,733339075	0,729473562	0,711467058	0,653657062	0,624039319
490	0,411164	0,728433394	0,724595812	0,706712487	0,649284984	0,619861991
500	0,431925	0,68714708	0,683543996	0,666696613	0,612489328	0,58470627
510	0,448109	0,58714708	0,583543996	0,566696613	0,512489328	0,48470627

Таблица 13 – Основные термодинамические параметры работы модернизированного двигателя

Угол ПКВ, град.	Объем цилиндра	P _i , частота вращения 840 мин ⁻¹	P _i , частота вращения 2000 мин ⁻¹	P _i , частота вращения 3200 мин ⁻¹	P _i , частота вращения 4600 мин ⁻¹	P _i , частота вращения 5200 мин ⁻¹
230	0,411164	0,119897711	0,11751771	0,113008316	0,105116136	0,100865553
231	0,408841	0,120863766	0,118464601	0,11391884	0,105962979	0,101678057
232	0,406473	0,121862121	0,119443154	0,114859809	0,106838136	0,102517727
233	0,404062	0,122893761	0,12045433	0,115832149	0,10774247	0,103385389
234	0,401606	0,123959712	0,121499138	0,116836827	0,108676879	0,104281906
235	0,399108	0,125061046	0,122578626	0,117874854	0,109642304	0,10520818
236	0,396566	0,126198882	0,123693892	0,118947284	0,110639725	0,106165152

Продолжение таблицы 13

237	0,393981	0,127374387	0,124846082	0,120055219	0,111670166	0,107153804
238	0,391353	0,128588784	0,12603639	0,121199809	0,112734697	0,108175162
239	0,388684	0,129843346	0,127266068	0,122382255	0,113834436	0,109230298
240	0,385972	0,131139405	0,12853642	0,123603813	0,114970549	0,110320333
241	0,383219	0,132478354	0,129848811	0,124865795	0,116144258	0,111446436
242	0,380425	0,133861646	0,131204667	0,126169571	0,117356835	0,112609832
243	0,37759	0,135290803	0,132605477	0,127516575	0,118609616	0,113811797
244	0,374714	0,136767414	0,134052801	0,128908304	0,119903992	0,11505367
245	0,371799	0,138293141	0,135548266	0,130346327	0,121241421	0,116336847
246	0,368844	0,139869723	0,137093579	0,131832281	0,122623427	0,117662791
247	0,365851	0,14149898	0,138690522	0,13336788	0,124051604	0,119033032
248	0,362819	0,143182815	0,14034096	0,134954921	0,125527621	0,120449171
249	0,35975	0,144923221	0,142046848	0,13659528	0,127053225	0,121912882
250	0,356643	0,146722284	0,14381023	0,138290923	0,128630244	0,12342592
251	0,353499	0,14858219	0,145633248	0,140043911	0,130260593	0,124990123
252	0,35032	0,150505226	0,147518145	0,1418564	0,131946278	0,126607414
253	0,347105	0,152493791	0,149467271	0,143730651	0,133689402	0,128279811
254	0,343856	0,154550399	0,151483092	0,145669032	0,135492166	0,130009426
255	0,340572	0,156677685	0,153568189	0,147674028	0,137356883	0,131798476
256	0,337255	0,158878414	0,155725273	0,149748243	0,139285973	0,133649285
257	0,333906	0,161155484	0,157957184	0,151894411	0,141281977	0,13556429
258	0,330525	0,163511939	0,160266906	0,154115399	0,143347564	0,13754605
259	0,327113	0,165950971	0,162657569	0,156414218	0,145485532	0,13959725
260	0,32367	0,168475937	0,165132461	0,158794028	0,147698821	0,141720711
261	0,320199	0,171090357	0,167695035	0,16125815	0,149990519	0,143919394
262	0,316699	0,173797935	0,170348919	0,163810072	0,152363869	0,146196412
263	0,313171	0,17660256	0,173097927	0,166453462	0,154822282	0,148555036
264	0,309617	0,179508325	0,175946069	0,169192177	0,157369345	0,150998705
265	0,306038	0,182519532	0,178897564	0,172030271	0,160008828	0,153531039
266	0,302434	0,185640709	0,181956849	0,174972012	0,162744699	0,156155844
267	0,298806	0,188876624	0,185128596	0,178021892	0,165581137	0,158877126
268	0,295155	0,192232293	0,188417725	0,181184642	0,16852254	0,161699107
269	0,291483	0,195713004	0,191829416	0,184465243	0,17157354	0,164626229
270	0,287791	0,199324327	0,19536913	0,187868946	0,17473902	0,167663176
271	0,284079	0,203072134	0,199042623	0,191401284	0,178024126	0,170814885
272	0,280349	0,206962617	0,202855965	0,195068095	0,181434285	0,174086563
273	0,276603	0,211002309	0,206815557	0,198875534	0,184975222	0,1774837
274	0,27284	0,215198103	0,210928158	0,2028301	0,18865298	0,181012093
275	0,269063	0,219557278	0,215200902	0,206938651	0,192473937	0,184677861
276	0,265272	0,224087522	0,219641323	0,211208433	0,19644483	0,188487467
277	0,261469	0,228796955	0,224257382	0,215647101	0,200572776	0,192447737
278	0,257656	0,233694162	0,229057494	0,220262745	0,204865301	0,196565891
279	0,253833	0,238788221	0,234050557	0,225063921	0,209330358	0,200849557
280	0,250002	0,244088734	0,239245982	0,230059677	0,213976363	0,20530681
281	0,246164	0,249605862	0,244653728	0,235259592	0,218812222	0,209946191
282	0,24232	0,255350362	0,250284341	0,240673803	0,223847361	0,214776743
283	0,238472	0,261333625	0,256148986	0,246313048	0,229091765	0,219808044
284	0,234622	0,267567723	0,262259495	0,2521887	0,234556011	0,225050239
285	0,23077	0,274065446	0,268628404	0,258312818	0,240251309	0,230514082
286	0,226919	0,280840357	0,27526901	0,264698183	0,246189547	0,236210975
287	0,223069	0,287906844	0,282195412	0,271358353	0,252383331	0,242153012
288	0,219222	0,295280169	0,289422574	0,278307717	0,258846038	0,248353023

Продолжение таблицы 13

289	0,21538	0,302976536	0,296966376	0,285561543	0,265591868	0,25482463
290	0,211544	0,311013149	0,304843682	0,293136046	0,272635898	0,261582294
291	0,207715	0,319408282	0,313072404	0,30104845	0,279994143	0,268641377
292	0,203896	0,328181352	0,321671577	0,309317054	0,287683619	0,276018202
293	0,200087	0,337352999	0,330661429	0,317961312	0,295722413	0,283730117
294	0,19629	0,346945168	0,34006347	0,327001905	0,304129757	0,291795569
295	0,192507	0,356981197	0,349900578	0,336460828	0,312926102	0,300234177
296	0,188739	0,367485914	0,36019709	0,346361484	0,322133208	0,30906681
297	0,184988	0,378485743	0,370978904	0,356728772	0,331774228	0,318315677
298	0,181256	0,390008804	0,382273585	0,367589198	0,341873807	0,328004418
299	0,177543	0,402085037	0,394110479	0,378970978	0,352458181	0,338158196
300	0,173852	0,414746319	0,406520834	0,390904156	0,363555284	0,348803808
301	0,170184	0,428026602	0,419537926	0,403420729	0,375194868	0,359969788
302	0,16654	0,441962041	0,433197198	0,416554773	0,387408617	0,371686528
303	0,162923	0,45659115	0,4475364	0,430342587	0,400230282	0,383986399
304	0,159333	0,471954953	0,462595743	0,444822832	0,413695809	0,396903881
305	0,155773	0,488097144	0,478418056	0,46003669	0,427843488	0,410475698
306	0,152244	0,505064258	0,495048954	0,476028018	0,442714098	0,424740965
307	0,148747	0,52290585	0,51253701	0,49284352	0,458351063	0,43974133
308	0,145284	0,541674676	0,530933937	0,510532917	0,474800612	0,455521133
309	0,141857	0,561426885	0,550294771	0,529149126	0,492111945	0,472127564
310	0,138467	0,582222208	0,570678061	0,548748441	0,510337403	0,489610824
311	0,135116	0,604124155	0,59214606	0,569390718	0,529532638	0,50802429
312	0,131805	0,627200214	0,614764921	0,591139562	0,549756786	0,52742468
313	0,128535	0,651522039	0,638604878	0,614062502	0,571072633	0,547872214
314	0,125308	0,677165637	0,663740436	0,638231173	0,59354678	0,569430766
315	0,122127	0,70421154	0,690250531	0,663721471	0,617249793	0,592168018
316	0,118991	0,732744964	0,718218694	0,690613709	0,642256338	0,61615558
317	0,115903	0,762855932	0,747733167	0,71899273	0,668645297	0,641469108
318	0,112864	0,794639377	0,778887003	0,748948002	0,696499849	0,668188375
319	0,109875	0,82819518	0,811778109	0,780573659	0,725907514	0,696397318
320	0,106938	0,86362817	0,846509236	0,813968494	0,756960139	0,726184024
321	0,104054	0,901048024	0,883187895	0,849235875	0,789753824	0,75764066
322	0,101224	0,940569096	0,921926175	0,886483571	0,824388761	0,790863311
323	0,098451	0,982310104	0,962840447	0,92582347	0,86096897	0,825951737
324	0,095734	1,026393692	1,006050929	0,967371155	0,899601904	0,863008988
325	0,093076	1,072945801	1,05168107	1,011245316	0,940397907	0,902140882
326	0,090478	1,122094833	1,099856733	1,057566965	0,983469475	0,943760046
327	0,087941	1,17397056	1,150705125	1,106458404	1,028930305	0,987705005
328	0,085465	1,228702735	1,20435343	1,158041915	1,076894071	1,034151793
329	0,083054	1,286419344	1,260927107	1,212438116	1,127694945	1,083311078
330	0,080706	1,347244457	1,320547771	1,269763932	1,181272497	1,13543166
331	0,078424	1,411295606	1,383330631	1,330130127	1,237845211	1,190804008
332	0,076209	1,478680629	1,449381396	1,393638329	1,297685022	1,249763731
333	0,074062	1,549493926	1,518792601	1,460411866	1,36112301	1,312694794
334	0,071983	1,623812057	1,591639294	1,530576828	1,428555061	1,380032243
335	0,069974	1,701688633	1,66797403	1,604391621	1,500447191	1,452264164
336	0,068036	1,783148472	1,74782114	1,682197982	1,577340123	1,529932517
337	0,06617	1,868180993	1,83088879	1,764430038	1,659852629	1,613632449
338	0,064376	1,956732872	1,917578894	1,851622866	1,748682991	1,704009635
339	0,062656	2,048700028	2,008163874	1,944419787	1,84460791	1,801755138
340	0,06101	2,143919043	2,103052304	2,043577469	1,948478045	1,907597294

Продолжение таблицы 13

341	0,059439	2,241483906	2,202804166	2,149967681	2,061209374	2,022290095
342	0,057944	2,342136434	2,308144186	2,264574391	2,183769536	2,1465976
343	0,056526	2,446166502	2,419971477	2,388484795	2,317158416	2,281273991
344	0,055185	2,554111759	2,539363295	2,522872861	2,462382332	2,427039018
345	0,053922	2,666784237	2,6675704	2,668974114	2,620421431	2,58454876
346	0,052737	2,785290397	2,806001402	2,828050658	2,792190205	2,754361902
347	0,051632	2,911040139	2,956193613	3,001345886	2,978491425	2,936902069
348	0,050606	3,045739668	3,119768391	3,190028954	3,179964294	3,132417108
349	0,049661	3,191362994	3,298369838	3,395129809	3,397028182	3,340936719
350	0,048796	3,350097424	3,493586902	3,617466441	3,629823943	3,562230254
351	0,048012	3,524259921	3,706860375	3,857566883	3,878155474	3,795767005
352	0,04731	3,716183582	3,939377844	4,115589416	4,141434785	4,040681669
353	0,046689	3,928076566	4,191961176	4,39124523	4,418634398	4,295747958
354	0,046151	4,161859111	4,464952407	4,683728499	4,708251182	4,559363334
355	0,045695	4,418987276	4,758104958	4,991659242	5,008285775	4,829547684
356	0,045321	4,700274343	5,070487726	5,313044475	5,316241381	5,103958147
357	0,045031	5,005722093	5,400409819	5,645262766	5,629144916	5,379921503
358	0,044823	5,334374519	5,745373417	5,985076484	5,943592294	5,654484376
359	0,044698	5,684206121	6,10206139	6,328674624	6,255818	5,924480182
360	0,044657	6,052055894	6,466364838	6,671747193	6,561787319	6,186610388
361	0,044698	6,433616533	6,833453597	7,009589987	6,857307712	6,437536379
362	0,044823	6,823486088	7,197890121	7,3372362	7,138154129	6,67397723
363	0,045031	7,215286236	7,553784113	7,649609132	7,4002018	6,892808082
364	0,045321	7,60184733	7,894982136	7,941688431	7,639559242	7,09115375
365	0,045695	7,975455627	8,215283503	8,208681048	7,852694178	7,266472514
366	0,046151	8,328152919	8,508671321	8,446187577	8,036545584	7,416625946
367	0,046689	8,652073607	8,769545897	8,650354926	8,188616167	7,539931725
368	0,04731	8,939799802	8,992947055	8,818007188	8,307041128	7,635197739
369	0,048012	9,184711739	9,174752202	8,946748136	8,390630749	7,701737096
370	0,048796	9,381309334	9,311838356	9,035030687	8,438886111	7,739364881
371	0,049661	9,525481236	9,402198529	9,08219081	8,45198885	7,748378453
372	0,050606	9,614700593	9,445005786	9,088445445	8,430767191	7,729523787
373	0,051632	9,64813169	9,44062166	9,054856057	8,376641555	7,683950729
374	0,052737	9,62663839	9,390549219	8,983261106	8,291553642	7,613160167
375	0,053922	9,552693342	9,297334618	8,876182211	8,177883316	7,518946013
376	0,055185	9,430195377	9,164424265	8,736709757	8,038357633	7,403334663
377	0,056526	9,264210538	8,995987428	8,568374438	7,875956231	7,268524204
378	0,057944	9,06065882	8,796716121	8,375011467	7,693816984	7,116825327
379	0,059439	8,825973041	8,571615154	8,160624135	7,495145374	6,950605446
380	0,06101	8,566757787	8,325795302	7,929252965	7,283130528	6,772237239
381	0,062656	8,28947477	8,064281555	7,684855962	7,060870304	6,584052452
382	0,064376	8,000176474	7,791846532	7,43120447	6,831307202	6,388301583
383	0,06617	7,704303284	7,512876475	7,171797915	6,597176266	6,187119797
384	0,068036	7,406551366	7,231274167	6,909799389	6,360965575	5,982499245
385	0,069974	7,110810607	6,950399863	6,647992699	6,124889292	5,776267778
386	0,071983	6,820165011	6,673048308	6,388760164	5,89087278	5,57007389
387	0,074062	6,536942972	6,401457424	6,134079383	5,660548773	5,365377597
388	0,076209	6,262802215	6,137342445	5,885536256	5,435263278	5,163446814
389	0,078424	5,998833975	5,881948363	5,64435097	5,21608956	4,965358707
390	0,080706	5,745672722	5,636113448	5,411413377	5,003848453	4,772005397
391	0,083054	5,521295485	5,400337197	5,187324208	4,799133158	4,584103312
392	0,085465	5,307030142	5,174847251	4,972438836	4,602336769	4,402205463

Продолжение таблицы 13

393	0,087941	5,102559856	4,975285977	4,766910804	4,413680913	4,22671589
394	0,090478	4,90754537	4,784960486	4,570732917	4,233244115	4,057905539
395	0,093076	4,721632457	4,603524344	4,397262194	4,060988775	3,895928878
396	0,095734	4,544458122	4,430622601	4,231957091	3,896785921	3,740840622
397	0,098451	4,37565571	4,265896785	4,074474258	3,75164939	3,592612018
398	0,101224	4,214859077	4,108988959	3,924470903	3,613410592	3,451146251
399	0,104054	4,06170593	3,959544995	3,781607913	3,481756511	3,316292632
400	0,106938	3,915840481	3,817217152	3,645552323	3,356379833	3,187859336
401	0,109875	3,7769155	3,681666084	3,515979236	3,236980711	3,074245532
402	0,112864	3,64459387	3,552562356	3,392573265	3,1232681	2,966050037
403	0,115903	3,518549729	3,429587554	3,275029596	3,01496073	2,863004423
404	0,118991	3,398469265	3,312435054	3,163054726	2,911787786	2,764850272
405	0,122127	3,284051219	3,200810522	3,056366928	2,813489333	2,671339582
406	0,125308	3,175007166	3,094432178	2,954696508	2,719816553	2,582234986
407	0,128535	3,0710616	2,99303088	2,857785885	2,630531817	2,497309813
408	0,131805	2,971951878	2,896350062	2,765389525	2,545408619	2,416348031
409	0,135116	2,877428036	2,804145559	2,677273774	2,464231427	2,339144091
410	0,138467	2,78725252	2,716185339	2,5932166	2,386795434	2,265502696
411	0,141857	2,701199845	2,632249171	2,513007273	2,312906271	2,195238516
412	0,145284	2,619056207	2,552128239	2,436445994	2,242379658	2,128175859
413	0,148747	2,54061905	2,475624724	2,363343495	2,175041035	2,064148316
414	0,152244	2,465696618	2,402551361	2,293520615	2,110725171	2,002998384
415	0,155773	2,39410749	2,332730986	2,226807861	2,049275757	1,944577077
416	0,159333	2,325680106	2,265996071	2,163044968	1,990545001	1,888743537
417	0,162923	2,260252294	2,202188264	2,102080453	1,934393214	1,835364643
418	0,16654	2,197670812	2,141157935	2,043771184	1,880688411	1,784314624
419	0,170184	2,137790882	2,082763726	1,987981944	1,829305915	1,73547468
420	0,173852	2,080475749	2,026872117	1,934585022	1,780127968	1,688732616
421	0,177543	2,025596253	1,973357006	1,883459805	1,733043363	1,643982484
422	0,181256	1,973030408	1,922099304	1,834492389	1,687947086	1,601124242
423	0,184988	1,922663009	1,872986543	1,78757521	1,644739965	1,560063422
424	0,188739	1,874385251	1,825912504	1,742606684	1,603328348	1,52071082
425	0,192507	1,828094361	1,780776865	1,699490867	1,563623787	1,482982194
426	0,19629	1,78369326	1,737484861	1,658137134	1,525542738	1,446797977
427	0,200087	1,74109023	1,695946967	1,618459874	1,489006278	1,412083011
428	0,203896	1,700198605	1,656078587	1,580378193	1,453939843	1,37876629
429	0,207715	1,660936477	1,617799778	1,543815645	1,420272964	1,346780714
430	0,211544	1,623226418	1,581034968	1,508699971	1,387939035	1,316062865
431	0,21538	1,586995223	1,545712707	1,474962851	1,356875086	1,286552789
432	0,219222	1,552173654	1,511765423	1,442539678	1,327021567	1,258193793
433	0,223069	1,518696214	1,479129196	1,411369337	1,298322151	1,230932255
434	0,226919	1,486500929	1,447743543	1,381394	1,27072354	1,20471744
435	0,23077	1,455529137	1,417551218	1,352558938	1,244175293	1,179501335
436	0,234622	1,425725297	1,388498022	1,324812334	1,218629657	1,155238487
437	0,238472	1,397036808	1,360532625	1,298105117	1,194041408	1,131885855
438	0,24232	1,369413838	1,333606399	1,2723908	1,170367706	1,109402667
439	0,246164	1,342809159	1,307673264	1,24762533	1,147567956	1,087750289
440	0,250002	1,317178004	1,282689535	1,22376695	1,125603676	1,066892104
441	0,253833	1,292477918	1,25861379	1,200776062	1,104438379	1,04679339
442	0,257656	1,268668629	1,235406734	1,178615107	1,084037453	1,027421215
443	0,261469	1,245711922	1,213031083	1,157248445	1,064368061	1,008744333
444	0,265272	1,223571522	1,191451444	1,136642246	1,045399029	0,990733088

Продолжение таблицы 13

445	0,269063	1,202212983	1,170634211	1,11676439	1,027100764	0,973359323
446	0,27284	1,181603587	1,150547465	1,097584369	1,009445153	0,956596295
447	0,276603	1,161712245	1,131160876	1,079073193	0,992405488	0,940418598
448	0,280349	1,142509406	1,112445614	1,06120331	0,975956383	0,924802082
449	0,284079	1,123966973	1,09437427	1,043948523	0,960073704	0,909723792
450	0,287791	1,106058219	1,076920772	1,027283915	0,944734495	0,895161893
451	0,291483	1,088757716	1,060060316	1,011185782	0,929916915	0,881095612
452	0,295155	1,072041263	1,043769292	0,99563156	0,91560018	0,867505183
453	0,298806	1,055885815	1,028025224	0,980599771	0,901764501	0,854371784
454	0,302434	1,040269426	1,012806703	0,966069955	0,888391032	0,841677495
455	0,306038	1,025171186	0,998093334	0,952022624	0,875461819	0,829405243
456	0,309617	1,01057117	0,983865682	0,938439205	0,862959754	0,817538757
457	0,313171	0,996450379	0,970105217	0,925301992	0,850868526	0,806062531
458	0,316699	0,982790698	0,95679427	0,912594101	0,839172582	0,794961775
459	0,320199	0,969574845	0,943915986	0,900299427	0,827857088	0,784222386
460	0,32367	0,956786331	0,931454281	0,888402603	0,816907888	0,773830905
461	0,327113	0,944409414	0,919393806	0,876888961	0,806311472	0,763774488
462	0,330525	0,932429068	0,907719902	0,865744497	0,796054942	0,754040872
463	0,333906	0,920830937	0,896418573	0,854955836	0,786125979	0,744618348
464	0,337255	0,909601312	0,885476445	0,844510203	0,776512814	0,735495728
465	0,340572	0,898727087	0,87488074	0,834395388	0,767204204	0,726662324
466	0,343856	0,888195737	0,864619244	0,824599721	0,758189399	0,718107919
467	0,347105	0,877995288	0,854680278	0,815112046	0,749458126	0,709822747
468	0,35032	0,868114284	0,845052672	0,805921691	0,741000555	0,701797467
469	0,353499	0,858541771	0,835725743	0,79701845	0,732807287	0,694023145
470	0,356643	0,849267262	0,826689268	0,788392556	0,724869326	0,686491232
471	0,35975	0,840280725	0,817933461	0,780034661	0,717178065	0,679193547
472	0,362819	0,831572552	0,809448955	0,771935818	0,709725263	0,67212226
473	0,365851	0,823133545	0,801226782	0,764087457	0,702503029	0,66526987
474	0,368844	0,814954894	0,79325835	0,756481374	0,695503807	0,658629199
475	0,371799	0,807028158	0,785535431	0,749109706	0,688720357	0,652193366
476	0,374714	0,799345252	0,778050139	0,741964922	0,682145743	0,645955782
477	0,37759	0,791898425	0,770794918	0,735039805	0,67577332	0,639910131
478	0,380425	0,784680247	0,763762526	0,728327435	0,669596715	0,63405036
479	0,383219	0,777683598	0,756946018	0,721821179	0,663609821	0,628370666
480	0,385972	0,770901647	0,750338735	0,715514678	0,657806782	0,622865485
481	0,388684	0,764327844	0,743934292	0,709401832	0,652181983	0,617529481
482	0,391353	0,757955908	0,737726565	0,703476792	0,646730035	0,612357537
483	0,393981	0,751779812	0,731709677	0,697733945	0,641445772	0,607344745
484	0,396566	0,745793773	0,725877991	0,692167906	0,636324236	0,602486393
485	0,399108	0,739992242	0,720226098	0,68677351	0,631360669	0,597777964
486	0,401606	0,734369895	0,714748807	0,681545799	0,626550508	0,593215121
487	0,404062	0,728921621	0,709441136	0,676480014	0,621889371	0,588793703
488	0,406473	0,723642515	0,704298302	0,671571587	0,617373053	0,584509715
489	0,408841	0,718527868	0,699315715	0,666816136	0,612997518	0,580359325
490	0,411164	0,713573159	0,69448897	0,662209452	0,60875889	0,57633885
500	0,431925	0,671948706	0,653940797	0,623511146	0,573153488	0,542568099
510	0,448109	0,571948706	0,553940797	0,523511146	0,473153488	0,442568099

Выводы по 2-му разделу бакалаврской работы

Тепловой расчет показал значительное влияние вида топлива на мощностные и экономические характеристики работы. Получено, что для эффективного использования природного газа требуется применение непосредственного впрыска природного газа. При этом необходимо повышать степень сжатия. В рассматриваемом варианте выбрана степень сжатия 14, но для непосредственного впрыска природного газа в цилиндр двигателя возможно применение степени сжатия до 19. В текущей конструкции форкамерного газового двигателя повышение степени сжатия более 14 могло вызвать повышенное содержание пристеночных замороженных углеводородов. Для степеней сжатия более 14 рекомендовано применять не разделенную камеру сгорания.

3 Кинематический и динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя

3.1 Кинематический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя

Кинематический расчет для центрального кривошипно-шатунного механизма проектируемого двигателя (радиус кривошипа 42,2 мм, а длина шатуна 147,4 мм) проводился по известным методикам приведенным в [1,2], при частоте вращения коленчатого вала 5200 мин⁻¹.

Результаты расчета перемещения, скорости и ускорения поршня приведены на рисунках 5, 6 и 7.

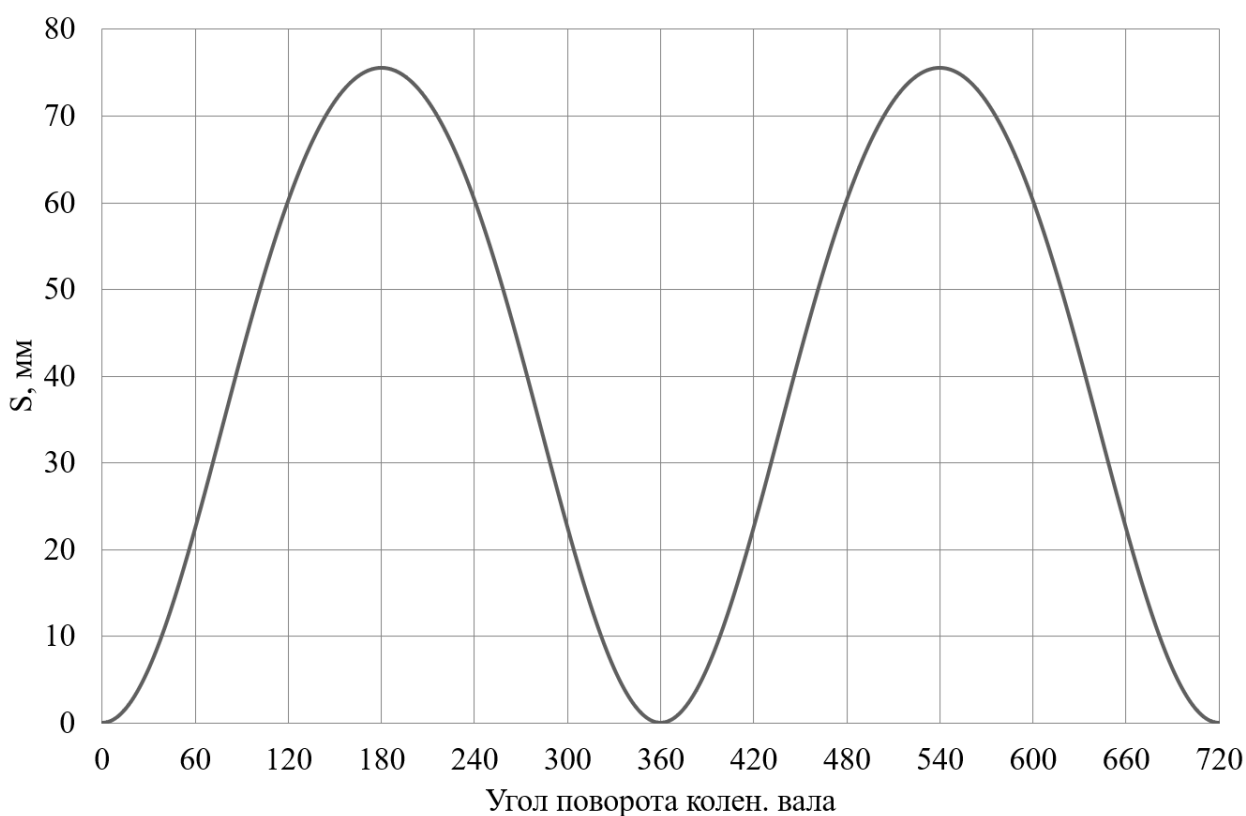


Рисунок 5 – Диаграмма изменения хода поршня

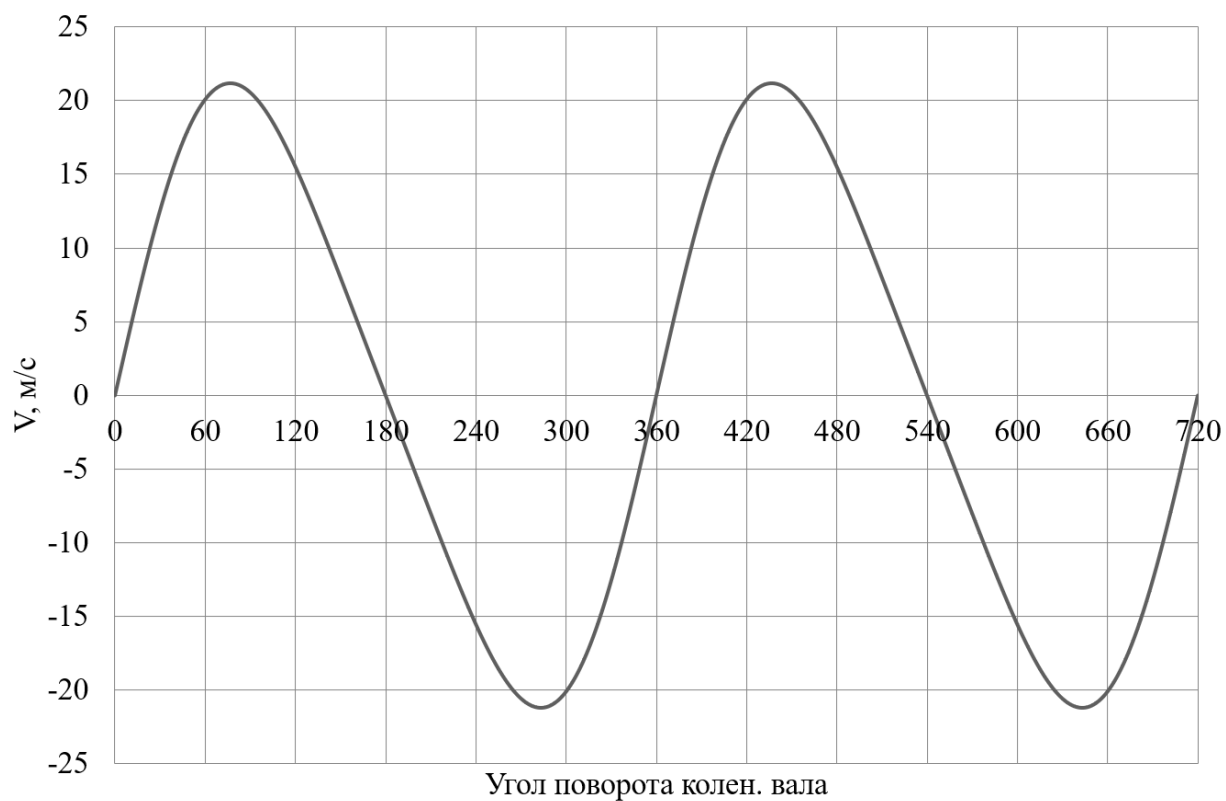


Рисунок 6 – Диаграмма изменения скорости поршня

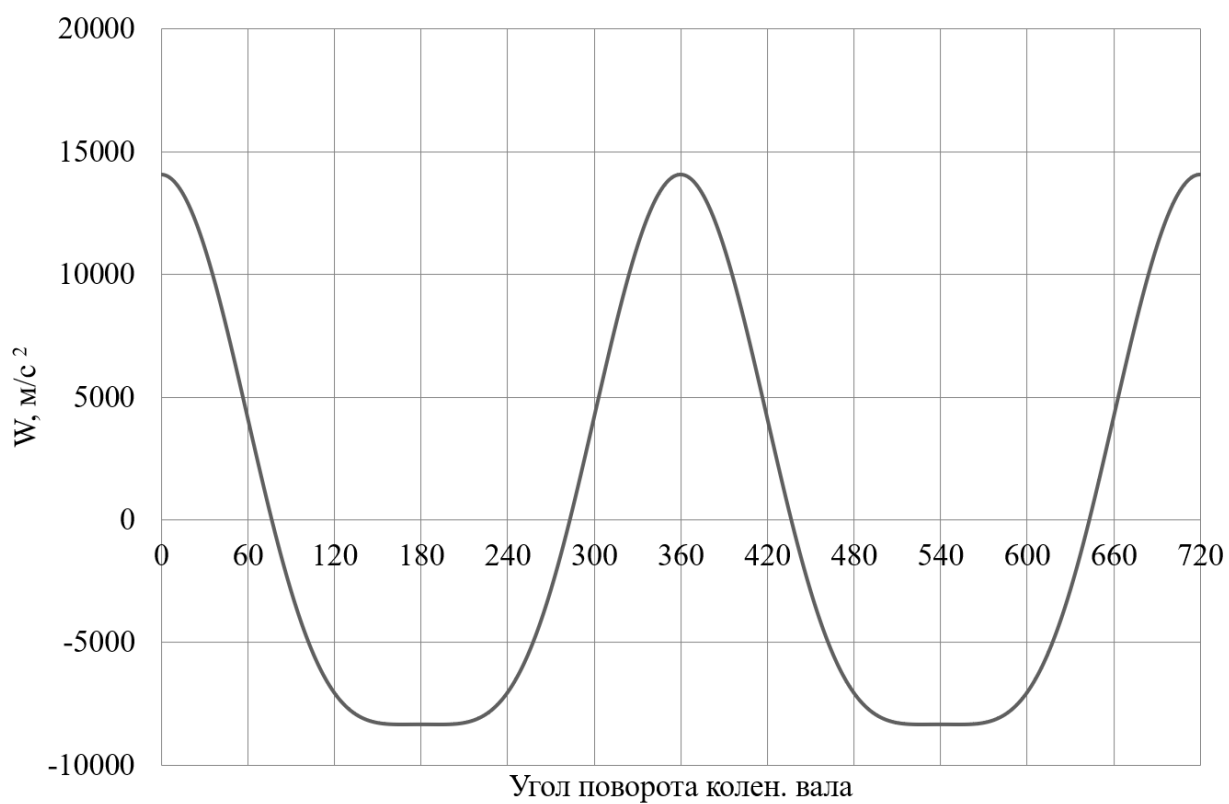


Рисунок 7 – Диаграмма изменения ускорения поршня

По результатам кинематического расчета мы можем определить инерционные силы в динамическом расчете.

3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя

3.2.1 Расчет основных сил и моментов действующих в КШМ

Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма проектируемого двигателя проводился по известным методикам приведенным в [1,2], при частоте вращения коленчатого вала 5200 мин^{-1} , для условий работы двигателя на бензине и сжатом природном газе.

Результаты приведение масс кривошипно-шатунного механизма по двух массовой схеме показаны в таблице 14.

Таблица 14 – Приведение масс кривошипно-шатунного механизма

Параметр	Величина
Площадь поршня, м^2	0,005027
Удельная масса поршня, $\text{кг}/\text{м}^2$	80
Масса поршневой группы, кг	0,40212
Удельная масса шатуна, $\text{кг}/\text{м}^2$	130
Масса шатуна, кг	0,65345
Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца, кг	0,18
Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа, кг	0,474
Удельная масса одного колена вала, $\text{кг}/\text{м}^2$	125
Масса неуравновешенных частей одного колена вала, кг	0,6283
Массы, совершающие возвратно-поступательное движение	0,582
Массы, совершающие вращательное движение	1,10207
Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна, Н	-5310,15
Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа, Н	-7042,6
Центробежная сила инерции вращающихся масс, Н	-12353

Результаты расчета приведены в виде графиков. На рисунке 8 приведены силы инерции возвратно-поступательного движения.

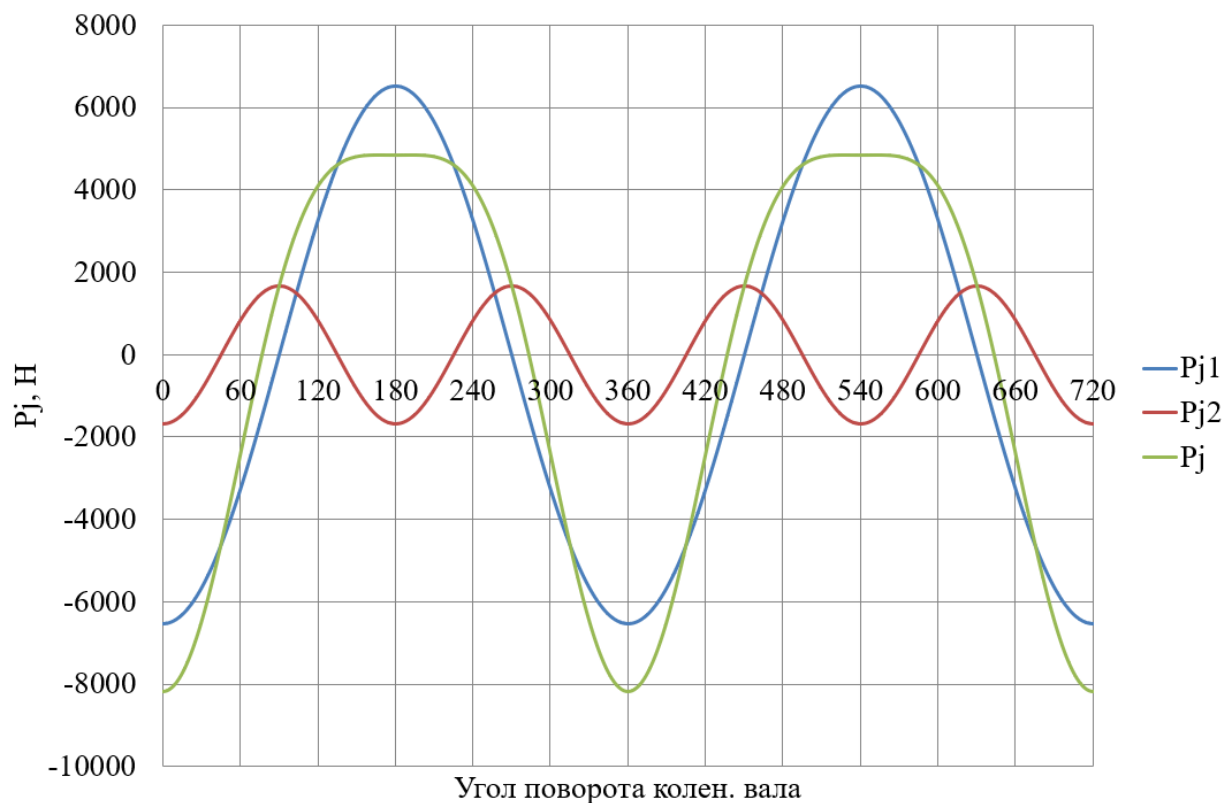


Рисунок 8 – Силы инерции возвратно-поступательного движения поршня и шатуна

На рисунках 9 и 10 приведено сравнение суммарных сил, действующих на поршневой палец двигателя при работе на бензине (рисунок 10), КПГ (рисунок 10).

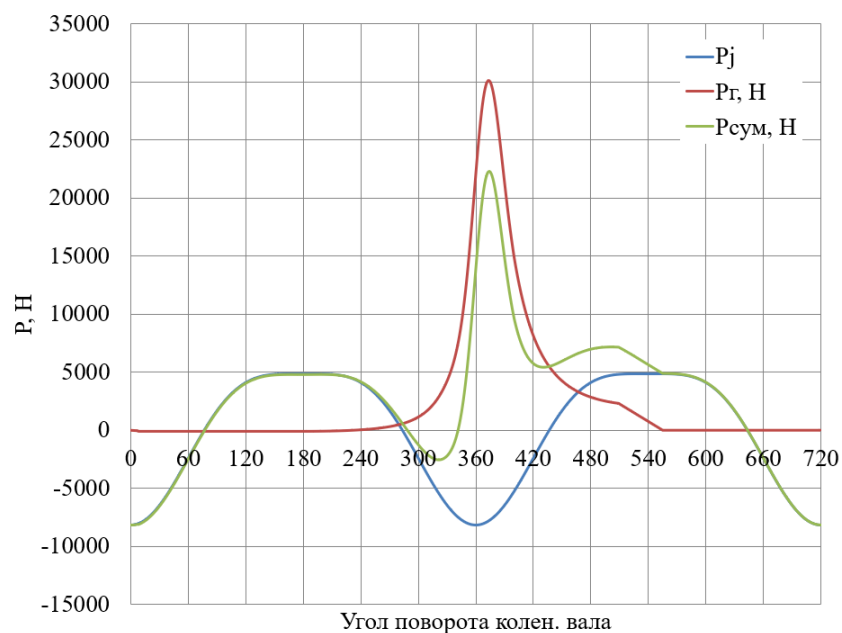


Рисунок 9 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец двигателя при работе на бензине

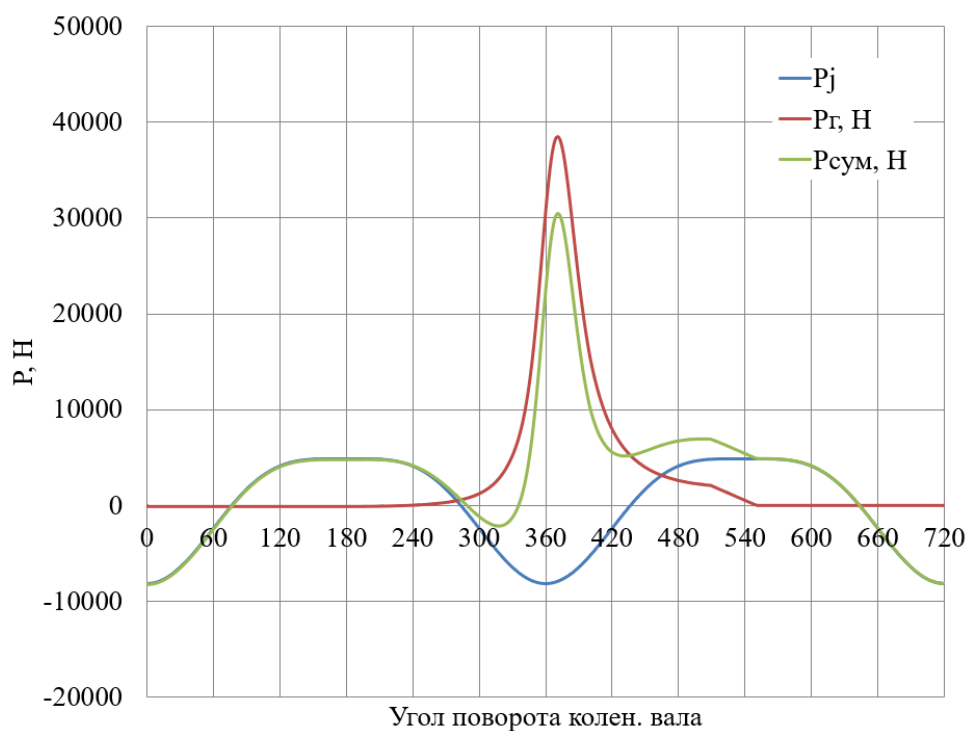


Рисунок 10 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец двигателя при работе на компримированном природном газе

На рисунках 11 и 12 приведено сравнение сил, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки при работе на бензине (рисунок 11), КПГ (рисунок 12).

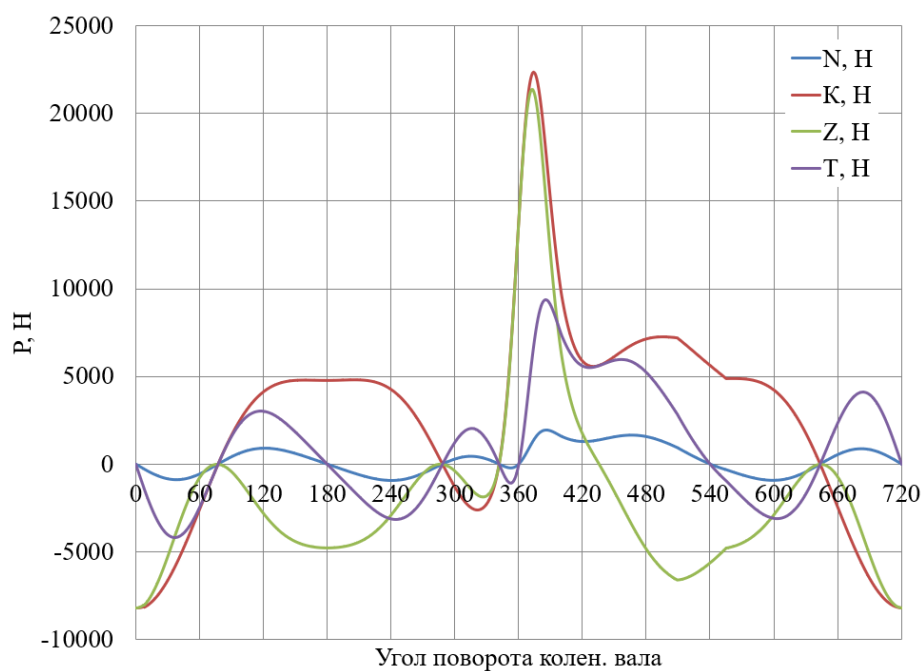


Рисунок 11 – Силы, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки двигателя при работе на бензине

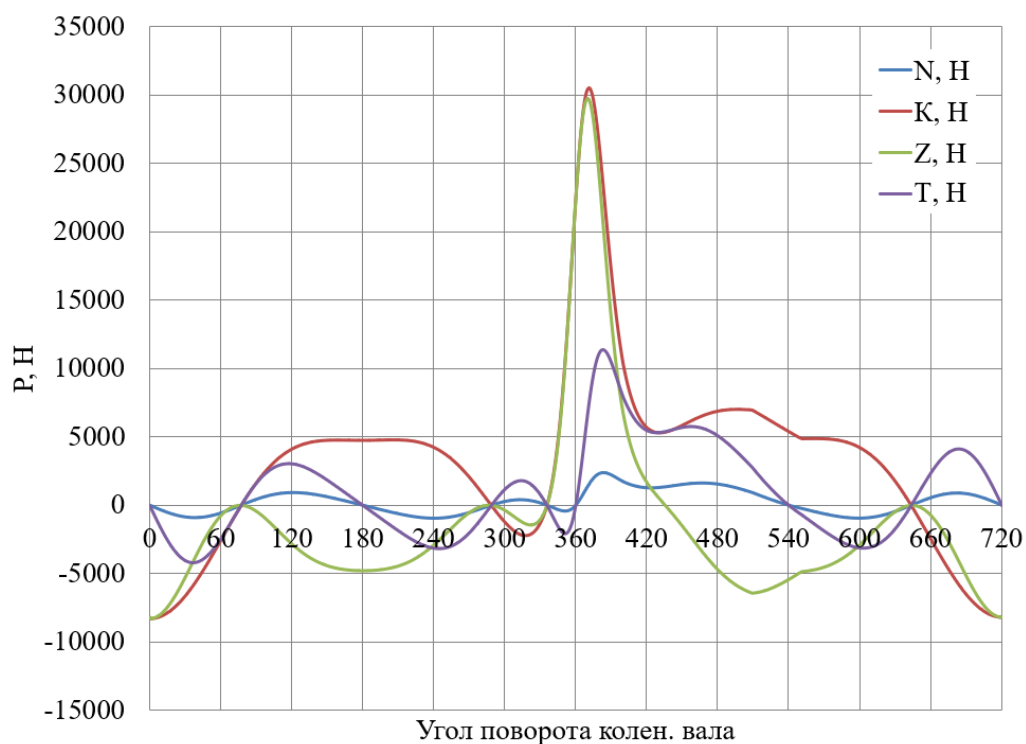


Рисунок 12 – Силы, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки двигателя при работе на сжатом природном газе

На рисунках 13 и 14 приведено сравнение крутящего момента двигателя при работе на бензине (рисунок 13), КПГ (рисунок 14).

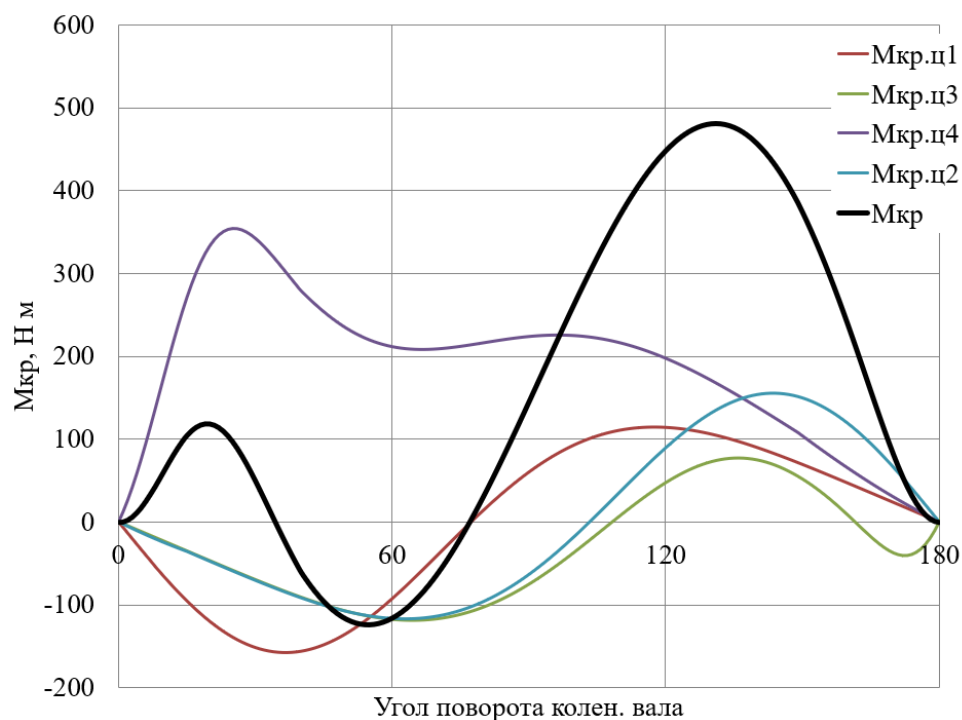


Рисунок 13 – График крутящего момента при работе на бензине

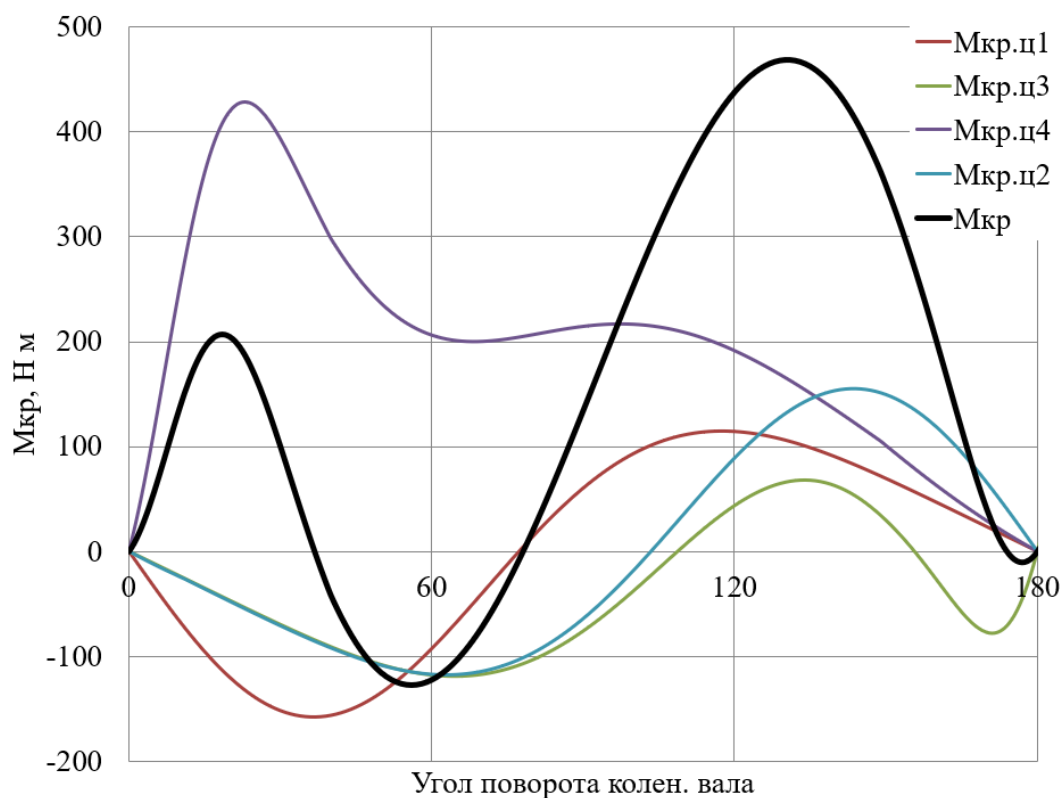


Рисунок 14 – График крутящего момента при работе на компримированном природном газе

Расчет основных сил и моментов действующих в КШМ показал, что наибольшие силы возникают при работе на бензине, а при работе на газовом топливе их максимальные величины снижаются 5 – 8 %, причем при работе на биометане происходит еще снижение на 1 – 2 процента.

3.2.2 Расчет сил, действующих на шатунную и коренные шейки коленчатого вала

На рисунках 15 и 16 приведено сравнение суммарной силы, действующую на шатунную шейку в прямоугольных координатах при работе на бензине (рисунок 15), КПГ (рисунок 16) соответственно.

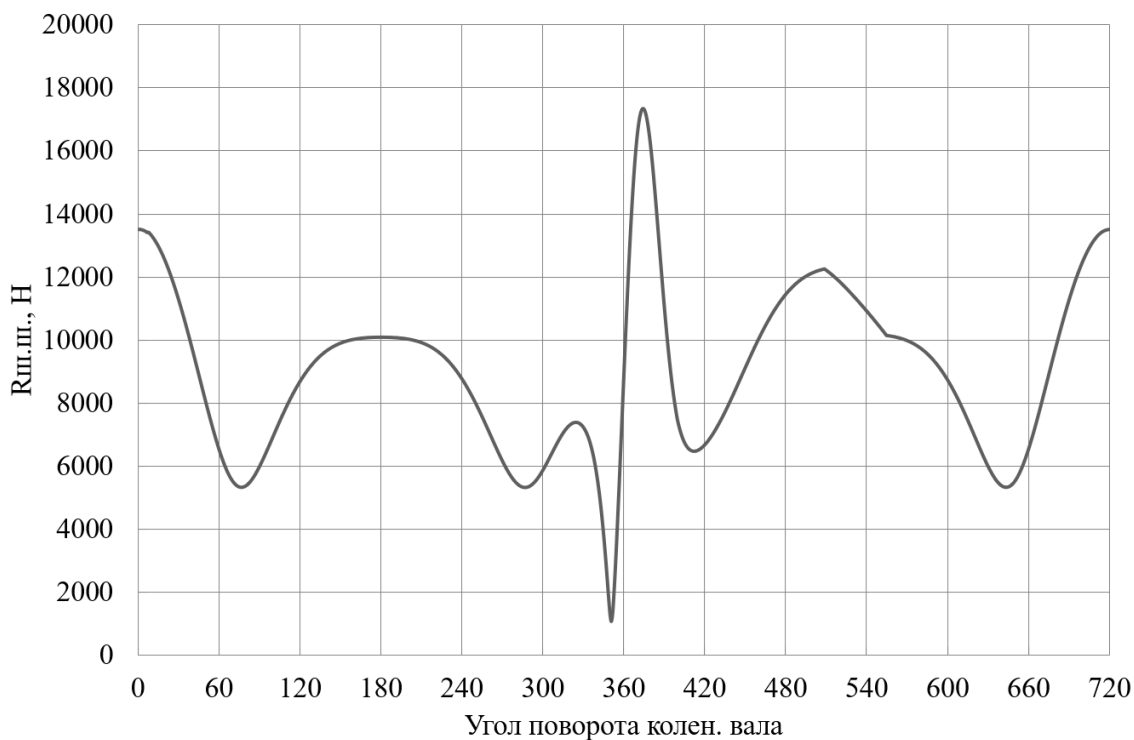


Рисунок 15 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку при работе на бензине

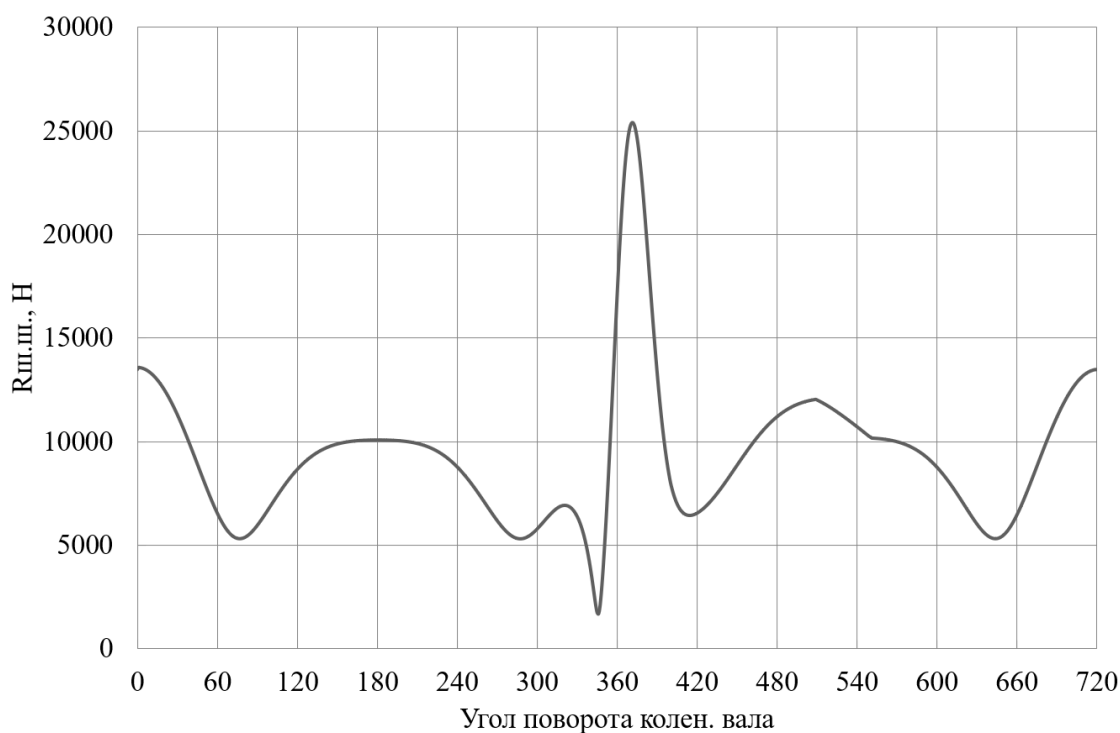


Рисунок 16 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку при работе на компримированном природном газе

На рисунках 17 и 18 приведено сравнение суммарной силы, действующую на шатунную шейку в полярных координатах при работе на бензине (рисунок 17), КПГ (рисунок 18) соответственно.

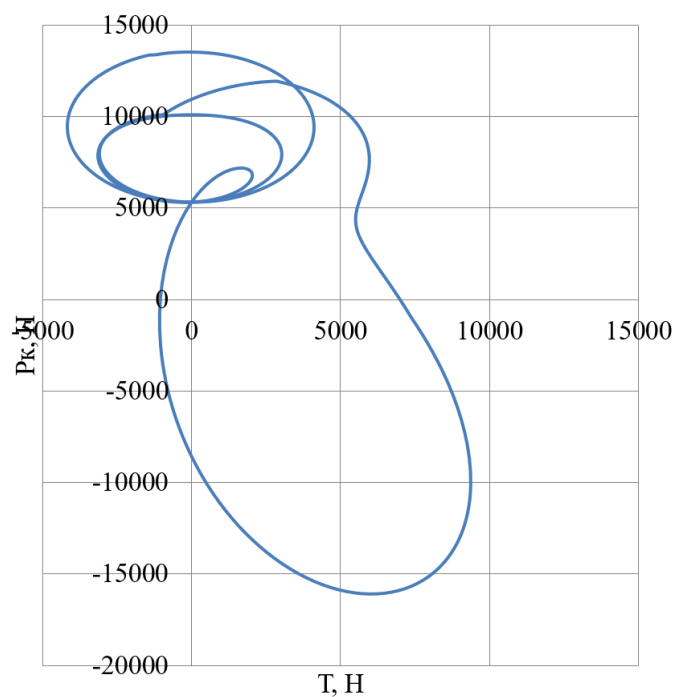


Рисунок 17 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку в полярных координатах при работе на бензине

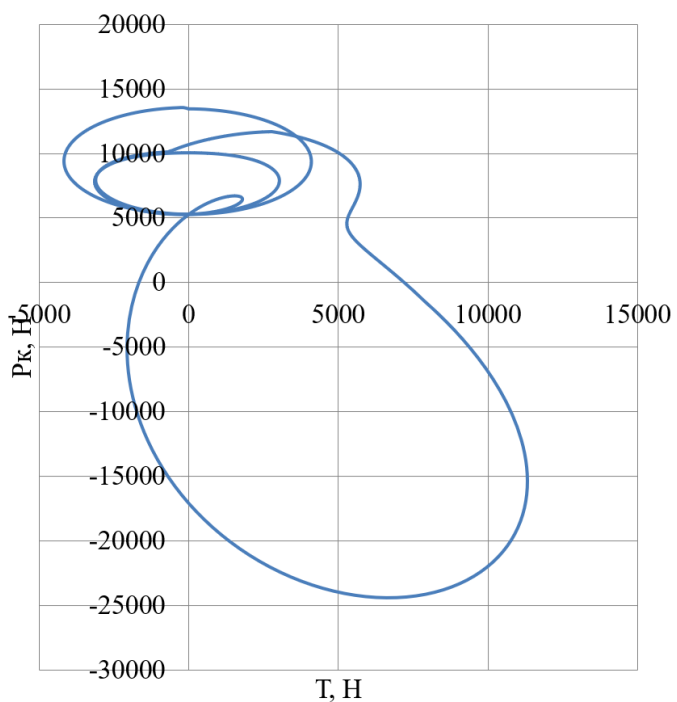


Рисунок 18 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку в полярных координатах при работе на КПГ

На рисунках 19 и 20 приведено сравнение суммарных сил, действующих на коренные шейки в прямоугольных координатах при работе на бензине (рисунок 19), КПГ (рисунок 20).

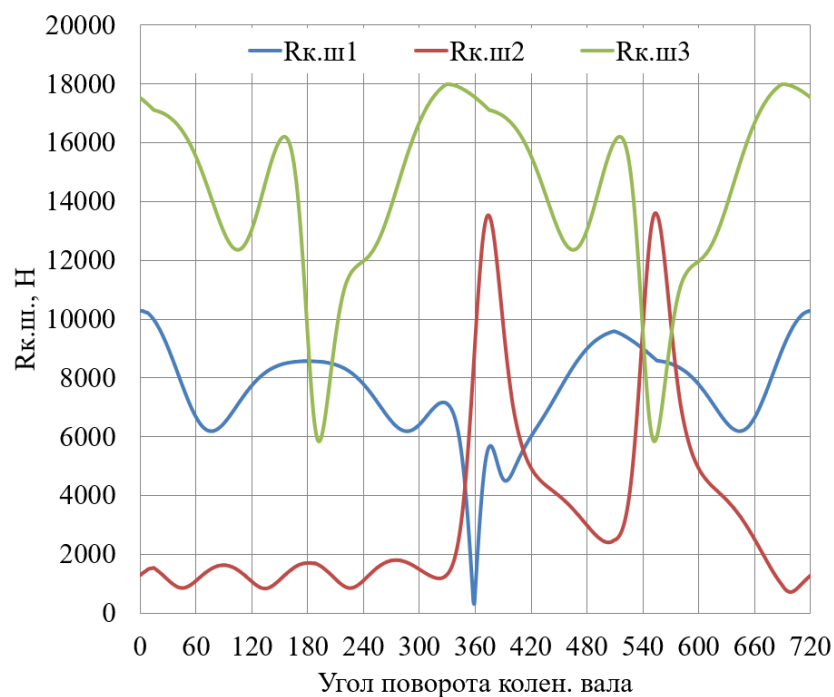


Рисунок 19 – Суммарные силы, действующие на коренные шейки в прямоугольных координатах при работе на бензине

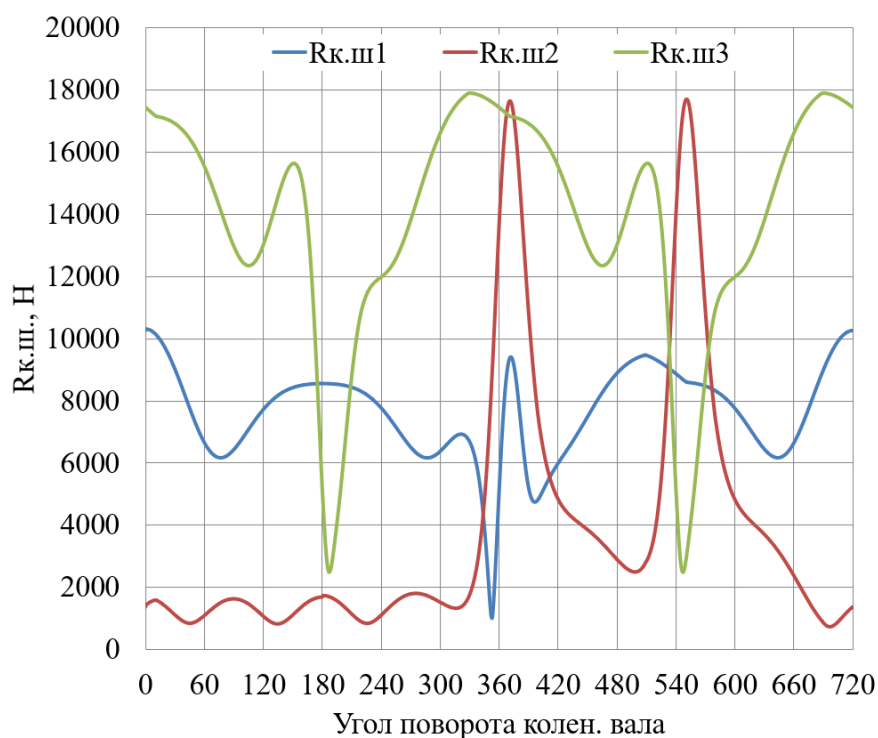


Рисунок 20 – Суммарные силы, действующие на коренные шейки в прямоугольных координатах при работе на КПГ

На рисунках 21 и 22 приведено сравнение суммарных сил, действующих на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при работе на бензине (рисунок 21), КПГ (рисунок 22).

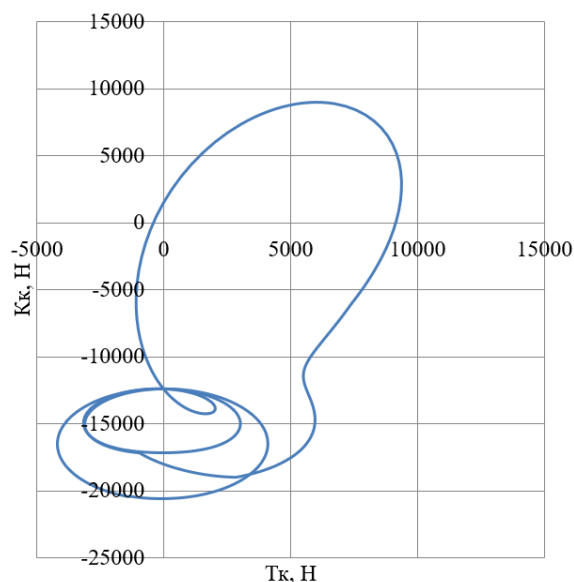


Рисунок 21 – Суммарные силы, действующие на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при работе на бензине

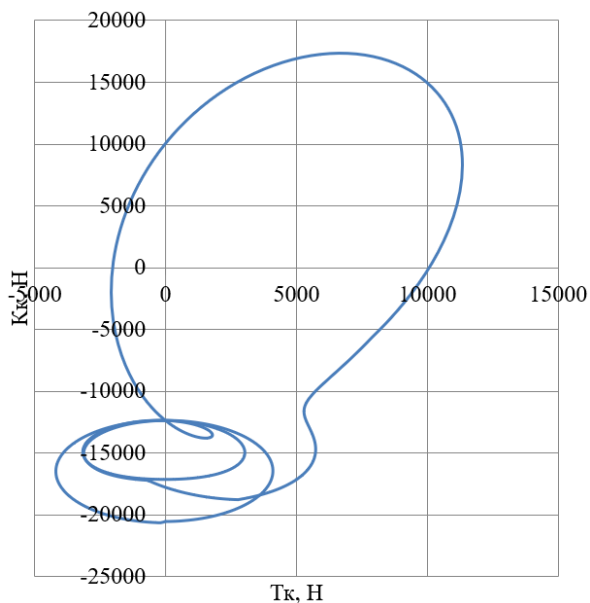


Рисунок 22 – Суммарные силы, действующие на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при работе на КПГ

Выводы по 3-му разделу

Применение непосредственного впрыска и повышение степени сжатия приводят к росту тепловой напряженности деталей кривошипно-шатунного механизма. Помимо этого, происходит рост нагрузок, как пиковых, так и средних, что требует внесение в конструкцию дополнительных мер по повышению прочности и надежности деталей КШМ. Рост нагрузок на отдельные шейки составляет до 20%.

4 Анализ влияния вида топлива (бензин, КПГ) на рабочий процесс ДВС

4.1 Влияния вида топлива (бензин, КПГ) на максимальную температуру и давление цикла

Сравнивая величины максимального давления в цилиндре двигателя (рисунок 23), следует отметить, что при работе на КПГ с непосредственным впрыском и степенью сжатия 14, против 10,5 у базового варианта, происходит повышение почти на 2 МПа максимальное давление, но в тоже время максимальная температура показывает максимальные значения на минимальных оборотах, а затем снижается и становится почти на 100 К ниже максимальной температуры при сгорании бензина [28].

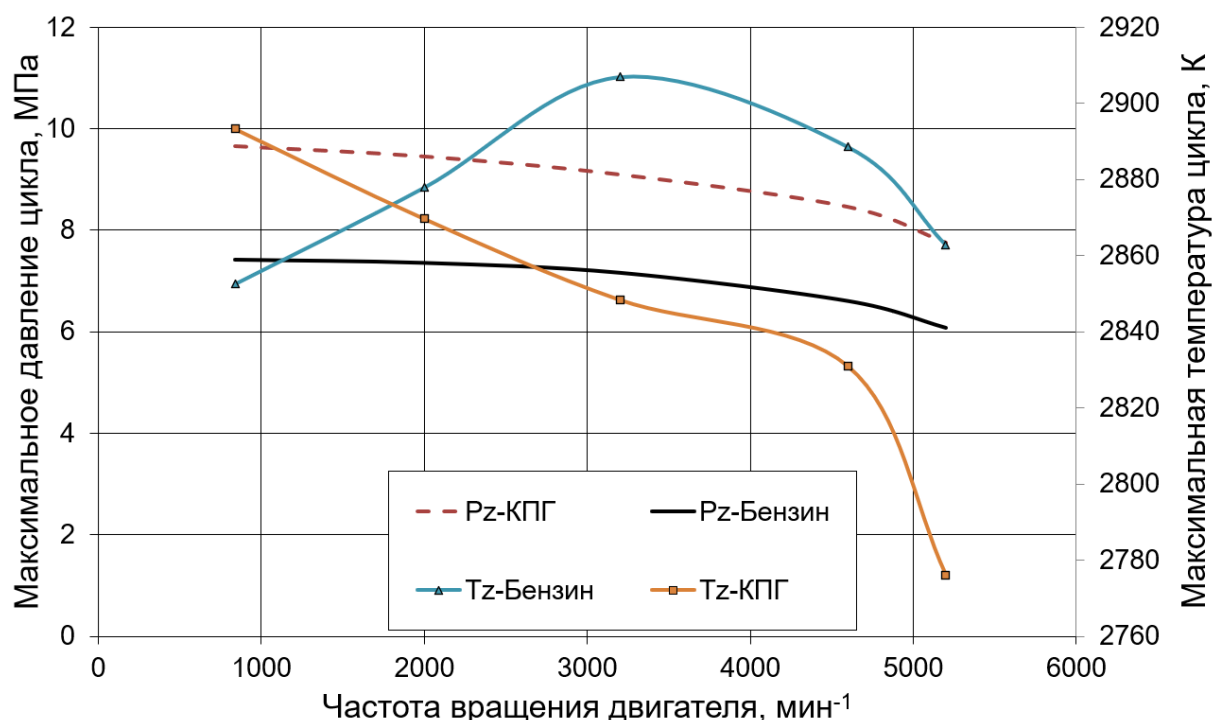


Рисунок 23 – Сравнение величины максимального давления в цилиндре двигателя для исследуемых топлив

Для оценки токсичности проведем сравнение изменения температуры в процессе сгорания (рисунки 24 – 28).

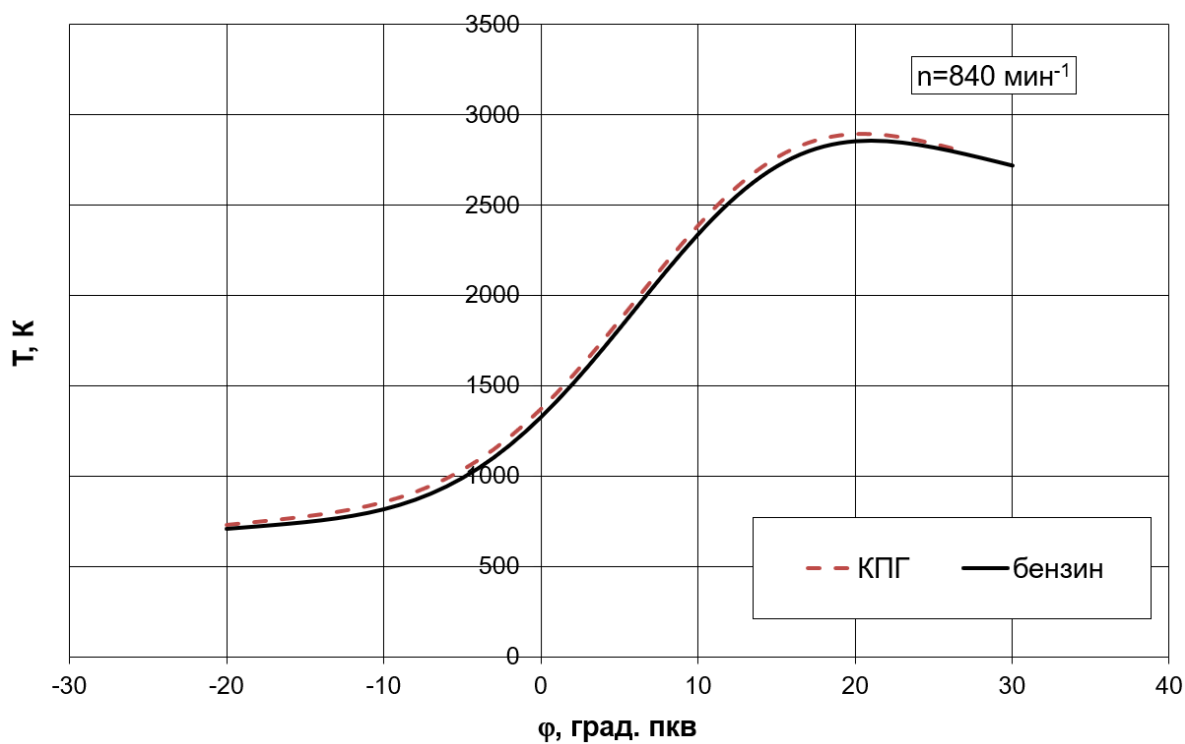


Рисунок 24 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 840 мин^{-1}

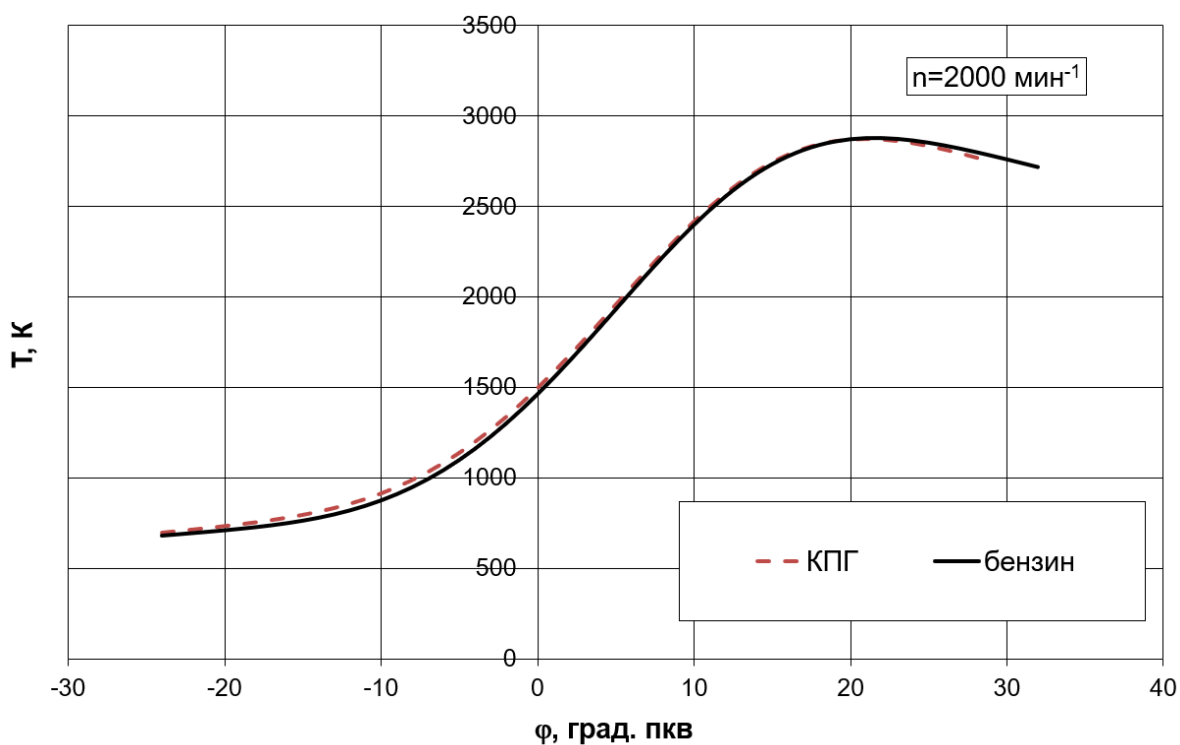


Рисунок 25 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 2000 мин^{-1}

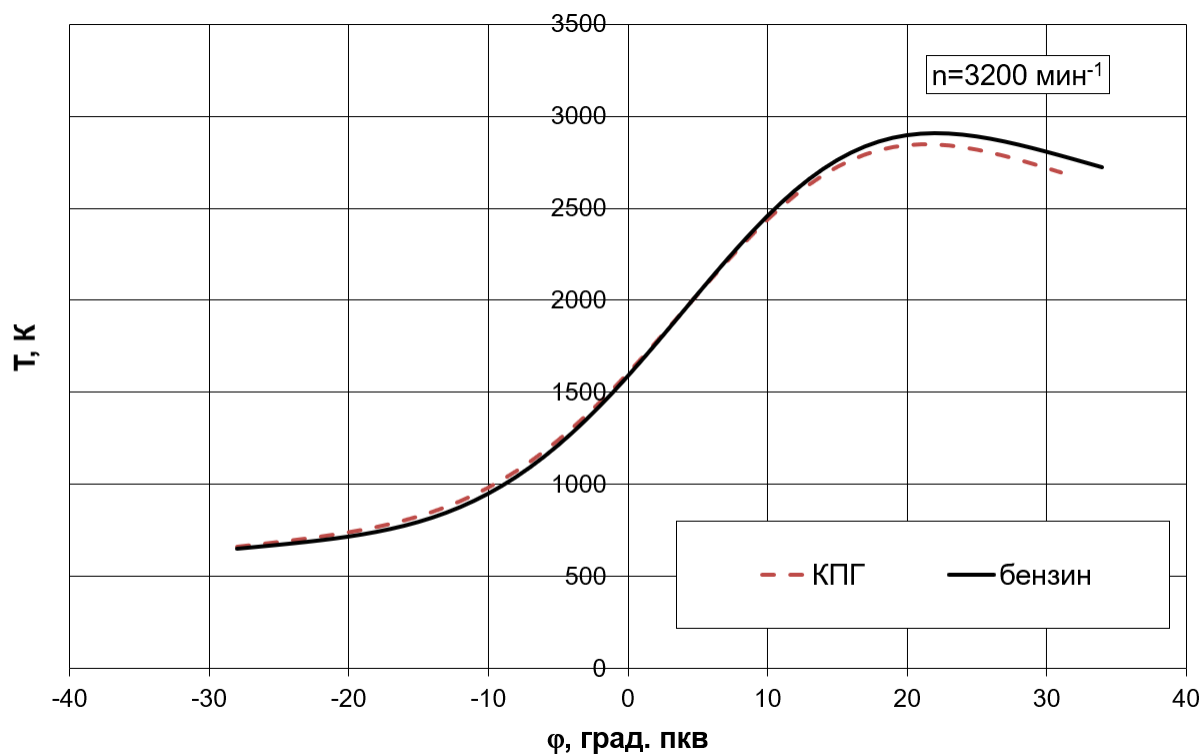


Рисунок 26 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 3400 мин^{-1}

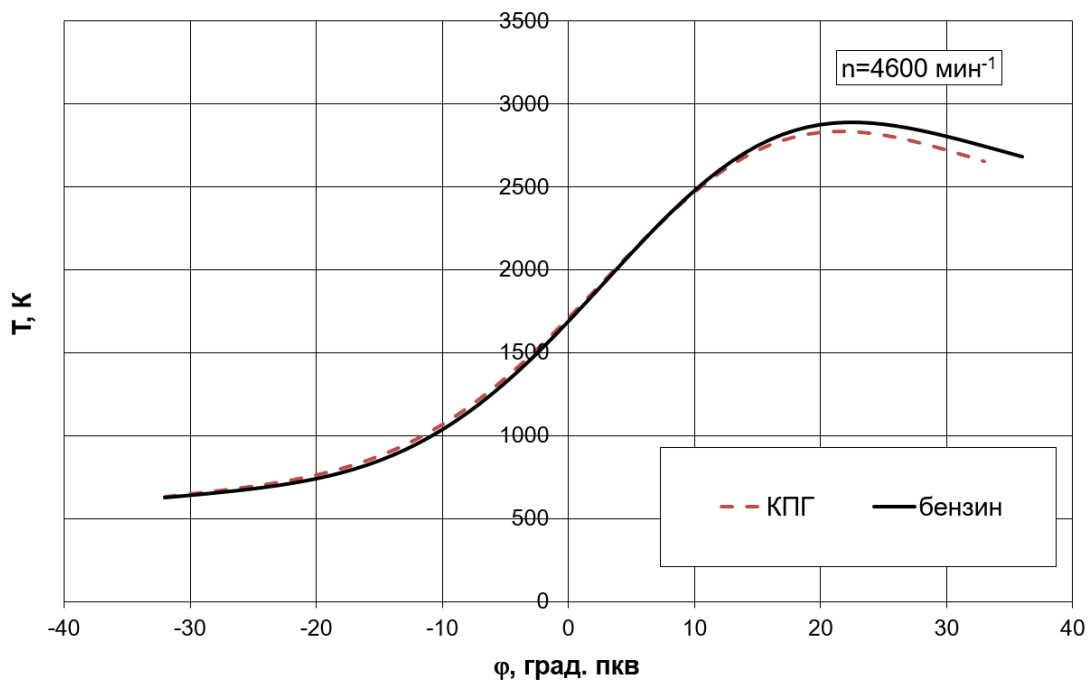


Рисунок 27 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 4800 мин^{-1}

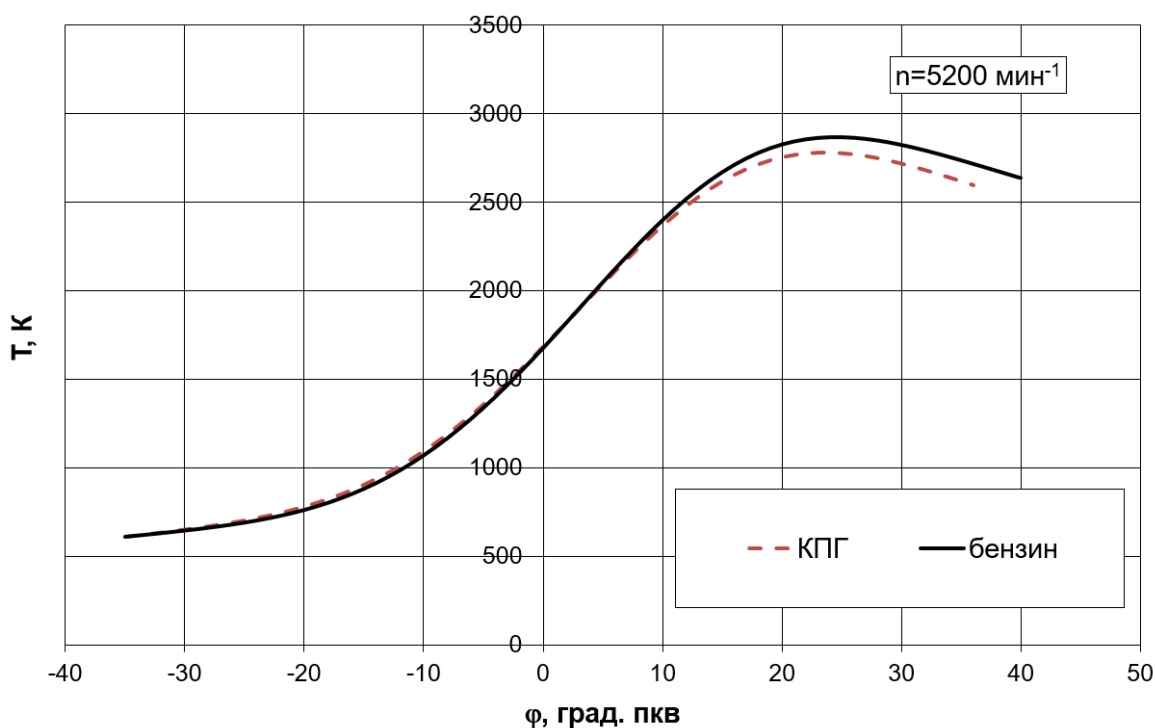


Рисунок 28 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 5200 мин⁻¹

Проводя анализ средней температуры в цилиндре двигателя во время сгорания по рисункам 24 – 28, можно отметить, что максимальная температура соответствует рабочему процессу на бензине, что соответствует большему энергетическому заряду, вводимому в цилиндр двигателя при работе на бензине на впуске, за счет охлаждения свежего заряда при испарении бензина, газ подаваемый непосредственно в камеру сгорания после закрытия впускных каналов не может влиять на снижение температуры поступающего воздуха [29].

4.2 Влияния вида топлива (бензин, КПГ) на эффективные показатели цикла

Проводить анализ эффективных показателей работы двигателя правильнее всего по графическому изображению внешней скоростной характеристики (рисунки 29, 30 и 31).

На рисунке 29 представлен графический анализ условий наполнения при работе на бензине и природном газе. Видно, что применение непосредственного впрыска газа привело к улучшению наполнения почти на 5-10%, что особенно важно при работе на повышенной частоте вращения коленчатого вала [30].

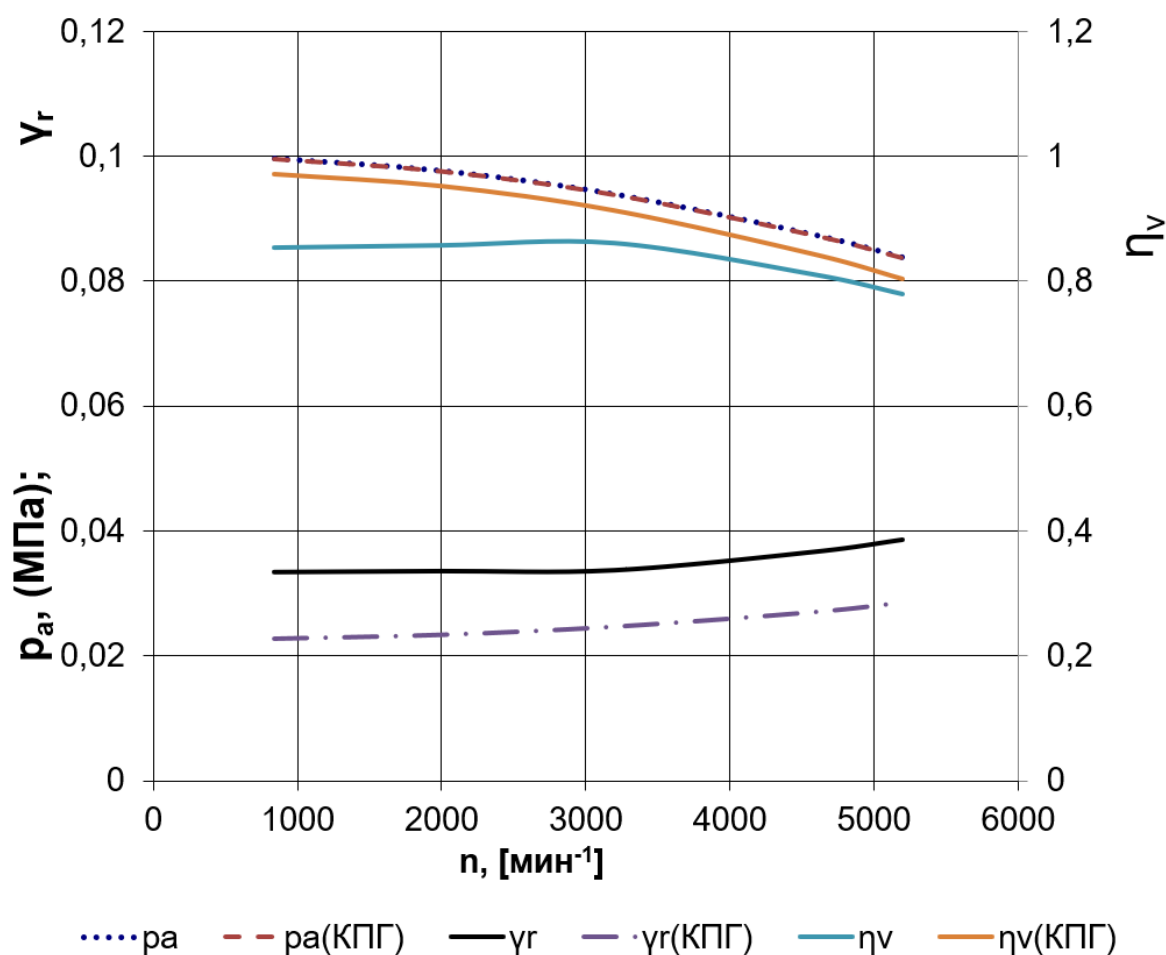


Рисунок 29 – Сравнение характеристик условий наполнения базового двигателя и при непосредственном впрыске КПГ в цилиндр

Для бензина наглядно видно (рисунок 30), наличие максимума крутящего момента для частоты вращения 2000 мин⁻¹. С увеличением частоты вращения крутящий момент снижается.

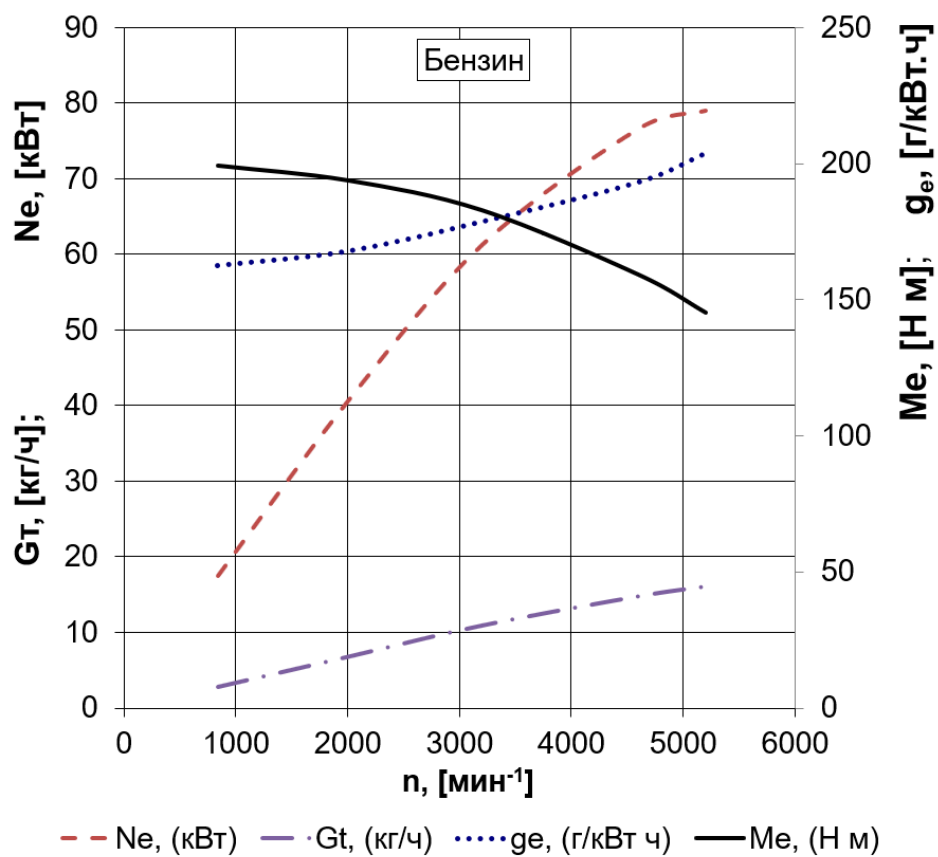


Рисунок 30 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с искровым зажиганием при работе на бензине

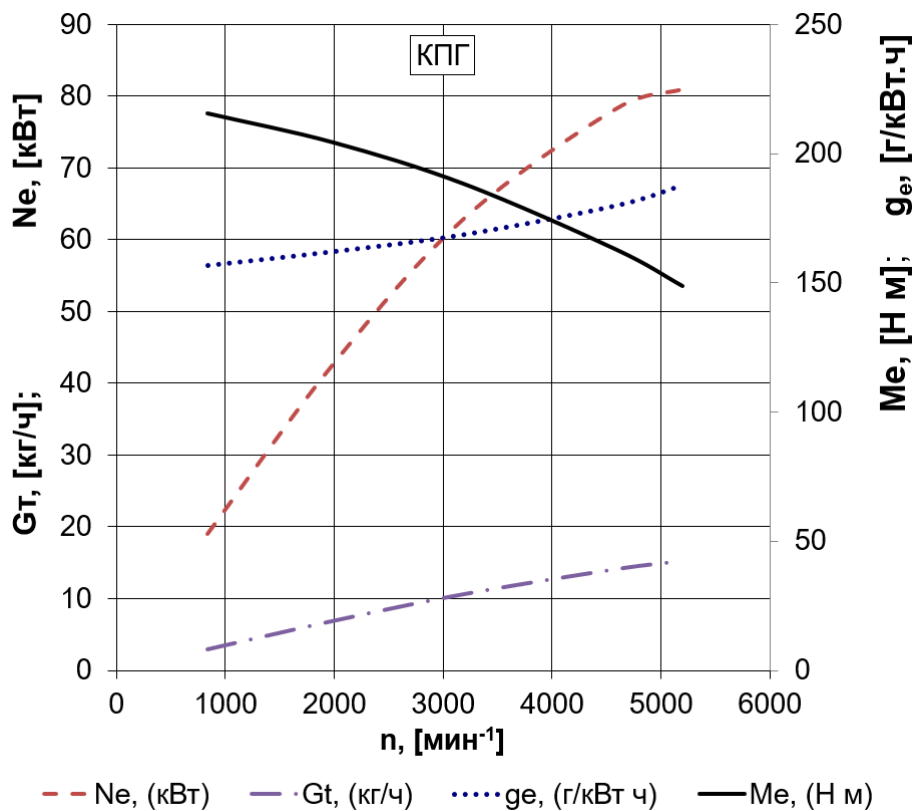


Рисунок 31 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с искровым зажиганием при работе на КПГ

Из графиков внешней скоростной характеристики видно наличие высоких крутящих моментов на низких частотах вращения. Особенно это заметно для условий работы на бензине, где видно, что крутящий момент с ростом оборотов падает на 20%.

4.3 Анализ конструкции спроектированного двигателя

В результате проведенного проблемного анализа существующих путей развития современного автомобильного двигателестроения и проведенных расчетов была доказана целесообразность активного исследования и поиска конструктивных решения, позволяющих реализовать форкамерный процесс для современных автомобильных двигателей. Общий вид предложенной компоновки представлен на рисунке 32, где показан предложенный вариант реализации системы непосредственного впрыска топлива в цилиндр двигателя с форкамерой для повышения эффективности процесса сгорания [31].

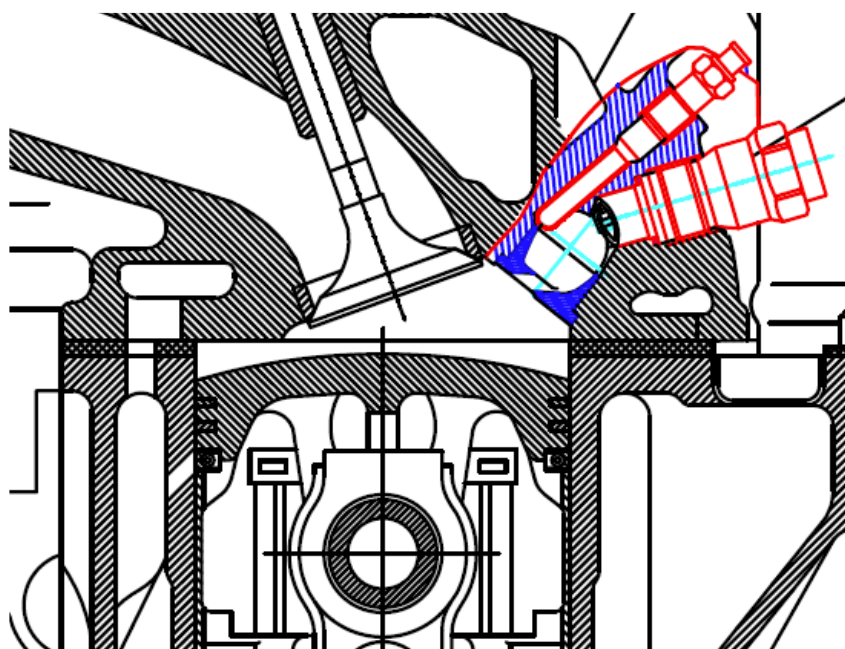


Рисунок 32 – Предложенный вариант реализации системы непосредственного впрыска топлива в цилиндр двигателя с форкамерой для повышения эффективности процесса сгорания.

Применение сжатого природного газа позволяет осуществлять процесс непосредственного впрыска топлива в цилиндр двигателя с большей эффективностью, ведь при подаче природного газа во впускной коллектор мы теряем до 10 - 15% по наполнению. а при предложенной схеме впуска, у нас нет снижения литровой мощности двигателя. А расслоение заряда в форкамере и основной камере сгорания обеспечивает стабильное сгорание при любой нагрузке на двигатель. [32,33,34,35].

Выводы по 4-му разделу

Проведенный анализ показал, что для эффективной работы двигателя на природном газе необходимо оценить оптимальные углы опережения зажигания, как с вопросов максимальной эффективности, так и с вопросов снижения токсичности отработавших газов. Для данных условий можно констатировать следующее, непосредственный впрыск природного газа вместе с повышением на 3,5 единицы степени сжатия до 14, привел к росту термических оксидов азота. В тоже время снижение степени сжатия не целесообразно из-за снижения температуры стенок разделенной камеры сгорания и, следовательно, повышению выбросов несгоревших углеводородов, а также риск появления сажи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе проведена анализ перспективности применения непосредственного впрыска природного газа в цилиндр двигателя с искровым зажиганием, выполнены все необходимые расчеты и проведено конструирование предложенного объекта. Получены основные выводы по работе:

1. Показана возможность и перспективность таких разработок.
2. Получено, что непосредственный впрыск КПГ и повышение степени сжатия позволили повысить мощность двигателя на 3 кВт (4%), при этом удельный эффективный расход топлива снизился на 10 г/кВт ч (8%).
3. Непосредственный впрыск природного газа вместе с повышением на 3,5 единицы степени сжатия до 14, привел к росту термических оксидов азота. В тоже время снижение степени сжатия не целесообразно из-за снижения температуры стенок разделенной камеры сгорания и, следовательно, повышению выбросов несгоревших углеводородов, а также риск появления сажи.

Выводы по 1-му разделу

Проведенный обзор вопросов непосредственного впрыска газа в цилиндр двигателя показал наличие уже выпускаемых, хоть и в рамках тестовых партий аналогов у ряда иностранных производителей. А также значительный интерес к данной проблеме у исследователей. Показана возможность и перспективность таких разработок.

Выводы по 2-му разделу

Тепловой расчет показал значительное влияние вида топлива на мощностные и экономические характеристики работы. Получено, что для эффективного использования природного газа требуется применение непосредственного впрыска природного газа. При этом необходимо повышать степень сжатия. В рассматриваемом варианте выбрана степень

сжатия 14, но для непосредственного впрыска природного газа в цилиндр двигателя возможно применение степени сжатия до 19. В текущей конструкции форкамерного газового двигателя повышение степени сжатия более 14 могло вызвать повышенное содержание пристеночных замороженных углеводородов. Для степеней сжатия более 14 рекомендовано применять не разделенную камеру сгорания.

Выводы по 3-му разделу

Применение непосредственного впрыска и повышение степени сжатия приводят к росту тепловой напряженности деталей кривошипно-шатунного механизма. Помимо этого, происходит рост нагрузок, как пиковых, так и средних, что требует внесение в конструкцию дополнительных мер по повышению прочности и надежности деталей КШМ. Рост нагрузок на отдельные шейки составляет до 20%.

Выводы по 4-му разделу

Проведенный анализ показал, что для эффективной работы двигателя на природном газе необходимо оценить оптимальные углы опережения зажигания, как с вопросов максимальной эффективности, так и с вопросов снижения токсичности отработавших газов. Для данных условий можно констатировать следующее, непосредственный впрыск природного газа вместе с повышением на 3,5 единицы степени сжатия до 14, привел к росту термических оксидов азота. В тоже время снижение степени сжатия не целесообразно из-за снижения температуры стенок разделенной камеры сгорания и, следовательно, повышению выбросов несгоревших углеводородов, а также риск появления сажи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вибе, И.И. Уточненный тепловой расчет двигателя / И.И. Вибе// М. Машиностроение, 1971. - с.282
2. ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Общие требования и правила составления. – Москва: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 47 с.
3. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей / А.И. Колчин, В.П. Демидов // Учебное пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Высшая школа 1980. - с.496.
4. Орлин А.С., Круглов М.Г. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей. – М.: «Машиностроение», 1983.
5. Смоленский, В.В. Автомобильные двигатели: курс лекций / В.В. Смоленский. – Тольятти: ТГУ, 2009. – 183 с.
6. Akmandor, I.S. Novel Thermodynamic Cycle / I.S. Akmandor, N. Ersöz// PTC, WO, 2004. 022919 A1. (March 18th 2004)
7. Alamia, A.; Magnusson, I.; Johnsson, F.; Thunman, H. Well-to-wheel analysis of bio-methane via gasification, in heavy duty engines within the transport sector of the European Union. Appl. Energy 2016, 170, 445–454.
8. Alfredas Rimkus, Tadas Vipartas, Donatas Kriauciunas, Jonas Matijošius and Tadas Ragauskas «The Effect of Intake Valve Timing on Spark-Ignition Engine Performances Fueled by Natural Gas at Low Power» / Energies 2022, 15, 398. doi.org/10.3390/en15020398
9. Ammenberg, J.; Anderberg, S.; Lönnqvist, T.; Grönkvist, S.; Sandberg, T. Biogas in the transport sector: Actor and policy analysis focusing on the demand side in the Stockholm region. Resour. Conserv. Recycl. 2018, 129, 70.
10. Baumeister, T. Mark's Standard Handbook for M. Engineer / T Baumeister // McGraw- Hill Inc., New York, 1966.

11. Beran, R. Entwicklung des H17/24G - Demerstenkoreanischen Gasmotor / R. Beran, T. Baufeld, H. Philipp, J. T. Kim, J. S.Kim // in: 11. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors. Graz. 2007
12. Beran, R., Baufeld, T., Philipp, H., Kim, J. T., Kim, J. S.: Entwicklung des H17/24G - Dem ersten koreanischen Gasmotor. in: 11. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors. Graz. 2007
13. Bonnevie-Svendsen, A. Double-Vibe-Model for heat release in lean burn gas engines with prechamber ignition /A. Bonnevie-Svendsen, K. Boulouchos, Ch. Lämmle, I. Vlakos // in: 6. Dessauer Gasmotoren-Konferenz. Dessau-Roßlau. 2009
14. Bonnevie-Svendsen, A., Boulouchos, K., Lämmle, Ch., Vlakos, I.: Double-Vibe-Model for heat release in lean burn gas engines with prechamber ignition. in: 6. Dessauer Gasmotoren-Konferenz. Dessau-Roßlau. 2009
15. Carbot-Rojas, D. A survey on modeling, biofuels, control and supervision systems applied in internal combustion engines /D.A. Carbot-Rojas , R.F. Escobar-Jiménez, J.F. Gómez-Aguilar, A.C. Téllez-Anguiano // Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Michoacán, CP 58120, Mexico 2017-PP.21-26
16. Cinzia Tornatore, Luca Marchitto, Maria Antonietta Costagliola and Gerardo Valentino « Experimental Comparative Study on Performance and Emissions of E85 Adopting Different Injection Approaches in a Turbocharged PFI SI Engine» / Energies 2019, 12, 1555; doi:10.3390/en12081555
17. Clarke, J. M. Thermodynamic Cycle Requirements for Very High Rotational Efficiencies / J. M. Clarke // J. Mech. Eng. Sci. 1974
18. Defu, Z., Qingping, Z. Investigation on the Combustion Characteristics of the Compression Ignition Divided Chamber Combustion System of the Natural Gas Engine. in: CIMAC Congress. Wien. 2007.

19. Duranti, A. *Ethnography of Speaking: Toward a Linguistics of praxis* / A. Duranti // *Linguistics: The Cambridge Survey*. – Cambridge, 1988. – PP. 210-228.
20. Fuller, D.D. *Theory and Practice of Lubrication for Engineers* / D.D. Fuller // John Wiley & Sons Inc., New York, 1966
21. Haywood, R.W. *A Critical Review of Theorems of Thermodynamics Availability* // R.W. Haywood / *J. Mech. Eng. Sci.* vol.16 MIT Press, 1970.
22. Heinz, C. Mittermayer, F., Sattelmayer, T.: *Investigation of a Novel Pre-Chamber-Concept for Lean Premixed Combustion in Large Bore Gas Motors*. Projektplakat. Technische Universität München. 2005
23. Huan,L.*Study of air fuel ratio on engine performance of direct injection hydrogen fueled engine* / L. Huan //Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Pahang, 26600 Pekan, Pahang, Malaysia 2016-PP.13-21
24. Jensen, S.S.; Winther, M.; Jørgensen, U.; Møller, H.B. *Scenarios for Use of Biogas for Heavy-Duty Vehicles in Denmark and Related GHG Emission Impacts*; Trafikdage: Aalborg, Denmark, 2017.
25. Lönnqvist, T.; Sanches-Pereira, A.; Sandberg, T. *Biogas potential for sustainable transport—a Swedish regional case*. *J. Clean. Prod.* 2015, 108, 1105–1114.
26. Lyng, K.A.; Brekke, A. *Environmental Life Cycle Assessment of Biogas as a Fuel for Transport Compared with Alternative Fuels*. *Energies* 2019, 12, 532.
27. Moteki K, Aoyama S, Ushijima K, Hiyoshi R, Takemura S, Fujimoto H, et al. *A study of a variable compression ratio system with amulti-linkmechanism*. SAE Paper No. 2003-01-0921.Warrendale PA, USA: SAE International; 2003
28. Osama H. Ghazal, Gabriel Borowski « *Use of Water Injection Technique to Improve the Combustion Efficiency of the Spark-Ignition Engine: A Model Study*»/ *Journal of Ecological Engineering* Vol. 20(2), 2019. - 226–233. – doi.org/10.12911/22998993/99689

29. Paolo Iodice, Amedeo Amoresano, Giuseppe Langella «A review on the effects of ethanol/gasoline fuel blends on NOX emissions in spark-ignition engines» / *Biofuel Research Journal* 32 (2021) 1465-1480. DOI: 10.18331/BRJ2021.8.4.2
30. Renegar, D.C. The Quasiturbine / D.C. Renegar // USA Patent No:6629065 September 12th 2003
31. Rory, R. D. The Ball Piston Engine: A New Concept in High Efficient Power Machines / R. D. Rory // Convergence Eng. Corporation.
32. Shaik A, Shenbaga Vinayaga Moorthi N, Rudramoorthy R. Variable compression ratio engine: A future power plant for automobiles—An overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IMEchE); Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2007;221(D9):1159-1168
33. Stephen, R. T. An Introduction to Combustion / R.T.Stephen // McGraw-Hill Series in Mech. Eng. 1996.
34. Thomasson, A. Co-Surge in Bi-Turbo Engines - Measurements, Analysis and Control / Thomasson A, Eriksson L. // *Control Engineering Practice*, (32) 2014, 113-122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.08.001>
Copyright: Elsevier
35. Verhelst, S. A critical review of experimental research on hydrogen fueled SI engines / S. Verhelst, R. Sierens, S. Verstraeten // SAE. - 2006. - №2006-01-0430.
36. Wonjae Choi, Han Ho Song «Composition-considered Woschni heat transfer correlation: Findings from the analysis of over-expected engine heat losses in a solid oxide fuel cell-internal combustion engine hybrid system» / *Energy* 203 (2020) 117851: doi.org/10.1016/j.energy.2020.117851
37. Woś P, Balawender K, Jakubowski M, Kuszewski H, Lejda K, Ustrzycki A. Design of Affordable Multi-Cylinder Variable Compression Ratio (VCR) Engine for Advanced Combustion Research Purposes. SAE Paper No. 2012-01-0414. Warrendale PA, USA: SAE International; 2012