

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 ВАЗ-11186 с модернизированным механизмом газораспределения

Студент

А.В. Макарчук

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, В.В. Смоленский

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

Тольятти 2022

АННОТАЦИЯ

Дипломная работа посвящена вопросу применения систем регулирования фазами ГРМ в двигателе легкового бензинового автомобиля.

Целью бакалаврской работы является проведение модернизации механизма газораспределения двигателя ВАЗ-11186, с целью улучшения условий процесса наполнения и процесса сгорания.

Поэтому в данном бакалаврской работе представлены результаты проектирования двигателя ВАЗ с модернизированными элементами газораспределительного механизма. Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка состоит из аннотации, введения, 5 разделов, заключения с основными результатами и выводами, содержит 36 рисунков, 14 таблиц, списка использованных источников (29 источников). Основной текст изложен на 69 страницах.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Перспективы и направления развития элементов механизма газораспределения. Бензиновые автомобильные двигатели с системой регулирования фазами газораспределительного механизма	5
1.1 Системы регулировки фаз газораспределения	5
1.2 Регулятор фаз газораспределения	10
2 Тепловой расчет проектируемого двигателя	26
3 Кинематический и динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя	42
3.1 Кинематический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя.....	42
3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя	44
4 Анализ влияния системы регулирования фазами ГРМ на рабочий процесс ДВС	50
4.1 Влияния системы регулирования фазами ГРМ на максимальную температуру и давление цикла	50
4.2 Влияния системы регулирования фазами ГРМ на эффективные показатели цикла.....	54
5 Расчет механизма газораспределения.....	57
5.1 Основные размеры проходных сечений в горловине и в клапане...	57
5.2 Основные размеры впускного кулачка.....	58
5.3 Профилирование безударного кулачка с плоским толкателем	58
5.4 Время сечения клапана.....	60
Заключение	64
Список используемых источников	67

ВВЕДЕНИЕ

Для того чтобы соответствовать будущим нормам по выбросам и для снижения расхода топлива бензиновых двигателей все чаще используются элементы для изменения времени управления клапаном. Одним из таких устройств является регулятор распределительного вала, который позволяет непрерывно изменять время управления распределительным валом в широком диапазоне углов. Таким образом, в двигателях ДОНС возможно изменение перекрытия клапанов и, следовательно, регулировка содержания остаточного газа в камере сгорания. Кроме того, особенно на холостом ходу и при полной нагрузке и при полной нагрузке фазы газораспределения могут быть отрегулированы для достижения наилучшего комфорта или наибольшего крутящего момента и мощности. Регулировки распределительного вала используются в транспортных средствах с середины 1980-х годов. С начала они использовались как легко управляемые 2-точечные регулировки, но сегодня все чаще используются как непрерывно регулируемые системы, работающие в контуре управления [5].

В двигателях ДОНС регуляторы распредвала обычно используются на впускном валу; типичные углы фазирования составляют от 40 до 60 градусов. Однако фазировка выхлопа, предпочтительная для двигателей с турбонаддувом, также доступна в стандартной комплектации, как и комбинация обоих вариантов степеней свободы для удовлетворения самых высоких требований к производительности и качеству выхлопных газов. В некоторых случаях фазовращатели распредвала используются в двигателях ДОНС для уменьшения дроссельной заслонки, т.е. снижение расхода за счет позднего закрытия впускных клапанов. Однако эта концепция не представляет ни повышения производительности, ни улучшения комфорта на холостом ходу, поскольку перекрытие клапана не изменяется [7].

1 Перспективы и направления развития элементов механизма газораспределения. Бензиновые автомобильные двигатели с системой регулирования фазами газораспределительного механизма

1.1 Системы регулировки фаз газораспределения

Непрерывная регулировка распределительного вала будет работает в замкнутом контуре управления и в настоящее время постоянно приводится в действие гидравлическим приводом [8].

В системе управления двигателем в зависимости от нагрузки и скорости вращения из картограммы считываются, требуемый заданный угол настройки времени управления. Это сравнимо с измеренным фактическим углом. Отклонения от угла оцениваются алгоритмом управления и приводят к изменению текущего тока на управляющем клапане. Таким образом, клапан направляет масло в масляную камеру регулятора распределительного вала, соответствующую желаемому направлению регулировки, в то время как масло может вытекать из другой камеры. В соответствии с заполнением масляных камер изменяется угловое положение распределительного вала по отношению к коленчатому валу. Датчики считывают сигналы на распределительном и коленчатом валу; по этим сигналам определяется фактический угол. Этот процесс управления протекает непрерывно с высокой частотой и, таким образом, приводит к хорошему последующему поведению в случае скачков заданного угла и к высокой угловой точности, когда необходимо поддерживать заданный угол. Система, как правило, работает от давления моторного масла; для спортивных двигателей также применяются системы с питанием под высоким давлением [9].

Для представления фазировки распредвала необходимы следующие компоненты [10]:

- Гидравлический регулировочный блок, закрепленный на приводной стороне распределительного вала. В этой детали угол регулировки

регулируется путем попеременного заполнения двух масляных камер. Низкая утечка и достаточные поверхности поршня обеспечивают высокую жесткость нагрузки. Блок регулировки выпускается в различных конструкциях: с линейным поршнем и наклонным зубчатым соединением, с вращающимся поршнем.

- Регулирующий клапан, установленный в головке блока цилиндров или в дополнительной детали головки, должны располагаться рядом с местом подачи масла к распределительному валу. Клапан управляется электрическим приводом, обычно с помощью сигнала с широтно-импульсной модуляцией, и управляет подачей и сливом масла в камеры регулятора. Высокий поток во время регулировки и точная управляемость для фиксации угла являются наиболее важными характеристиками клапана.
- Схема управления для непрерывной регулировки состоит из соответствующего программного обеспечения, выходного каскада драйвера в блоке управления двигателем, а также датчиков на коленчатом и распределительном валах. Здесь уже можно использовать существующие компоненты двигателя, однако необходимо модифицировать шестерню датчика распределительного вала.

Общая система непрерывной фазировки распредвала, представлена на рисунке 1.

Преобладали две конструкции блока гидравлической регулировки. Ниже мы кратко рассмотрим их принципиальное построение [11]. Регулятор распределительного вала с наклонным зубчатым соединением состоит из основных функциональных частей приводного колеса (соединенных с двигателем), регулировочный поршень и выходная ступица. Эти компоненты попарно соединяются друг с другом посредством винтовых шлицов, так что осевое смещение регулировочного поршня вызывает вращение ступицы привода к ведущему колесу. Данная система передачи крутящего момента является достаточно надежной.

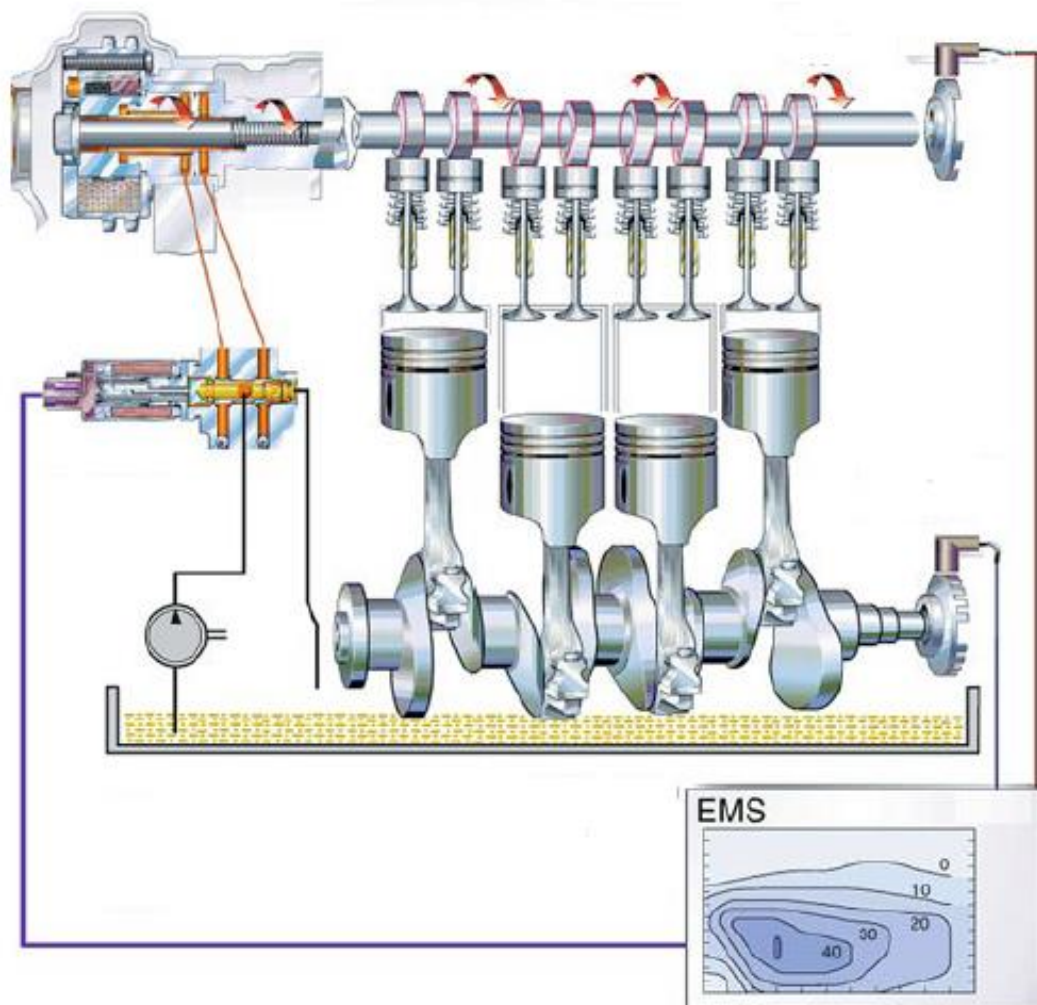


Рисунок 1 – Общая система непрерывной фазировки распредвала

На рисунке 2 изображена полностью герметичная система для использования в зубчатых ременных передачах.

При запуске двигателя изображенная пружина удерживает регулировочный поршень в его базовом или конечном положении. При работе в замкнутом цикле обе камеры заполнены маслом; хорошее уплотнение двух камер друг с другом приводит к высокой жесткости нагрузки. Необходимые ступенчатые реакции со стороны двигателя достигаются примерно при 1,5 бар давлении масла в двигателе [12].

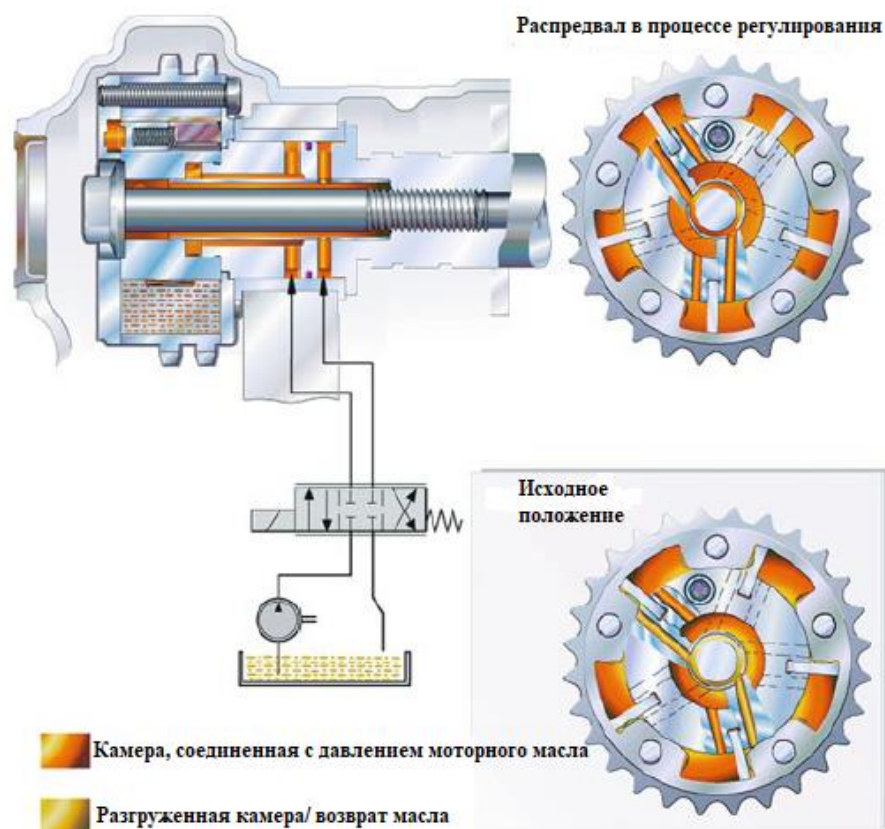


Рисунок 2 – Полностью герметичная система для использования в зубчатых ременных передачах

На рисунке 3 изображен регулятор поворотного двигателя или лопастной ячейки для цепных приводов.

Эта конструкция регулятора распределительного вала более компактна и экономична, чем конструкция с наклонным зубчатым соединением. Она состоит только из компонентов приводного колеса и выходной ступицы, то есть передача крутящего момента в процессе работы осуществляется за счет заполнения камер маслом. Во время запуска двигателя блокирующий элемент обеспечивает прочное механическое соединение привода. После заполнения регулятора распределительного вала масло используется для гидравлической разблокировки запорного элемента. Заблокированное конечное положение обычно используется для регулировки впускного распредвала в «поздний» момент. Регулирующий клапан состоит из гидравлической части и электромагнита. Гидравлическая задвижка расположена в отверстии с соединениями для подачи и возврата масла в

рабочие камеры фазовращателя распределителя. Ползунок будет нагружаться пружиной в направлении основного положения. При включении электромагнита задвижка смещается против силы пружины. При этом изменяется приток масла и, соответственно, слив двух камер; в так называемом положении регулирования все масляные пути в значительной степени закрыты. Это обеспечивает жесткое натяжение регулировочного поршня в регуляторе распределителя. В соответствии с условиями конкретного случая использования управляющий клапан интегрируется непосредственно в головку блока цилиндров или монтируется через промежуточный корпус [13].

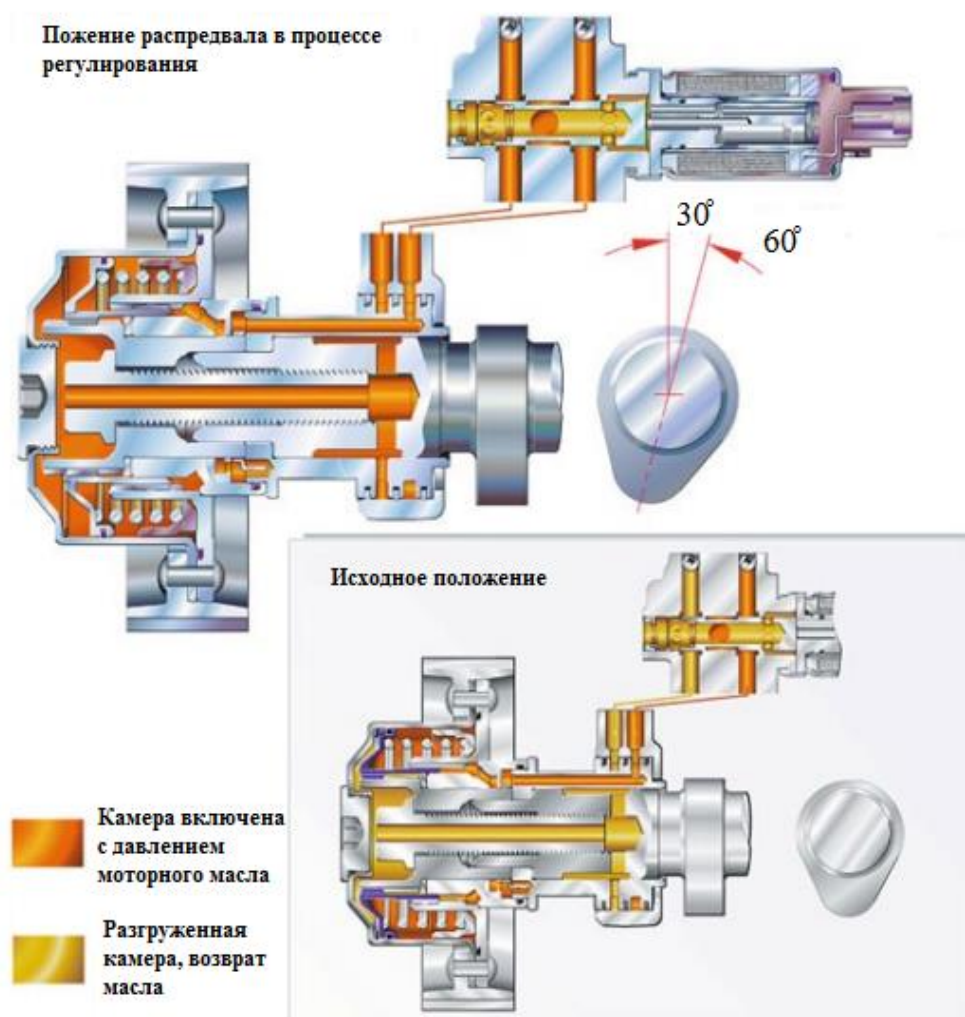


Рисунок 3 – Регулятор поворотного двигателя или лопастной ячейки для цепных приводов

1.2 Регулятор фаз газораспределения

Основными типами приводов являются системы, которые используют механический или гидравлический принцип работы. Чаще всего используются решения, в которых, подобно регулятору устанавливаемого в Alfa Romeo, где угловой поворот достигается за счет осевого перемещения поршня. В серийных двигателях можно найти только три основных принципа работы. К первой группе относятся системы, аналогичные системам Alfa Romeo и имеют механический принцип работы. Второе решение – гидравлически управляемый регулятор цепи, где желаемое вращение распределительного вала достигается вращением распределительного вала путем смещения цепи. К более современной группе относятся системы с поворотными двигателями с гидравлическим приводом распредвала [14].

Все регуляторы распределительного вала на серийных двигателях расположены на приводе распределительного вала. В ход клапана или время открытия клапана регуляторы не вмешиваются. Места действия регулировки хода и времени открытия клапана обычно находятся между кулачком и клапаном. Это позволяет комбинировать регуляторы распределительного вала с этими системами. В качестве примера системы для изменения продолжительности хода или открытия клапана можно упомянуть так называемую систему «VTEC», которую использует компания Honda. Эта система позволяет изменять геометрию передачи между кулачком и клапаном. Эти системы используются на многих различных двигателях

1.2.1 Системы с пошаговым подъемом клапана или изменением продолжительности открытия

Компания Honda впервые реализовала крупномасштабные системы управления переменными клапанами на бензиновых двигателях с так называемой «системой VTEC», которые вмешиваются в ход клапана или время открытия [15]. Принцип основан на решении качающегося рычага, в котором посредством перемещение небольшого поршня с гидравлическим

приводом внутри поворотных рычагов может принимать различные состояния соединения и, таким образом, переключаться взад и вперед между различными контурами кулачка. На рисунке 4 система показана со стороны применения на четырехклапанном двигателе с двумя распредвалами.

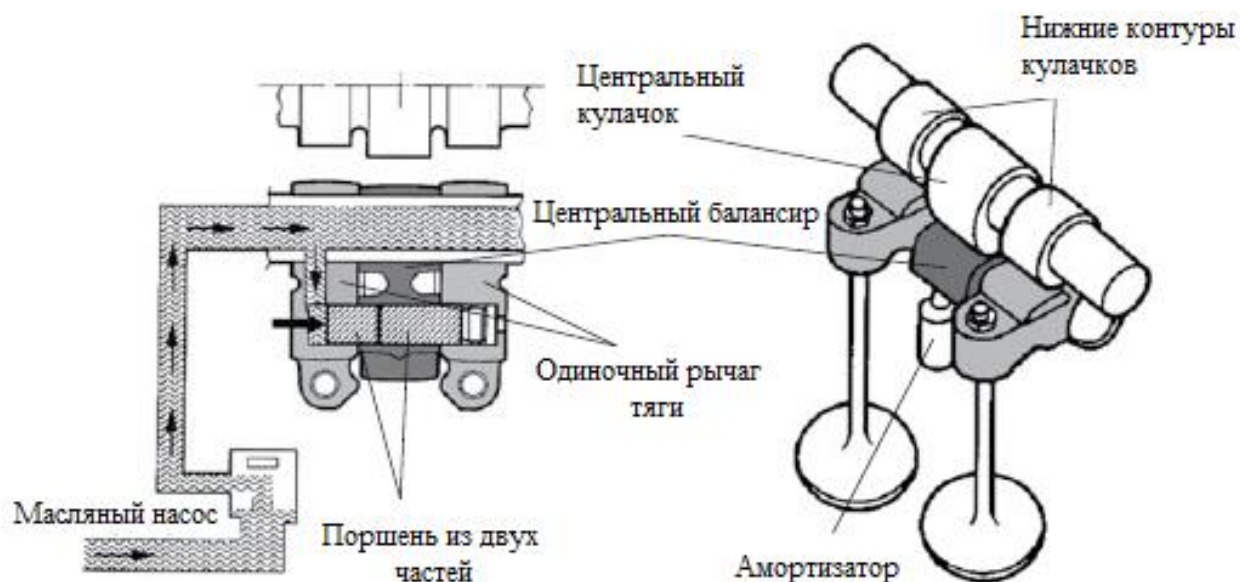


Рисунок 4 – Система VTEC компании Honda

В правой части изображения показано изометрическое изображение расположения клапана и распределительного вала. Распределительный вал имеет центральный кулачок на каждый цилиндр с большей геометрией хода клапана и продолжительности открытия. По бокам от каждого из них находится профиль кулачка с меньшими контурами. Внутри узла коромысла давление масла используется для приведения в действие двухкомпонентного рычага. Это делается в зависимости от частоты вращения двигателя, давления во впускном коллекторе, скорости автомобиля или температуры охлаждающей жидкости. Подача масла для переключения контура кулачка осуществляется через отверстия и каналы в оси подшипника, на которых качается узел коромысла. При работе в нижнем диапазоне оборотов меньшие контуры кулачка воздействуют на скользящие датчики рычагов качения. Разделение поворотных рычагов осуществляется путем точной настройки

геометрии двухкомпонентного регулируемого поршня. В этом случае между центральным рычагом качания и отдельными рычагами качания, расположенными сбоку, устанавливается относительный ход. При этом центральный рычаг качания опирается на пружинный элемент. Пространство для этого должно быть создано в головке блока цилиндров. Концепция головки блока цилиндров с более чем четырьмя клапанами является особой проблемой для разработчиков. В соединенном состоянии (рисунок 4) центральный кулачок воздействует на узел рычага качания, и все компоненты работают одновременно без относительного хода. Для сброса двухкомпонентного регулируемого поршня используется небольшая пружина. Регулируемое давление масла устанавливается без дополнительного масляного насоса из контура моторного масла [16].

«Система VTEC» реализована на стороне впускного и выпускного клапанов. Для этих и подобных решений Honda подала различные патентные заявки. Только количество различных изобретателей этих патентных заявок позволяет предположить огромные затраты на разработку. На серийных двигателях реализованы четырехклапанные решения с одним или двумя распределительными валами. Текущий модельный ряд Honda имеет различные двигатели с "системой VTEC" почти в каждом автомобиле. При этом реализуется до трех контуров кулачков различного действия. Также Mitsubishi реализовала систему, аналогичную по принципу действия, на четырех- и шестицилиндровых двигателях. В этом решении используются три разных контура кулачка, причем контур кулачка состоит из чистого базового контура, что обеспечивает остановку клапана. На обоих двигателях в этом случае будет два и три цилиндра соответственно отключены с помощью привода клапана. Для этого Mitsubishi требуется небольшой масляный насос, размещенный в головке блока цилиндров. Фирма Daimler последовательно использовала переменное управление клапаном для отключения цилиндров на своих двигателях V8 и V12. Используемое решение основано на коромысле в сборе, которое используется в концепции

с тремя клапанами с центральным распределительным валом. На рисунке 5 показан узел коромысла этой системы без распредвала. Принцип работы аналогичен описанному решению Honda. Внутри узла рычага опрокидывания ролика двухсекционный регулируемый поршень электрически или гидравлически перемещается против пружинного усилия. В зависимости от состояния соединения между ходами клапана переключаются взад и вперед по различным контурам кулачков, только один ход клапана является нулевым ходом, и, таким образом, клапаны отключаются. В системе, используемой здесь, основной целью является уменьшение расхода топлива при работе с частичной нагрузкой за счет отключения цилиндра. Это реализуемо на двигателях с высоким объемом хода с большим количеством цилиндров. Экономия потребления около 15% достигается с помощью этих мер по сравнению с обычными двигателями [17].

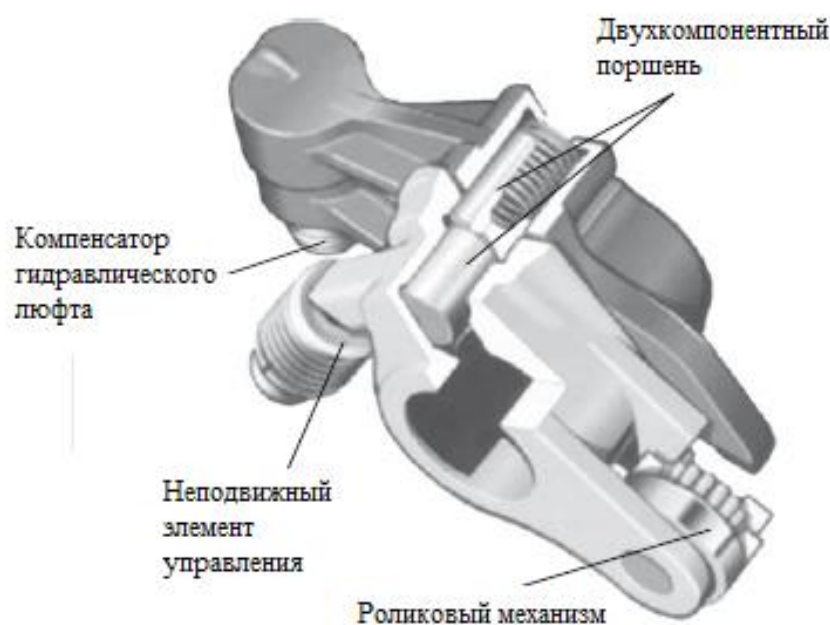


Рисунок 5 – Узел роликового коромысла для перекрытия клапанов от Daimler

Подобно Mitsubishi и Honda, компания Toyota также последовательно реализовала решения с переключением контура клапана для стороны впускного и выпускного клапанов. Система, используемая на Toyota также

включает в себя электрогидравлическое перемещение регулируемого поршня в узле качающегося рычага против силы пружины (рисунок 6) [18].

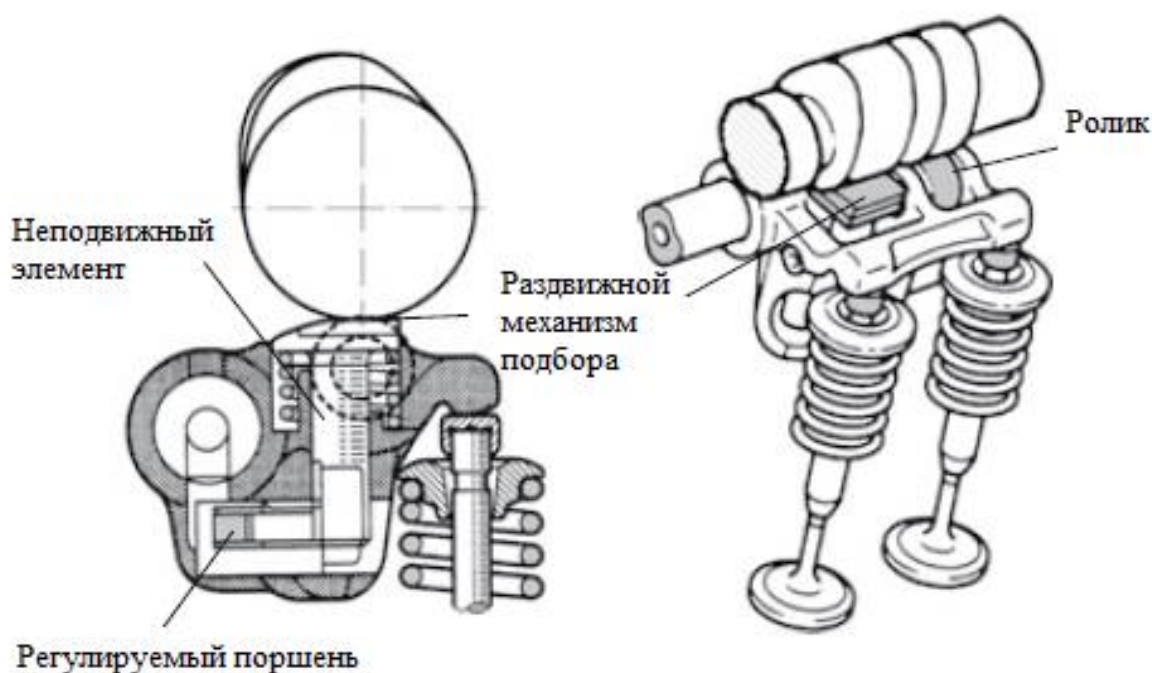


Рисунок 6 – Управление клапанами Toyota VVTL-i для различных подъёмов клапанов

Интересно, что решение заключается в том, что используется узел качающегося рычага, в котором для кулачка на низких оборотах используется ролик в качестве датчика, а на высоких оборотах – скользящий датчик. На высоких скоростях коромысло поворачивается через скользящий фиксатор под элементом "LostMotion", который обеспечивает сцепление. Стопор удерживается на месте с помощью давления масла и перемещается к оси подшипника качающегося рычага в сборе с помощью пружинного усилия на низких оборотах. Сила пружины элемента может быть небольшой, потому что движущиеся массы элемента также невелики. В дополнение к этому решению компания Toyota дополнительно использует бесступенчатый регулятор распределительного вала на стороне впускного клапана. Эта комбинация позволяет увеличить изменения кривых подъема клапанов по сравнению с двигателем с фиксированным моментом зажигания [19].

1.2.2 Обзор разработки полностью регулируемых механизмов управления механическими клапанами

Рассмотрим системы, которые обеспечивают полностью переменную кривую подъема клапана. Это относится к системам с механическим, гидравлическим и электромеханическим принципом действия.

Перспективы регулируемого клапанного механизма

С 1980-х годов проводятся важные разработки по улучшению потребления, увеличению крутящего момента на низких и более высоких оборотах и сокращению необработанных выбросов бензиновых двигателей в клапанном механизме [20]. Первые системы переключения контура клапана были введены в 1983 году на мотоцикле, а затем на автомобильных двигателях, для реализации более высокой производительности. При этом здесь применены клапана с коротким временем управления с ходом около 4 мм и с очень длительным временем управления и ходом клапана около 10 мм, и, таким образом устраняя конфликт между качеством, ускорением и высокой производительностью. Существенного улучшения расхода топлива не удавалось достичь до тех пор, пока с введением регуляторов на впускном распределительном валу не удавалось представить эффективного управления остаточным газом путем управления площадью перекрытия при частичной нагрузке бензиновых двигателей. Регулирование времени закрытия впускного клапана и значительное улучшение крутящего момента могут быть достигнуты на низких и высоких оборотах. Регулировка распределительного вала на выпускном распределительном валу позволяет целенаправленно нагревать систему катализатора в режиме прогрева за счет раннего открытия выпускного клапана. Достижимое улучшение расхода топлива заключалось в продолжении дросселирования в диапазоне около 4 % при регулировке распределительного вала на впускном и выпускном распредвале с углом регулировки 60 градусов. Дальнейшее улучшение расхода топлива от 6 до 8 % было достигнуто благодаря внедрению бездроссельного режима работы управления бензиновым двигателем с

регулированием в зависимости от нагрузки высоты сечения открытия клапана и закрытия впускных клапанов. Регулирование сечения открытия в зависимости от нагрузки осуществляется с помощью переменного времени открытия в электромеханических и сервогидравлических приводах клапанов, то есть впускной клапан всегда полностью открывается и регулирует длину времени открытия нагрузки. С другой стороны, для полностью переменных механических приводов клапанов сечение открытия определяется высотой хода клапана, а в некоторых системах – высотой хода клапана, где продолжительность времени открытия регулируется. Уменьшение хода клапана приводит к увеличению скорости газа в зазоре клапана, при наименьших ходах клапана достигается сверхзвуковая скорость на седле клапана, и поэтому капли топлива являются мелкодисперсными. Улучшенная таким образом подготовка смесей снижает расход топлива и выбросы свежего заряда. В качестве альтернативы бездрессельное управление нагрузкой с непосредственным впрыском была доведена до серийного уровня. Непосредственный впрыск открывает новые возможности благодаря бережливости переключение режимов работы бензинового двигателя, что является прямым преимуществом потребления. Однако доочистка выхлопных газов значительно сложнее и дороже. При использовании катализаторов хранения NO_x необходимо отказаться от некоторых улучшений расхода, и можно использовать только топливо с низким содержанием серы. Это ограничивает рыночные зоны. В 2008 году инженеры-разработчики, с одной стороны, сталкиваются с ситуацией, когда они могут выбрать из нескольких систем для выполнения обязательств по CO_2 , с другой стороны, они должны выбрать технологию, которая имеет как можно больший потенциал на будущее. При принятии решений будут учитываться функциональные преимущества, общая стоимость, включая стоимость выхлопных систем, датчиков и блоков управления, а также инвестиционные затраты, требования к упаковке и увеличение веса. Современные электромеханические клапанные редукторы не могут

превзойти по своей изменчивости, однако скорость двигателя ограничена примерно 6000 л/мин, потребление энергии на низких оборотах относительно велико, не следует пренебрегать увеличением размеров двигателя и увеличением его массы. Отключение отдельных клапанов имеет самый высокий потенциал в будущем. Для полностью переменных механических приводов клапанов предлагается множество решений, которые отличаются важными функциями и затрудняют разработчику двигателя выбор системы с высоким потенциалом в будущем. На рисунке 38 для механических регулируемых клапанов перечислены патентные заявки систем, которые вставляют передающее звено между кулачком и клапаном. Системы этой группы управляются системами контура или отключения клапанов, а также описаны полностью переменные системы. В частности, после серийного запуска системы Valvetronic активность в области переменных систем резко возросла [21].

Новые разработки позволяют отключать отдельные клапаны или группы цилиндров, или по-разному регулировать высоту подъема и время открытия клапана. С фазировкой подъема клапана образуется внутренний поток цилиндра с ярко выраженным завихрением. Скорости потока в вихре могут быть обусловлены ходом клапана и разницей в ходе клапана. Два впускных клапана могут быть отрегулированы в соответствии с частотой вращения двигателя и нагрузкой [22].

Но преимущества при наполнении не должны быть нивелированы из-за потерь энергии при регулировке и удержании хода клапана. Даже если будут использованы все возможности потребления приводов переменного клапана, с сегодняшней точки зрения вы, вероятно, не достигнете потенциала потребления прямого впрыска с помощью методов горения с реактивным управлением в бензиновом двигателе. Полностью механический привод клапана «рассчитывает» на преимущества крутящего момента, улучшения выбросов при запуске и прогреве, улучшение приема газа и повышение качества холостого хода, а также улучшение наполнения при работе $\lambda = 1$. За

сочетанием прямого впрыска и полностью переменного привода клапана стоит будущее. Переменная сила закручивания вихря за счет фазировки хода клапана, а управление остаточным газом за счет второго переменного открытия впускных клапанов при одновременном открытии выпускных клапанов приводит к идеям об использовании полностью переменных приводов клапанов и в дизельном двигателе [23].

Полностью регулируемое управление клапаном – предназначено для гибкого управления газообменом во всем диапазоне нагрузки и скорости, особенно при увеличивающейся интенсивности потока из-за зарядки.

Цели этого управления состоят в максимальном свежем заряде при полной нагрузке во всем диапазоне скоростей, в оптимальном соотношении между свежим зарядом и выхлопным газом в цилиндре при частичной нагрузке и различных скоростях, определяемых совокупным образованием смеси и сгоранием, с минимизацией потерь свежего заряда в результате изменения заряда при каждой нагрузке и скорости.

В рассматриваемых здесь четырехтактных поршневых двигателях управление газообменом осуществляется посредством управления впускными и выпускными клапанами в отношении их начала открытия, продолжительности открытия и хода.

Управление ходом впускного и выпускного клапана может происходить посредством механических, электромагнитных, гидравлических сил или их частичной комбинации. Некоторые примеры особенно поучительны с учетом достигнутых результатов [24].

В системе VARIOCAM (Porsche) [25] на рисунок 7 используется механическая концепция для изменения начала и продолжительности открытия, а также подъема впускного клапана в определенных шагах. В принципе, для этого используются два разных профиля кулачков, которые могут изменять их контакт с толкателями ковша: для этого активируется поперечный болт, который либо позволяет перемещать силу больших

боковых кулачков со штоком клапана через ковш. толкатель или может прервать его, как схематично показано на рисунок 8.

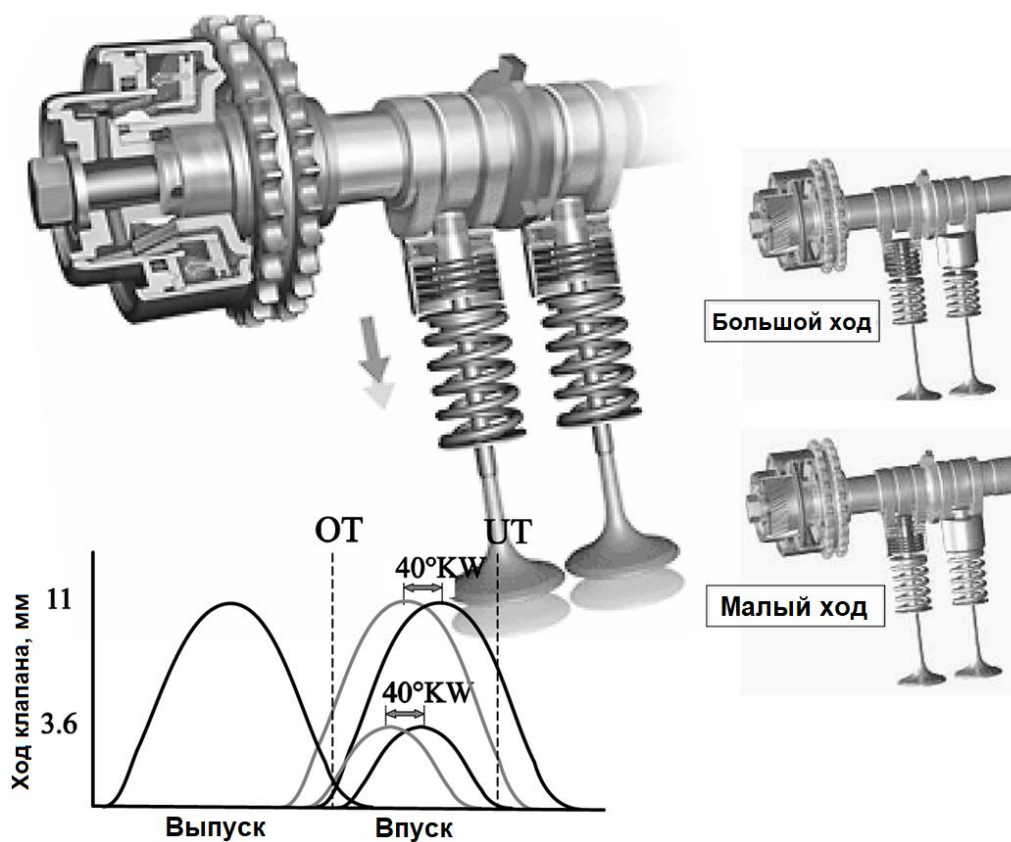


Рисунок 7 – Variocam-Plus (Porsche) – механическое управление подъемом и углом клапана

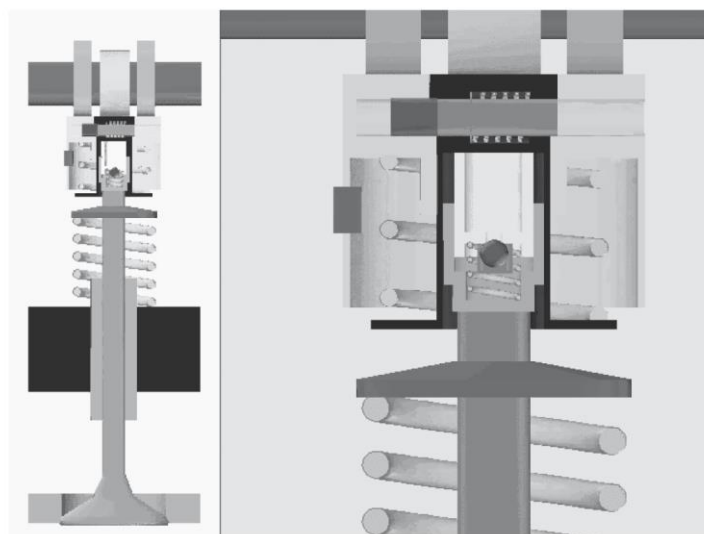


Рисунок 8 – Variocam-Plus (Porsche) – Изменение контакта кулачка с клапаном

Во втором случае имеется прямой контакт между штоком клапана и центральным меньшим кулачком, закрепленным пружиной клапана. При этом толкатель клапана движется по своей относительной траектории, но без контакта со штоком клапана. Результаты с точки зрения экономии топлива и кривой крутящего момента весьма убедительны.

Аналогичное механическое решение – VVTLi (Toyota) [26] используется для лучшей адаптации угла открытия клапана к переменной скорости. Этот принцип работы показан на рисунке 9.

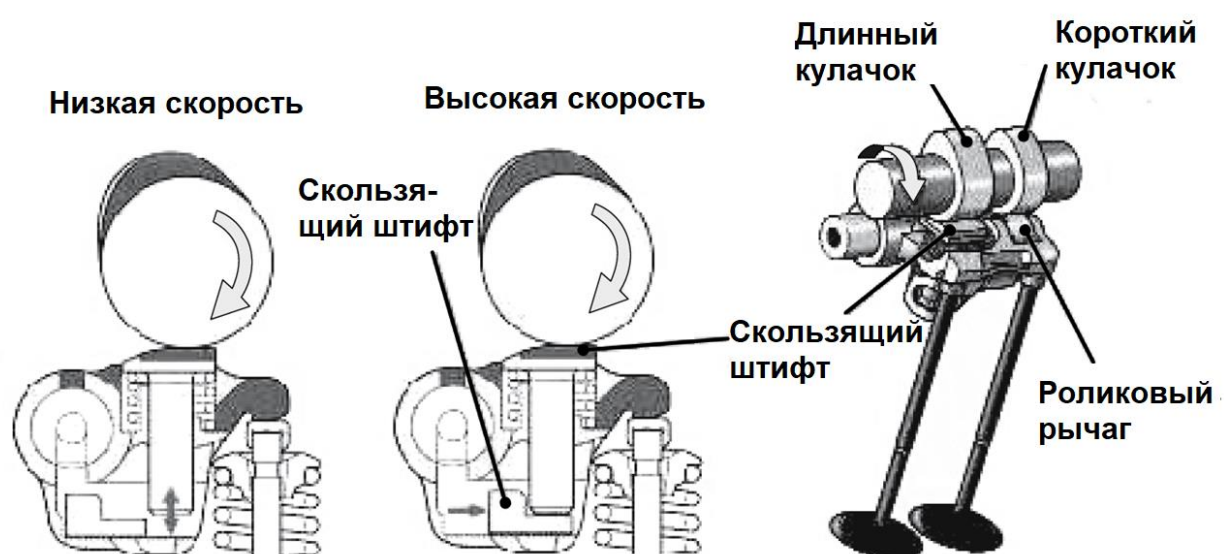


Рисунок 9 – Механическое управление подъемом и углом наклона клапана.

Система VALVETRONIC (BMW) [27] объединяет механические и электрические силы для управления впускными клапанами. Эта концепция показана на рисунке 10.

Между впускным клапаном и соответствующим кулачком новый тип коромысла – как элемент передачи мощности – имеет особую форму; при его вращении с помощью электродвигателя геометрический ход изменяется в контакте между кулачком и коромыслом, а также между коромыслом и штоком клапана, в результате чего передаточное число рычагов становится переменным. Это означает, что ход и время открытия изменяются. Благодаря возможностям настройки электродвигателя это изменение может действовать

непрерывно, а не за несколько шагов. Результат – как и в случае с VARIOCAM – очень убедительный: снижение удельного расхода топлива до 15% с одновременным увеличением крутящего момента при полной нагрузке. Снижение удельного расхода топлива можно объяснить уменьшением подъема впускного клапана при частичной нагрузке. Иногда в качестве причины упоминается уменьшение массы всасываемого свежего заряда, но это не соответствует реальному процессу: переход от полной нагрузки к частичной происходит из-за уменьшения подачи тепла, что в бензиновых двигателях с впрыском в коллектор – как в этом случае – и топливо, и воздушная масса также должны быть уменьшены, чтобы получить необходимое воздушно-топливное соотношение в гомогенной смеси. Масса поступившего воздуха регулируется с помощью системы VALVETRONIC без использования дроссельной заслонки во впускном трубопроводе, а за счет подъема клапана и изменения сопротивления потоку.

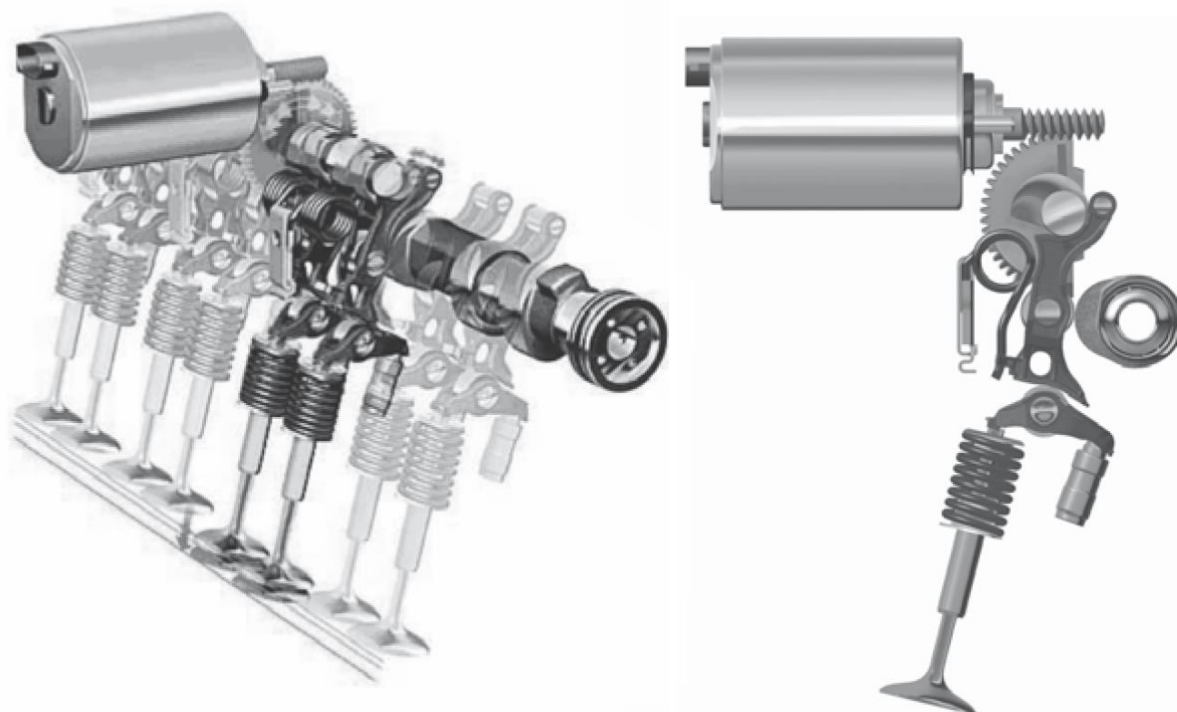


Рисунок 10 – BMW Valvetronic – механическое управление подъемом и углом клапана с помощью электрического управления

Давление в цилиндре во время фазы впуска и, следовательно, масса всасываемого воздуха не отличается от давления в двигателе с дроссельной заслонкой. Однако дросселирование смеси непосредственно на входе в камеру сгорания с помощью клапана улучшения потока создает более высокую плотность смеси в пределах определенной стратификации заряда, которая также находится вблизи свечи зажигания. Как более высокая скорость пламени, так и более короткие пути сгорания в такой смеси увеличивают эффективность сгорания и, таким образом, в целом – из-за тенденции к изохорной подаче тепла – что приводит к росту теплового КПД цикла.

Аналогичное решение – MV2T (Mahle) [28]: движение кулачка передается на коромысло через три вставленных друг в друга элемента. Их положение определяется электродвигателем и в основном влияет на наклон коромысла, который находится в прямом контакте с кулачком. В результате можно изменить как ход, так и продолжительность открытия клапана, как это видно на верхней диаграмме на рисунке 11а. Начало открытия клапана также можно изменить с помощью дополнительной регулировки распределительного вала.

Однако в принципе непрерывное, полностью независимое от скорости изменение начала открытия и продолжительности открытия клапана возможно только без кулачков. Первое возможное решение – это использование электромагнитных сил, в результате чего кривую тока – независимо от угла или скорости распределительного вала – можно свободно спроектировать, как показано на рисунке 11б в качестве примера.

В электромагните якорь соединен с линиями магнитной цепи в обоих направлениях движения – через соответствующие катушки или магнитные цепи; обратная сила обеспечивается предварительно натянутыми пружинами. Механизм может быть выполнен в обоих направлениях – при открытии и закрытии – с помощью кривых максимального и удерживаемого тока. При существующем уровне техники управление соленоидами может быть

реализовано таким компактным образом, что и впускные, и выпускные клапаны в двигателях легковых автомобилей с четырьмя клапанами на цилиндр могут управляться таким образом, как уже было продемонстрировано на прототипах транспортных средств. Такое решение показано на рисунке 12.

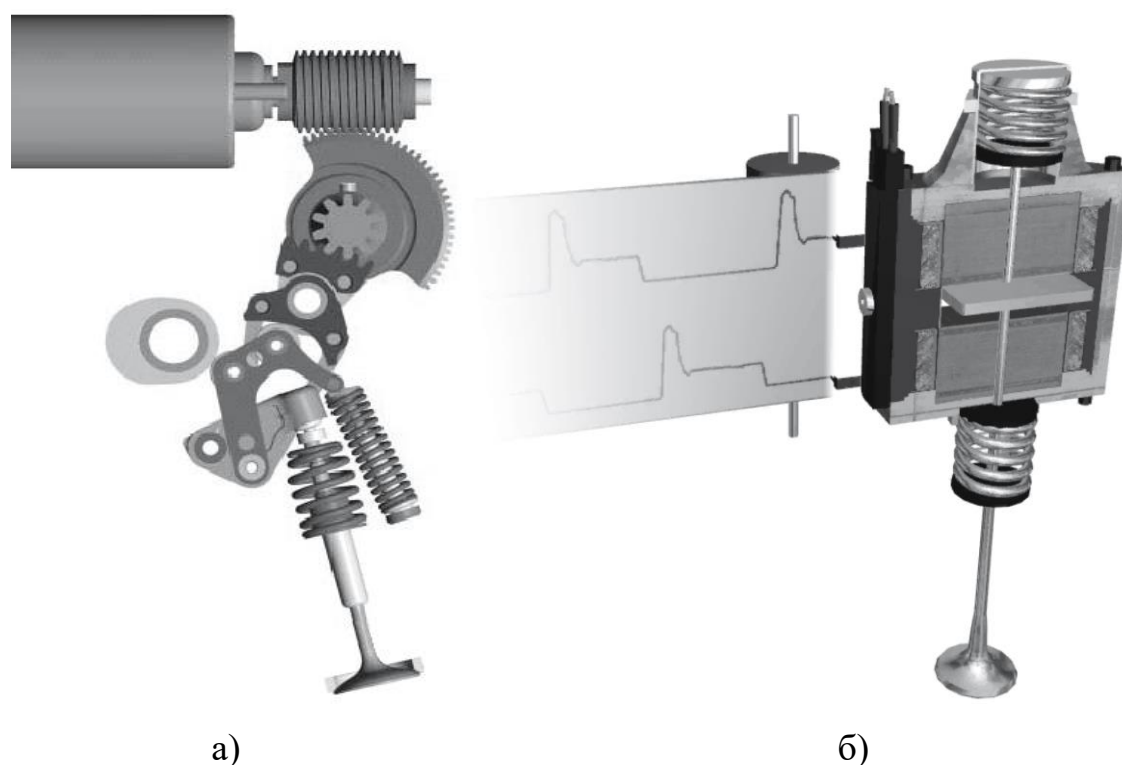


Рисунок 11 – Управление электромагнитным клапаном: (а) MV2T (Mahle) - механическое управление подъемом и углом клапана с электрическим управлением; (б) управление подъемом и углом клапана с использованием электромагнитных сил

Несмотря на то, что временные интервалы могут быть свободно спроектированы и не зависят от частоты вращения двигателя, магнитные регуляторы имеют недостаток, как правило, постоянный ход. Благодаря специальным мерам – например, промежуточной блокировке – возможно создание подъемных ступеней, однако полная вариативность вряд ли может быть достигнута.



Рисунок 12 – Управление электромагнитным клапаном

О преимуществах дросселирования свежего заряда с помощью подъема клапана уже упоминалось. Подобные преимущества возникают при регулировании количества остаточного газа в цилиндре в результате изменения хода выпускных клапанов. Опять же – если может быть открыт только один из двух электромагнитных впускных или выпускных клапанов, что вряд ли возможно с помощью механических решений, то можно получить очень похожие эффекты дросселирования. Другой проблемой управления впускным и выпускным клапанами с помощью электромагнитных сил является обеспечение относительно большого количества необходимой электроэнергии [29].

Снижение требуемых электромагнитных сил, с одной стороны, и создание variability хода, с другой стороны, возможно благодаря комбинированному электромагнитно-гидравлическому решению. Однако в этом случае исходное усилие для движения клапана также гарантируется посредством кулачков, что, в свою очередь, создает зависимость системы от скорости. В этом случае мощность передается от кулачка к толкателю ковша

клапана через столб жидкости – гидравлического масла. Жидкостный трубопровод снабжен соленоидным клапаном, который может активировать возвратный трубопровод для жидкости. Профиль кулачка разработан для максимальной комбинации хода и продолжительности открытия – для более коротких ходов и продолжительности открытия, но также и для изменения начала открытия, определенные сегменты кулачка для регулирования мощности могут включаться и выключаться. Если проблемы герметичности могут быть решены – при требуемом давлении в столбе жидкости – это решение обеспечивает компактную конструкцию и, благодаря электромагниту, хорошие возможности для изменения кривой клапана.

Выводы по первому разделу

Проведенный обзор современного состояния двигателей с регулируемыми механизмами газораспределения, показал, что практически все ведущие автопроизводители имеют серийные образцы систем регулирования хода и времени открытия клапанов.

Основными типами приводов являются системы, которые используют механический или гидравлический принцип работы.

Изменение фаз газораспределения и параметров хода клапана позволяет значительно улучшить характеристики работы двигателя за счет улучшения наполнения на нагрузочных режимах и снижение потерь топлива на режимах дросселирования и малых нагрузок. Причем применение систему регулирования фазами газораспределение невозможно без применения системы перепуска отработавших газов (EGR), так как на режимах малых нагрузок необходимо обеспечить значительную долю в рабочей смеси остаточных газов.

2 Тепловой расчет проектируемого двигателя

Основные характеристики двигателя на базе серийного двигателя ВАЗ-11186 с регулятором фаз газораспределения, принятого для расчета приведены в таблице 1, а общий вид его конструкции на рисунке 13.

Таблица 1 – Технические характеристики двигателя

Тип	4-тактный с искровым зажиганием
Число и расположение цилиндров	4 – рядно
Порядок работы цилиндров	1-3-4-2
Диаметр цилиндров, мм	82
Ход поршня, мм	75,6
Длина шатуна, мм	132,3
Рабочий объем, л	1,596
Степень сжатия	10,5
Номинальная частота вращения коленчатого вала, об/мин	5400
Максимальный частота вращения коленчатого вала, об/мин	6000
Минимальная частота вращения коленчатого вала при режиме холостого хода, об/мин	840
Номинальная мощность при частоте вращения коленчатого вала 5400 об/мин, кВт	87
Максимальный крутящий момент, Нм при 3800 мин ⁻¹	140

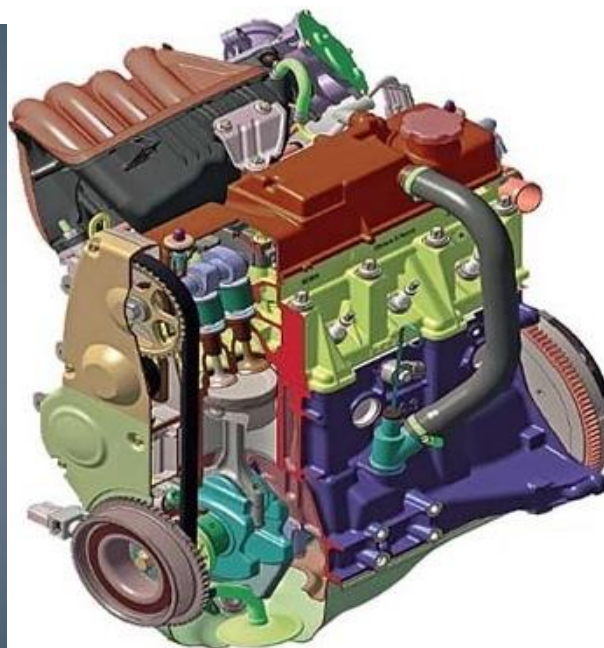


Рисунок 13 – Общий вид двигателя ВАЗ-11186, взятого как базовый для расчета

Тепловой расчет производится по методике И.И. Вибе, для базового двигателя и двигателя с регулятором фаз ГРМ, с учетом рекомендаций по расчету основных параметров, предложенных в учебниках [1,2,3,4,5,6,7]. 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 стехиометрическим составом $+0,02$ единицы в связи с требованиями к токсичности отработавших газов, то результаты расчета параметров рабочего тела проводятся (таблица 2) для одного стехиометрического состава смеси, без учета частоты вращения.

Таблица 2 – 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_{CO_2} , кмоль CO_2 /кг топл.	M_{H_2O} , кмоль H_2O /кг топл.	M_{N_2} , кмоль N_2 /кг топл.	M_2 , кмоль пр.сг./кг топл.	μ_0
0,51683	14,957	0,52552	0,07125	0,0725	0,409327	0,553077	1,052432

Анализ результатов расчета процесса впуска приведен в таблице 3. Из таблицы 3 видно, что увеличение хода клапана и время его открытия позволили улучшить наполнение цилиндров, примерно на 15%, что также снизило количество остаточных газов почти на 1%.

Таблица 3 – Результаты расчета процесса впуска

n , 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
Базовый двигатель ВАЗ-11186									
840	0,0001	0,099898	1083	0,103784	0,033487	332,4965	0,84774	0,9126	7,97407
2000	0,0006	0,0994218	1095	0,105111	0,033113	330,6046	0,867697	0,9117	18,9859
3800	0,0021	0,0979127	1122	0,109316	0,032782	328,1042	0,898764	0,9188	36,0732
5400	0,0042	0,095785	1145	0,115245	0,034211	327,1988	0,898791	0,9366	51,2618
6000	0,005204	0,0947963	1158	0,118	0,035026	327,2476	0,897749	0,9465	56,9576
Двигатель с регулятором фаз ГРМ									
840	0,533E-01	0,0999547	1115	0,103784	0,026725	322,8492	1,074725	0,8938	7,97407
2000	0,0003	0,099743	1115	0,105111	0,027053	321,8915	1,075297	0,8931	18,9859
3800	0,0009	0,0990723	1125	0,109316	0,028026	321,0388	1,06989	0,8967	36,0732
5400	0,0019	0,0981267	1145	0,115245	0,029341	320,9705	1,058549	0,9052	51,2618
6000	0,002313	0,0976872	1150	0,118	0,030078	321,0823	1,052688	0,9096	56,9576

Результата расчета параметров в конце сжатия и начала воспламенения показаны в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчета параметров в конце сжатия и начала воспламенения

n , мин ⁻¹	μ	n_l	Угол опережения зажигания, ° ПКВ	V_y , м ³ /кг	P_y , МПа	T_y , К
Базовый двигатель ВАЗ-11186						
840	1,0507334	1,3756	20	0,118725	1,651834	715,2652
2000	1,0507517	1,3758	24	0,132271	1,415601	682,9113
3800	1,050768	1,376	28	0,149301	1,193211	649,7407
5400	1,0507	1,3761	32	0,170678	0,997136	620,7138
6000	1,050658	1,376098	35	0,187841	0,877556	601,208
Двигатель с регулятором фаз ГРМ						
840	1,051067	1,37652	20	0,116286	1,655909	695,8305
2000	1,051051	1,3766	24	0,129563	1,422425	665,9665
3800	1,051003	1,3767	28	0,145718	1,208857	636,5468
5400	1,050938	1,3767	32	0,164953	1,022557	609,5207
6000	1,0509	1,37669	34	0,175472	0,941169	596,784

Анализ результатов коэффициентов термодинамического расчета (таблица 5) показал повышение коэффициента использования теплоты в связи со снижением тепловых потерь в стенку цилиндра и систему охлаждения, связанных с сокращением продолжительности сгорания при увеличении наполнения вследствие большего времени сечения впускных клапанов.

Таблица 5 – Коэффициенты термодинамического расчета

n , мин ⁻¹	ξ	q_z , Дж/кг	E_z , МПа	φ_z , град, пкв.	m
Базовый двигатель ВАЗ-11186					
840	0,86	2290,9	52,71806	50	3
2000	0,88	2345,1	54,013665	56	3
3800	0,9	2399,1	54,834941	62	3
5400	0,9	2395,8	53,717477	68	3
6000	0,91	2420,518	53,703371	75	3
Двигатель с регулятором фаз ГРМ					
840	0,93	2493,714	58,588191	47	3
2000	0,93	2492,9	58,619394	53	3
3800	0,93	2490,6	58,324599	59	3
5400	0,93	2487,4	57,706365	65	3
6000	0,93	2485,598	57,386846	71	3

Анализ результатов расчета процесса расширения и выпуска (таблица б) показал, что с применением системы регулирования фазами ГРМ происходит повышение температуры конца сгорания, что приводит к улучшению условий работы трехкомпонентного каталитического нейтрализатора, так как это позволяет быстрее прогреть каталитический нейтрализатор до окна эффективной работы.

Таблица 6 – Результаты расчета процесса расширения и выпуска

n , мин ⁻¹	Vz' , м ³	Tz' , К	Pz' , МПа	δ	n_2	P_b , МПа	T_b , К	T_r , К	Δ , %
Базовый двигатель ВАЗ-11186									
840	0,157	2719,15	4,987952	5,811068	1,1842	0,620648	1966,125	1083,19	0,018
2000	0,1661	2721,25	4,718353	5,48753	1,184	0,62867	1990	1096,11	0,1013
3800	0,1772	2723,59	4,426681	5,18357	1,183	0,63166	2015	1122,64	0,0573
5400	0,1912	2682,27	4,041557	4,89902	1,184	0,61551	2001	1144,88	-0,0107
6000	0,2158	2632,88	3,514271	4,38585	1,185	0,60928	2002	1158,3	0,0261
Двигатель с регулятором фаз ГРМ									
840	0,1412	2915,8808	6,008065	6,332279	1,1833	0,679348	2087,794	1116,09	0,0981
2000	0,1493	2871,46	5,592176	5,98011	1,184	0,6753	2074	1115,44	0,0396
3800	0,1583	2829,11	5,198515	5,64686	1,184	0,67175	2064	1127,05	0,1826
5400	0,1697	2787,06	4,775279	5,3331	1,184	0,6594	2052,4	1147,53	0,2209
6000	0,1909	2710,91	4,128887	4,76387	1,184	0,65099	2036	1152,36	0,205

Анализ результатов расчета индикаторных показателей рабочего цикла (таблица 7) показал, значительное улучшение мощностных показателей с применением системы регулирования фазами ГРМ. Также следует отметить рост среднего индикаторного давления при улучшении наполнения цилиндров, при этом удельные показатели эффективности работы несколько снизились.

Таблица 7 – 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
Базовый двигатель ВАЗ-11186					
840	1,2624751	1,529034	17,09286	0,525883	155,8321
2000	1,2827377	1,555017	41,38885	0,522519	156,8354
3800	1,2984767	1,562018	78,99287	0,506729	161,7225
5400	1,2850107	1,516412	108,9755	0,491919	166,5914
6000	1,2742822	1,488008	118,8159	0,483265	169,5746

Продолжение таблицы 7

Двигатель с регулятором фаз ГРМ					
840	1,3899568	1,718744	19,21359	0,466282	175,7508
2000	1,378081	1,70551	45,39441	0,462446	177,2089
3800	1,3638321	1,680978	85,00879	0,458098	178,8908
5400	1,345313	1,642675	118,0493	0,452455	181,1217
6000	1,3247562	1,60977	128,5385	0,445861	183,8006

Анализ результатов расчета эффективных показателей рабочего цикла (таблица 8) показал, что все эффекты, которые мы наблюдали у индикаторных показателей, также присутствуют и у эффективных показателей работы двигателя.

Таблица 8 – Результаты расчета эффективных показателей рабочего цикла

п, мин ⁻¹	V _{п.ср} , м/с	p _м , Мпа	p _е , Мпа	η _м	η _е	g _е , г/(кВт.ч)	Ne, кВт	Me, Н.м	Gт, кг/ч
Базовый двигатель ВАЗ-11186									
840	2,1168	0,0579	1,4711	0,96212	0,50596	161,96739	16,4454	186,9545	2,66361
2000	5,04	0,091	1,4641	0,94151	0,49196	166,57849	38,968	186,0587	6,49124
3800	9,576	0,1422	1,4198	0,90896	0,4606	177,92073	71,8012	180,4345	12,7749
5400	13,608	0,1878	1,3286	0,87617	0,43101	190,13495	95,4816	168,8485	18,1544
6000	15,12	0,2049	1,2832	0,86233	0,41673	196,64725	102,458	163,0675	20,1482
Двигатель с регулятором фаз ГРМ									
840	2,1168	0,0579	1,6608	0,9663	0,45057	181,88	18,5661	211,0635	3,3768
2000	5,04	0,091	1,6146	0,94667	0,43778	187,19152	42,9736	205,1838	8,04429
3800	9,576	0,1422	1,5388	0,9154	0,41934	195,42344	77,8171	195,5524	15,2073
5400	13,608	0,1878	1,4549	0,88569	0,42791	204,49734	104,555	184,8945	21,3813
6000	15,12	0,2049	1,4049	0,87274	0,38912	210,60128	112,181	178,5416	23,6255

Анализ результатов расчета теплового баланса (таблица 9) показал, увеличение тепловых потерь с в систему охлаждения примерно на 1 – 2 % и 1 – 2 % с отработавшими газами вследствие большей энергоемкости заряда, но при этом оптимизация по углу опережения зажигания не проводилась. Это и привело к росту потерь и снижению удельных показателей работы двигателя.

Таблица 9 – Результаты расчета теплового баланса

п, мин ⁻¹	Q ₀ , Дж/с	Q _е , Дж/с	q _е , %	Q _в , Дж/с	q _в , %	Q _г , Дж/с	q _г , %	Q _{ост} , Дж/с	q _{ост} , %
Базовый двигатель ВАЗ-11186									
840	32503	16445	50,596	5477,99	16,8537	10559,03	32,4862	20,7282	0,06377
2000	79210	38968	49,196	13602,5	17,1726	26163,09	33,0299	476,6224	0,60172

Продолжение таблицы 9

3800	155888	71801	46,06	29792,4	19,1115	53405,52	34,2589	888,6375	0,57005
5400	221531	95482	43,101	45505	20,5411	78227,078	35,312	2317,749	1,04624
6000	245861	102458	41,673	49091,3	19,9671	88287,593	35,9096	6023,389	2,44992
Двигатель с регулятором фаз ГРМ									
840	41206	18566	45,057	7475,83	18,1426	13985,118	33,9396	2,860909	2,86091
2000	98162	42974	43,778	18888,2	19,242	33315,634	33,9396	3,040054	3,04005
3800	185569	77817	41,934	41903,9	22,5813	63828,314	34,396	1,088432	1,08843
5400	260908	104555	40,074	54157,6	20,7573	92131,802	35,312	3,857087	3,85709
6000	288293	112181	38,912	69681,9	24,1705	102463,94	35,5416	1,375704	1,3757

Приведем основные термодинамические параметры работы двигателя по результатам теплового расчета в таблице 10 и 11 для базового и модернизированного двигателя, соответственно.

Таблица 10 – 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 3800 мин ⁻¹	P _i , частота вращения 5400 мин ⁻¹	P _i , частота вращения 6000 мин ⁻¹
230	0,387807	0,119703651	0,119135864	0,117331112	0,114782759	0,113597961
231	0,385619	0,120640925	0,120068816	0,118250085	0,115681831	0,114487752
232	0,38339	0,12160914	0,121032566	0,119199396	0,116610586	0,11540692
233	0,38112	0,122609211	0,122028026	0,120179943	0,1175699	0,116356333
234	0,378808	0,123642092	0,123056146	0,121192662	0,11856069	0,117336896
235	0,376456	0,124708777	0,124117915	0,122238529	0,11958391	0,118349554
236	0,374063	0,125810304	0,125214368	0,12331856	0,120640556	0,119395293
237	0,371629	0,126947755	0,12634658	0,124433817	0,121731666	0,12047514
238	0,369155	0,12812226	0,127515676	0,125585408	0,122858323	0,121590168
239	0,366642	0,129334995	0,128722829	0,126774487	0,124021658	0,122741495
240	0,364089	0,13058719	0,129969261	0,128002259	0,125222849	0,123930287
241	0,361497	0,131880127	0,131256248	0,129269982	0,126463126	0,125157762
242	0,358867	0,133215143	0,132585124	0,130578968	0,127743774	0,126425191
243	0,356198	0,134593636	0,133957278	0,131930587	0,129066133	0,1277339
244	0,353491	0,136017064	0,135374162	0,133326269	0,130431602	0,129085275
245	0,350747	0,137486949	0,136837292	0,134767507	0,131841642	0,13048076
246	0,347965	0,139004881	0,13834825	0,136255861	0,133297779	0,131921866
247	0,345147	0,140572521	0,13990869	0,137792959	0,134801606	0,133410171
248	0,342293	0,142191604	0,141520339	0,139380504	0,136354788	0,134947321
249	0,339404	0,143863943	0,143185003	0,141020273	0,137959066	0,13653504
250	0,336479	0,145591434	0,144904567	0,142714125	0,139616258	0,138175126
251	0,33352	0,147376056	0,146681004	0,144464002	0,141328264	0,13986946
252	0,330528	0,149219882	0,148516375	0,146271937	0,143097072	0,141620011
253	0,327502	0,151125077	0,150412838	0,148140054	0,144924761	0,143428834
254	0,324443	0,153093907	0,152372647	0,150070575	0,146813505	0,145298083
255	0,321352	0,155128743	0,154398164	0,152065825	0,148765581	0,147230008
256	0,31823	0,157232068	0,156491859	0,154128239	0,150783368	0,149226967
257	0,315078	0,159406477	0,158656317	0,156260365	0,152869359	0,151291427

Продолжение таблицы 10

258	0,311895	0,161654692	0,160894246	0,158464869	0,155026166	0,153425971
259	0,308684	0,163979561	0,163208483	0,160744547	0,157256521	0,155633305
260	0,305444	0,166384068	0,165601999	0,163102325	0,15956329	0,157916262
261	0,302177	0,168871341	0,168077907	0,165541271	0,161949472	0,160277814
262	0,298882	0,171444657	0,17063947	0,168064601	0,164418214	0,162721074
263	0,295563	0,174107453	0,173290111	0,170675684	0,166972815	0,165249306
264	0,292218	0,176863335	0,176033417	0,173378057	0,169616733	0,167865933
265	0,288849	0,179716082	0,178873152	0,176175428	0,172353598	0,170574548
266	0,285457	0,182669662	0,181813267	0,179071688	0,175187216	0,173378917
267	0,282042	0,18572824	0,184857907	0,182070923	0,178121584	0,176282996
268	0,278607	0,188896186	0,188011424	0,185177421	0,181160898	0,179290938
269	0,275151	0,192178093	0,19127839	0,188395685	0,184309565	0,182407105
270	0,271677	0,195578784	0,194663607	0,191730446	0,187572214	0,185636076
271	0,268184	0,199103325	0,198172118	0,195186675	0,190953707	0,188982665
272	0,264674	0,202757043	0,201809228	0,198769596	0,194459158	0,192451933
273	0,261148	0,206545538	0,205580512	0,202484704	0,198093941	0,196049197
274	0,257607	0,210474699	0,209491831	0,206337773	0,201863708	0,199780052
275	0,254052	0,214550719	0,213549353	0,210334881	0,205774404	0,203650381
276	0,250485	0,218780117	0,217759567	0,21448242	0,209832285	0,207666376
277	0,246907	0,223169751	0,222129303	0,218787121	0,214043934	0,211834553
278	0,243318	0,227726844	0,226665749	0,223256066	0,218416284	0,21616177
279	0,239721	0,232458998	0,231376477	0,227896714	0,222956632	0,220655252
280	0,236116	0,237374223	0,236269459	0,232716924	0,227672666	0,225322607
281	0,232504	0,242480956	0,241353097	0,23772497	0,232572484	0,230171849
282	0,228888	0,247788088	0,246636243	0,242929577	0,237664622	0,235211426
283	0,225267	0,253304991	0,252128227	0,248339937	0,242958075	0,240450239
284	0,221644	0,259041544	0,257838885	0,253965742	0,248462325	0,245897674
285	0,21802	0,265008165	0,263778591	0,259817213	0,254187374	0,251563628
286	0,214396	0,27121584	0,269958281	0,265905128	0,260143767	0,257458539
287	0,210774	0,277676159	0,276389497	0,272240856	0,26634263	0,263593416
288	0,207154	0,284401348	0,28308441	0,278836394	0,272795699	0,269979876
289	0,203539	0,291404311	0,290055868	0,285704399	0,279515361	0,276630177
290	0,19993	0,298698661	0,297317427	0,292858229	0,286514685	0,283557254
291	0,196327	0,306298769	0,304883393	0,300311982	0,293807466	0,290774758
292	0,192734	0,314219802	0,312768869	0,308080538	0,301408266	0,298297102
293	0,18915	0,322477772	0,320989796	0,316179607	0,309332454	0,306139495
294	0,185578	0,331089578	0,329563003	0,324625771	0,317596256	0,314317997
295	0,182018	0,340073063	0,338506252	0,333436533	0,326216799	0,322849558
296	0,178473	0,349447057	0,347838296	0,34263037	0,335212163	0,331752072
297	0,174944	0,359231438	0,357578924	0,352226786	0,344601432	0,341044423
298	0,171433	0,369447184	0,367749025	0,362246362	0,354404744	0,350746545
299	0,167939	0,380116429	0,378370639	0,372710818	0,364643353	0,36087947
300	0,164467	0,391262525	0,389467017	0,383643065	0,375339678	0,371465387
301	0,161016	0,402910101	0,401062681	0,39506727	0,386517364	0,382527696
302	0,157588	0,415085121	0,413183486	0,407008909	0,398201342	0,394091071
303	0,154185	0,42781495	0,425856678	0,419494833	0,410417885	0,406181513
304	0,150808	0,44112841	0,439110958	0,432553324	0,423194668	0,418826413
305	0,147458	0,455055843	0,452976539	0,446214157	0,436560825	0,432054603
306	0,144138	0,469629171	0,467485204	0,460508653	0,450547005	0,445896417
307	0,140848	0,484881944	0,482670363	0,475469736	0,465185425	0,460383738
308	0,137591	0,500849397	0,498567102	0,491131983	0,48050992	0,475550051
309	0,134367	0,517568494	0,515212225	0,507531664	0,49655598	0,491430483

Продолжение таблицы 10

310	0,131177	0,535077958	0,532644296	0,524706784	0,513360795	0,508061837
311	0,128024	0,553418307	0,550903658	0,542697102	0,53096327	0,525482618
312	0,124909	0,57263186	0,570032453	0,561544148	0,549404045	0,543733045
313	0,121833	0,592762735	0,590074613	0,58129122	0,568725488	0,56285505
314	0,118798	0,613856827	0,611075842	0,601983361	0,588971676	0,582892255
315	0,115805	0,635961763	0,633083566	0,62366731	0,610188345	0,603889924
316	0,112855	0,65912682	0,656146856	0,646391432	0,632422824	0,625894896
317	0,10995	0,683402817	0,680316319	0,670205602	0,655723918	0,648955475
318	0,107091	0,70884196	0,705643943	0,695161061	0,68014177	0,673121283
319	0,104279	0,735497637	0,732182898	0,721310211	0,70572766	0,698443073
320	0,101516	0,763424163	0,75998727	0,748706362	0,732533755	0,724972473
321	0,098803	0,792676444	0,789111742	0,777403411	0,760612797	0,752761681
322	0,096142	0,823309578	0,819611183	0,80745544	0,790017713	0,781863076
323	0,093532	0,855378353	0,85154016	0,838916235	0,820801135	0,812328749
324	0,090977	0,888936657	0,88495234	0,871838695	0,853014833	0,844209934
325	0,088477	0,924036758	0,919899779	0,906274134	0,886709024	0,877556331
326	0,086032	0,960728463	0,956432087	0,942271457	0,921931567	0,912686942
327	0,083646	0,999058135	0,994595439	0,979876184	0,958727012	0,949417124
328	0,081317	1,039067539	1,03443144	1,019129334	0,997135502	0,987859191
329	0,079048	1,080792532	1,075975808	1,060066123	1,037392837	1,028156867
330	0,07684	1,12426155	1,119256875	1,102714494	1,079391469	1,070488387
331	0,074694	1,169493916	1,164293897	1,147093444	1,123267164	1,115069613
332	0,07261	1,216497929	1,211095157	1,193211156	1,169204395	1,162157036
333	0,07059	1,265268765	1,259655868	1,241123975	1,217441334	1,212050505
334	0,068634	1,315786166	1,309955879	1,290858745	1,268274737	1,265095476
335	0,066745	1,368011955	1,36195719	1,342571279	1,322064438	1,321684536
336	0,064922	1,421887383	1,415601323	1,396493687	1,379237095	1,382257933
337	0,063166	1,477330364	1,470674838	1,452942195	1,440288776	1,447302801
338	0,061479	1,53423264	1,52738908	1,512324391	1,505785877	1,517350765
339	0,05986	1,592456959	1,58592516	1,575145264	1,576363853	1,592973605
340	0,058312	1,651834356	1,646587649	1,642011275	1,652723198	1,674776672
341	0,056835	1,711844149	1,70981659	1,713631568	1,735622168	1,763389805
342	0,055428	1,77291602	1,776197604	1,790815367	1,825865755	1,859455537
343	0,054094	1,835308993	1,846468704	1,874464587	1,924290587	1,963614483
344	0,052833	1,89949635	1,9215222	1,965560798	2,031745533	2,07648788
345	0,051644	1,966183067	2,002399952	2,065145854	2,14906799	2,198657401
346	0,05053	2,036317449	2,090280233	2,174295804	2,277056043	2,330642463
347	0,04949	2,111093879	2,186454753	2,294088046	2,41643689	2,472875442
348	0,048526	2,191943335	2,292294821	2,425562152	2,567832152	2,625675335
349	0,047636	2,28050842	2,409206396	2,569675144	2,731720927	2,789220611
350	0,046823	2,378600315	2,538574571	2,727252446	2,908401657	2,963522166
351	0,046085	2,488136287	2,681698948	2,898936056	3,097954144	3,148397451
352	0,045425	2,611058115	2,839722161	3,085131762	3,300203251	3,34344703
353	0,044841	2,749233773	3,013554409	3,285957499	3,514686061	3,548034907
354	0,044335	2,904346574	3,203797249	3,50119515	3,740624414	3,761274016
355	0,043906	3,077777346	3,410670127	3,730248295	3,976904837	3,98201825
356	0,043555	3,270485938	3,633943256	3,97210854	4,222067852	4,208862237
357	0,043281	3,482898407	3,872880489	4,225333111	4,474308447	4,440149865
358	0,043086	3,714805981	4,126195933	4,48803628	4,731489176	4,673992157
359	0,042969	3,965281624	4,392028017	4,757896888	4,991166816	4,908294688
360	0,04293	4,23261985	4,667934557	5,032183685	5,25063284	5,140794189
361	0,042969	4,514305492	4,950911914	5,307799431	5,506967216	5,369103472

Продолжение таблицы 10

362	0,043086	4,807016959	5,237440544	5,581343735	5,757104182	5,59076326
363	0,043281	5,106668967	5,523557997	5,849193445	5,997907865	5,803299077
364	0,043555	5,408498382	5,804958888	6,107598275	6,226254891	6,004280979
365	0,043906	5,707194592	6,077119492	6,352788144	6,439120561	6,191383721
366	0,044335	5,997072722	6,335442669	6,581087793	6,633664851	6,362444885
367	0,044841	6,272284301	6,575416942	6,789033435	6,807314347	6,515518619
368	0,045425	6,527055987	6,792781926	6,973485804	6,957836403	6,648922843
369	0,046085	6,755943214	6,983691149	7,131733918	7,083402155	6,761278207
370	0,046823	6,95408263	7,144862766	7,261584176	7,182635648	6,851537455
371	0,047636	7,117425394	7,273708841	7,361430131	7,254646998	6,919004406
372	0,048526	7,242933291	7,368434833	7,430299276	7,299048431	6,963342227
373	0,04949	7,32872136	7,428102567	7,467874489	7,315952841	6,984571132
374	0,05053	7,374134346	7,452652352	7,47448919	7,305955409	6,983056114
375	0,051644	7,379749624	7,442882661	7,451096803	7,270099627	6,959485618
376	0,052833	7,347305672	7,400388811	7,399216579	7,209829742	6,914842385
377	0,054094	7,279562126	7,327465104	7,320859161	7,126932205	6,850367892
378	0,055428	7,180103931	7,2269775	7,218436378	7,023469104	6,767521927
379	0,056835	7,053107374	7,102215981	7,094660531	6,90170678	6,667938925
380	0,058312	6,903088934	6,956736986	6,952438826	6,764042869	6,553382656
381	0,05986	6,734658605	6,794206579	6,794768627	6,612934881	6,425700821
382	0,061479	6,552297406	6,618254315	6,624638797	6,450833147	6,286780971
383	0,063166	6,360174594	6,432346172	6,444941642	6,280120523	6,138509047
384	0,064922	6,162014345	6,239682656	6,258398965	6,103060736	5,982731603
385	0,066745	5,96101524	6,043125496	6,067504503	5,921756651	5,821222607
386	0,068634	5,759819852	5,845153621	5,874483722	5,738119089	5,655655446
387	0,07059	5,560526928	5,647846581	5,681270756	5,553846287	5,487580526
388	0,07261	5,364735567	5,452891615	5,489501134	5,370413443	5,318408638
389	0,074694	5,173609738	5,261609226	5,300518116	5,189071424	5,149399987
390	0,07684	4,98795209	5,074991564	5,115389904	5,01085328	4,981658618
391	0,079048	4,82146786	4,893748035	4,934934709	4,836587033	4,81613176
392	0,081317	4,66078493	4,718353209	4,759750703	4,666913085	4,653613474
393	0,083646	4,505863756	4,561562158	4,590248144	4,502304639	4,494751898
394	0,086032	4,35663536	4,410531152	4,426681403	4,343089619	4,34005933
395	0,088477	4,213006362	4,2651658	4,28086342	4,189472805	4,189924337
396	0,090977	4,074863479	4,125351562	4,140611232	4,041557146	4,044625172
397	0,093532	3,942077487	3,990957763	4,005793974	3,909849084	3,90434378
398	0,096142	3,814506704	3,861841113	3,87626812	3,783314134	3,769179798
399	0,098803	3,692000019	3,737848775	3,751880556	3,66180239	3,639164055
400	0,101516	3,574399509	3,618821016	3,632471239	3,545157194	3,514271176
401	0,104279	3,461542685	3,504593472	3,517875476	3,433217355	3,403218163
402	0,107091	3,353264402	3,394999087	3,407925858	3,325819051	3,29667346
403	0,10995	3,249398469	3,289869743	3,302453902	3,222797425	3,194473266
404	0,112855	3,149779001	3,189037622	3,201291417	3,123987921	3,096454095
405	0,115805	3,054241531	3,092336342	3,104271639	3,029227395	3,002453872
406	0,118798	2,962623928	2,999601876	3,011230158	2,938355017	2,912312837
407	0,121833	2,874767134	2,910673303	2,92200567	2,851213009	2,82587427
408	0,124909	2,790515749	2,825393399	2,836440571	2,767647219	2,742985061
409	0,128024	2,709718486	2,7436091	2,75438142	2,68750758	2,663496166
410	0,131177	2,632228517	2,665171848	2,675679289	2,610648443	2,587262938
411	0,134367	2,557903716	2,589937844	2,600190016	2,53692883	2,514145373
412	0,137591	2,486606835	2,517768218	2,527774374	2,466212596	2,444008277
413	0,140848	2,418205598	2,448529132	2,458298178	2,398368534	2,37672136

Продолжение таблицы 10

414	0,144138	2,35257275	2,382091823	2,39163233	2,333270414	2,312159283
415	0,147458	2,289586054	2,318332608	2,327652816	2,270796984	2,250201656
416	0,150808	2,229128253	2,257132836	2,266240671	2,210831934	2,190732995
417	0,154185	2,171086997	2,198378825	2,207281904	2,153263821	2,133642658
418	0,157588	2,115354749	2,141961759	2,150667403	2,097985976	2,078824746
419	0,161016	2,061828675	2,087777579	2,096292823	2,044896396	2,026177991
420	0,164467	2,010410509	2,035726848	2,044058451	1,993897608	1,975605631
421	0,167939	1,961006415	1,985714614	1,993869069	1,944896536	1,927015269
422	0,171433	1,913526842	1,937650253	1,9456338	1,897804352	1,880318728
423	0,174944	1,867886366	1,891447324	1,899265954	1,852536322	1,835431902
424	0,178473	1,824003538	1,8470234	1,854682871	1,809011656	1,792274595
425	0,182018	1,781800721	1,804299919	1,811805762	1,767153348	1,750770374
426	0,185578	1,741203941	1,763202017	1,770559545	1,726888017	1,710846407
427	0,18915	1,702142721	1,723658376	1,730872694	1,688145762	1,672433315
428	0,192734	1,664549938	1,685601064	1,692677077	1,650860001	1,635465014
429	0,196327	1,628361664	1,648965386	1,65590781	1,614967323	1,599878576
430	0,19993	1,593517026	1,613689739	1,620503104	1,58040735	1,565614076
431	0,203539	1,559958061	1,579715461	1,586404121	1,547122586	1,532614456
432	0,207154	1,527629579	1,546986698	1,553554841	1,51505829	1,500825393
433	0,210774	1,49647903	1,515450268	1,521901919	1,484162339	1,47019516
434	0,214396	1,466456379	1,485055532	1,491394562	1,454385101	1,440674508
435	0,21802	1,437513979	1,455754269	1,461984401	1,425679317	1,41221654
436	0,221644	1,409606459	1,427500558	1,433625375	1,397999984	1,384776601
437	0,225267	1,382690606	1,400250667	1,406273615	1,371304239	1,358312161
438	0,228888	1,356725263	1,37396294	1,379887336	1,34555126	1,332782713
439	0,232504	1,331671223	1,348597694	1,354426732	1,320702157	1,30814967
440	0,236116	1,307491131	1,324117125	1,329853877	1,296719879	1,284376271
441	0,239721	1,284149395	1,300485208	1,306132634	1,273569121	1,261427488
442	0,243318	1,261612092	1,27766761	1,283228561	1,251216239	1,23926994
443	0,246907	1,239846889	1,255631604	1,261108828	1,22962916	1,217871807
444	0,250485	1,218822959	1,234345991	1,239742133	1,208777308	1,197202755
445	0,254052	1,198510909	1,213781019	1,21909863	1,188631529	1,177233859
446	0,257607	1,178882703	1,193908313	1,199149853	1,169164015	1,157937534
447	0,261148	1,159911598	1,174700804	1,179868643	1,15034824	1,139287464
448	0,264674	1,141572078	1,156132665	1,161229091	1,132158894	1,121258542
449	0,268184	1,12383979	1,138179249	1,143206468	1,114571826	1,103826807
450	0,271677	1,10669149	1,120817027	1,125777167	1,097563977	1,086969389
451	0,275151	1,090104985	1,104023535	1,108918651	1,081113336	1,070664451
452	0,278607	1,07405908	1,087777321	1,092609397	1,065198881	1,054891141
453	0,282042	1,058533531	1,072057893	1,076828844	1,049800532	1,039629541
454	0,285457	1,043508996	1,056845673	1,061557349	1,034899104	1,024860622
455	0,288849	1,028966991	1,042121953	1,046776141	1,020476264	1,0105662
456	0,292218	1,014889849	1,027868848	1,032467275	1,006514489	0,996728892
457	0,295563	1,001260678	1,01406926	1,018613596	0,992997025	0,983332082
458	0,298882	0,988063325	1,000706839	1,005198698	0,979907849	0,970359879
459	0,302177	0,97528234	0,987765946	0,992206888	0,967231638	0,957797084
460	0,305444	0,962902941	0,975231617	0,979623152	0,954953729	0,945629155
461	0,308684	0,950910982	0,963089534	0,967433121	0,943060093	0,933842177
462	0,311895	0,939292924	0,951325991	0,955623045	0,931537301	0,922422832
463	0,315078	0,928035805	0,939927868	0,944179757	0,920372496	0,911358369
464	0,31823	0,917127212	0,928882599	0,933090648	0,909553366	0,900636579
465	0,321352	0,906555259	0,918178152	0,922343643	0,899068122	0,890245768

Продолжение таблицы 10

466	0,324443	0,896308555	0,907802997	0,911927173	0,888905467	0,880174735
467	0,327502	0,886376189	0,897746088	0,901830154	0,879054577	0,870412746
468	0,330528	0,876747703	0,887996839	0,892041961	0,86950508	0,860949514
469	0,33352	0,86741307	0,8785451	0,88255241	0,860247032	0,851775178
470	0,336479	0,858362681	0,869381143	0,873351738	0,8512709	0,842880286
471	0,339404	0,849587317	0,860495637	0,864430581	0,842567543	0,834255773
472	0,342293	0,841078139	0,851879632	0,855779958	0,834128193	0,825892943
473	0,345147	0,832826667	0,843524545	0,847391255	0,825944438	0,817783456
474	0,347965	0,824824764	0,835422139	0,839256204	0,818008208	0,809919311
475	0,350747	0,817064622	0,827564509	0,831366875	0,81031176	0,802292828
476	0,353491	0,809538747	0,819944069	0,823715653	0,80284766	0,794896638
477	0,356198	0,802239947	0,812553537	0,81629523	0,795608774	0,787723665
478	0,358867	0,795161314	0,805385922	0,80909859	0,788588252	0,780767119
479	0,361497	0,788296218	0,798434511	0,802118995	0,781779517	0,774020478
480	0,364089	0,78163829	0,791692856	0,795349974	0,775176253	0,767477479
481	0,366642	0,775181415	0,785154767	0,788785315	0,768772394	0,761132108
482	0,369155	0,768919717	0,778814295	0,782419047	0,762562113	0,754978588
483	0,371629	0,762847553	0,772665728	0,776245437	0,756539811	0,749011369
484	0,374063	0,7569595	0,766703575	0,770258975	0,750700112	0,743225118
485	0,376456	0,751250349	0,760922563	0,764454368	0,745037848	0,737614713
486	0,378808	0,745715095	0,755317624	0,758826529	0,739548055	0,732175233
487	0,38112	0,740348926	0,749883888	0,75337057	0,73422596	0,726901945
488	0,38339	0,735147219	0,744616675	0,748081794	0,72906698	0,721790305
489	0,385619	0,730105533	0,739511488	0,742955688	0,724066708	0,716835945
490	0,387807	0,725219598	0,734564003	0,737987911	0,719220908	0,712034666
500	0,407355	0,684098302	0,692924312	0,696176688	0,678437483	0,67162699
510	0,422596	0,584098302	0,592924312	0,596176688	0,578437483	0,57162699

Таблица 11 – 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 3800 мин ⁻¹	P _i , частота вращения 5400 мин ⁻¹	P _i , частота вращения 6000 мин ⁻¹
230	0,387807	0,119786193	0,11953366	0,118733007	0,117598138	0,117071519
231	0,385619	0,120724751	0,120470287	0,119663495	0,118519665	0,11798892
232	0,38339	0,121694297	0,121437838	0,120624707	0,11947162	0,118936611
233	0,38112	0,122695747	0,122437229	0,121617551	0,120454901	0,11991549
234	0,378808	0,123730058	0,123469414	0,122642975	0,121470448	0,120926489
235	0,376456	0,124798227	0,124535387	0,123701968	0,12251924	0,121970584
236	0,374063	0,125901293	0,125636186	0,124795559	0,123602296	0,12304879
237	0,371629	0,12704034	0,126772892	0,125924825	0,124720683	0,124162169
238	0,369155	0,128216499	0,127946636	0,127090887	0,12587551	0,125311824
239	0,366642	0,129430951	0,129158593	0,128294914	0,127067936	0,126498911
240	0,364089	0,130684926	0,130409994	0,129538128	0,12829917	0,127724631
241	0,361497	0,13197971	0,131702119	0,130821802	0,129570474	0,128990242
242	0,358867	0,133316642	0,133036308	0,132147266	0,130883164	0,130297054
243	0,356198	0,134697123	0,134413956	0,133515908	0,132238615	0,131646434
244	0,353491	0,136122613	0,135836522	0,134929176	0,13363826	0,133039812
245	0,350747	0,137594638	0,137305529	0,136388584	0,1350836	0,134478679
246	0,347965	0,139114792	0,138822566	0,13789571	0,136576196	0,135964592
247	0,345147	0,140684738	0,140389295	0,139452205	0,138117685	0,137499178

Продолжение таблицы 11

248	0,342293	0,142306216	0,14200745	0,141059794	0,139709774	0,139084136
249	0,339404	0,143981041	0,143678844	0,142720278	0,141354245	0,140721244
250	0,336479	0,145711113	0,145405374	0,144435539	0,143052965	0,142412357
251	0,33352	0,147498418	0,147189019	0,146207547	0,144807882	0,144159415
252	0,330528	0,149345029	0,149031851	0,148038359	0,146621035	0,145964449
253	0,327502	0,151253119	0,150936038	0,149930128	0,148494555	0,147829579
254	0,324443	0,153224959	0,152903844	0,151885105	0,150430673	0,149757026
255	0,321352	0,155262923	0,154937642	0,153905648	0,152431721	0,151749113
256	0,31823	0,1573695	0,157039912	0,155994222	0,154500141	0,153808271
257	0,315078	0,159547291	0,159213254	0,158153407	0,15663849	0,155937044
258	0,311895	0,161799024	0,161460388	0,160385909	0,158849445	0,158138098
259	0,308684	0,164127553	0,163784162	0,162694557	0,16113581	0,160414224
260	0,305444	0,166535869	0,166187563	0,165082318	0,163500521	0,162768346
261	0,302177	0,169027107	0,168673717	0,167552299	0,165946656	0,165203527
262	0,298882	0,171604551	0,171245905	0,17010776	0,168477443	0,16772298
263	0,295563	0,174271647	0,173907563	0,172752115	0,171096263	0,170330073
264	0,292218	0,177032007	0,176662297	0,175488947	0,173806664	0,173028337
265	0,288849	0,179889421	0,17951389	0,178322015	0,176612368	0,175821476
266	0,285457	0,182847865	0,182466309	0,181255262	0,179517279	0,178713379
267	0,282042	0,185911513	0,185523721	0,184292826	0,182525498	0,181708126
268	0,278607	0,189084748	0,188690499	0,187439055	0,185641326	0,184810002
269	0,275151	0,192372171	0,191971237	0,190698511	0,188869284	0,188023505
270	0,271677	0,195778617	0,195370758	0,194075989	0,192214119	0,191353361
271	0,268184	0,199309166	0,198894132	0,197576526	0,19568082	0,194804538
272	0,264674	0,202969157	0,202546689	0,201205418	0,19927463	0,198382255
273	0,261148	0,206764203	0,20633403	0,204968231	0,203001062	0,202091999
274	0,257607	0,210700208	0,210262048	0,20887082	0,206865912	0,205939542
275	0,254052	0,214783381	0,214336939	0,212919343	0,21087528	0,209930955
276	0,250485	0,219020256	0,218565224	0,217120279	0,215035581	0,214072626
277	0,246907	0,223417709	0,222953767	0,221480448	0,219353569	0,218371278
278	0,243318	0,22798298	0,227509792	0,226007031	0,223836354	0,222833988
279	0,239721	0,232723693	0,232240908	0,230707587	0,228491422	0,22746821
280	0,236116	0,237647877	0,237155129	0,235590079	0,233326659	0,232281794
281	0,232504	0,24276399	0,242260897	0,240662898	0,238350372	0,23728301
282	0,228888	0,248080949	0,247567109	0,245934883	0,243571316	0,242480574
283	0,225267	0,253608147	0,253083144	0,251415355	0,248998718	0,247883672
284	0,221644	0,259355492	0,258818886	0,257114136	0,254642308	0,253501989
285	0,21802	0,265333429	0,264784761	0,263041587	0,260512343	0,259345737
286	0,214396	0,271552974	0,270991764	0,269208634	0,266619642	0,265425687
287	0,210774	0,278025748	0,277451494	0,275626801	0,272975618	0,271753201
288	0,207154	0,284764012	0,284176186	0,28230825	0,279592313	0,278340265
289	0,203539	0,291780703	0,291178753	0,289265811	0,286482433	0,28519953
290	0,19993	0,299089474	0,298472821	0,296513026	0,293659386	0,292344344
291	0,196327	0,306704735	0,306072773	0,304064187	0,301137324	0,299788795
292	0,192734	0,314641699	0,31399379	0,311934381	0,308931188	0,307547757
293	0,18915	0,322916419	0,322251897	0,320139532	0,317056745	0,315636927
294	0,185578	0,331545847	0,330864011	0,328696452	0,325530643	0,324072877
295	0,182018	0,340547875	0,339847989	0,337622889	0,334370454	0,332873103
296	0,178473	0,349941391	0,349222682	0,346937574	0,343594729	0,34205607
297	0,174944	0,359746329	0,359007987	0,356660282	0,353223047	0,351641272
298	0,171433	0,369983731	0,369224905	0,366811883	0,363276073	0,361649279
299	0,167939	0,380675798	0,379895593	0,377414396	0,373775612	0,3721018

Продолжение таблицы 11

300	0,164467	0,391845953	0,39104343	0,388491056	0,384744669	0,383021736
301	0,161016	0,403518899	0,40269307	0,400066365	0,396207507	0,394433243
302	0,157588	0,415720683	0,414870511	0,412166157	0,408189708	0,406361785
303	0,154185	0,428478753	0,427603147	0,424817661	0,42071823	0,418834203
304	0,150808	0,441822024	0,440919839	0,438049557	0,433821473	0,431878769
305	0,147458	0,455780935	0,454850965	0,451892038	0,447529334	0,445525244
306	0,144138	0,470387509	0,469428489	0,466376868	0,461873265	0,459804941
307	0,140848	0,485675406	0,484686006	0,481537438	0,476886327	0,474750773
308	0,137591	0,501679978	0,500658799	0,497408813	0,492603243	0,490397307
309	0,134367	0,518438309	0,517383883	0,514027781	0,509060437	0,506780803
310	0,131177	0,535989256	0,534900039	0,531432887	0,526296074	0,523939257
311	0,128024	0,554373472	0,553247844	0,549664457	0,544350085	0,54191242
312	0,124909	0,573633421	0,572469681	0,568764617	0,563264179	0,560741815
313	0,121833	0,593813376	0,592609739	0,588777284	0,583081843	0,580470732
314	0,118798	0,614959395	0,613713988	0,60974815	0,603848315	0,60114421
315	0,115805	0,637119272	0,635830132	0,631724628	0,625610543	0,622808984
316	0,112855	0,660342464	0,659007534	0,654755781	0,648417105	0,645513415
317	0,10995	0,684679975	0,683297103	0,67889221	0,672318102	0,669307381
318	0,107091	0,710184207	0,708751141	0,7041859	0,697365005	0,694242121
319	0,104279	0,73690875	0,735423138	0,730690018	0,723610457	0,720370042
320	0,101516	0,764908126	0,763367515	0,758458657	0,751108014	0,747744462
321	0,098803	0,794237459	0,792639292	0,787546506	0,779911825	0,776419286
322	0,096142	0,824952065	0,823293683	0,818008449	0,810076229	0,80644861
323	0,093532	0,857106959	0,8553856	0,84989907	0,841655269	0,837886235
324	0,090977	0,890756254	0,888969056	0,88327206	0,874702103	0,870785082
325	0,088477	0,925952445	0,924096451	0,918179509	0,909268303	0,90519649
326	0,086032	0,962745564	0,960817725	0,954671064	0,945403019	0,941169391
327	0,083646	1,00118219	0,999179373	0,992792947	0,983152015	0,979056413
328	0,081317	1,041304299	1,039223297	1,032586818	1,022556533	1,018655096
329	0,079048	1,083147942	1,080985482	1,074088458	1,063916017	1,060101268
330	0,07684	1,126741731	1,124494495	1,117326275	1,107090911	1,10357435
331	0,074694	1,172105138	1,169769774	1,162319608	1,152253066	1,149301825
332	0,07261	1,219246581	1,216819731	1,209076834	1,199640143	1,197563681
333	0,07059	1,268161315	1,265639634	1,257740513	1,249562496	1,248696634
334	0,068634	1,318829111	1,316209301	1,308302141	1,302409858	1,303097861
335	0,066745	1,371211763	1,368490608	1,3609786	1,358657418	1,361227918
336	0,064922	1,425250426	1,422424827	1,416092652	1,418870762	1,423612451
337	0,063166	1,480862836	1,477906076	1,474083712	1,483709052	1,490842294
338	0,061479	1,537940468	1,535130782	1,535517635	1,553925749	1,563571474
339	0,05986	1,596345698	1,594395197	1,601094556	1,630366129	1,6425127
340	0,058312	1,655909075	1,656174325	1,671653594	1,713960855	1,728429876
341	0,056835	1,716252241	1,721138442	1,748173117	1,805714962	1,822127301
342	0,055428	1,777845152	1,790166249	1,831765175	1,906691699	1,924435243
343	0,054094	1,84117766	1,864352405	1,92366281	2,017990897	2,036191749
344	0,052833	1,907061939	1,945006858	2,025199151	2,140721718	2,15822063
345	0,051644	1,976655532	2,033643317	2,137777619	2,275969901	2,291305773
346	0,05053	2,051473772	2,131954445	2,262833014	2,424759842	2,436162041
347	0,04949	2,133386247	2,241771999	2,401783839	2,588012095	2,593403249
348	0,048526	2,224591808	2,365011138	2,55597674	2,766497119	2,763507874
349	0,047636	2,327567322	2,50359942	2,72662439	2,960786349	2,946783388
350	0,046823	2,444987183	2,659392266	2,914738533	3,171201977	3,143330325
351	0,046085	2,579613405	2,834077786	3,121060223	3,397767167	3,353007449

Продолжение таблицы 11

352	0,045425	2,73415942	3,029074586	3,345989603	3,640158789	3,575399611
353	0,044841	2,911133693	3,24542658	3,589517918	3,897665126	3,809790079
354	0,044335	3,112671275	3,483699016	3,851164896	4,169151311	4,055139258
355	0,043906	3,340361991	3,743880144	4,129925049	4,453035407	4,310071714
356	0,043555	3,595083626	4,025293321	4,424226835	4,747278053	4,572873316
357	0,043281	3,876847883	4,326524939	4,731908801	5,049388292	4,841500009
358	0,043086	4,184666941	4,645374132	5,050216728	5,356447685	5,113599293
359	0,042969	4,516449327	4,97883058	5,375825245	5,665153965	5,386544878
360	0,04293	4,868935206	5,323086524	5,704886454	5,97188442	5,657484283
361	0,042969	5,237682264	5,673588188	6,033106656	6,272777964	5,923398352
362	0,043086	5,617113258	6,025129964	6,355850547	6,563833555	6,181170885
363	0,043281	6,000634259	6,371992068	6,668270227	6,841021315	6,427665887
364	0,043555	6,380828448	6,708119057	6,965454363	7,100401676	6,659809339
365	0,043906	6,749724108	7,027332916	7,242590934	7,338247011	6,874672039
366	0,044335	7,099127817	7,323570747	7,495135495	7,551159787	7,06954988
367	0,044841	7,421005618	7,591133897	7,718975862	7,73618123	7,242038021
368	0,045425	7,70788729	7,824933008	7,910583796	7,890884906	7,390095714
369	0,046085	7,953262997	8,020712367	8,067144661	8,013450385	7,512099047
370	0,046823	8,15193859	8,175237342	8,186657131	8,102713333	7,606879515
371	0,047636	8,300316666	8,286430634	8,267996816	8,1581897	7,673747101
372	0,048526	8,39657545	8,353446602	8,310939982	8,18007322	7,712497295
373	0,04949	8,440726552	8,376677642	8,316146199	8,169206967	7,723402321
374	0,05053	8,434544709	8,357692159	8,285101522	8,127031147	7,707187501
375	0,051644	8,381376389	8,299109452	8,220026466	8,05551056	7,664994338
376	0,052833	8,285847466	8,204422196	8,123755351	7,957046202	7,59833242
377	0,054094	8,153501258	8,077781516	7,999595321	7,83437607	7,509022579
378	0,055428	7,990404959	7,923762381	7,851174414	7,690470625	7,399133991
379	0,056835	7,802763991	7,747127861	7,682288266	7,528428247	7,270917994
380	0,058312	7,596579721	7,552609628	7,496754537	7,351375666	7,126741329
381	0,05986	7,377377245	7,344719093	7,298282821	7,162377662	6,969021358
382	0,061479	7,150018207	7,127599301	7,090366024	6,964359377	6,800165527
383	0,063166	6,918601201	6,904922707	6,876196981	6,760043573	6,622516957
384	0,064922	6,68644127	6,67983493	6,658611788	6,551904003	6,438307659
385	0,066745	6,456112135	6,454940289	6,440059181	6,342135005	6,249620344
386	0,068634	6,229530876	6,232321696	6,222593414	6,132636448	6,058359365
387	0,07059	6,008064715	6,013585702	6,007886791	5,925012362	5,866230824
388	0,07261	5,808690153	5,799923102	5,797257163	5,720581024	5,674731483
389	0,074694	5,615465541	5,592176332	5,59170551	5,520393928	5,485145731
390	0,07684	5,4284839	5,405812759	5,391958986	5,325261003	5,298549579
391	0,079048	5,247786248	5,225717647	5,198515407	5,135779531	5,115820463
392	0,081317	5,073368891	5,051886944	5,025584882	4,95236452	4,937651544
393	0,083646	4,90519011	4,884278699	4,858844747	4,775278685	4,764569143
394	0,086032	4,743176227	4,722819109	4,698221569	4,604660624	4,596952062
395	0,088477	4,587227062	4,567407965	4,543615649	4,440550254	4,435051637
396	0,090977	4,437220794	4,417923501	4,394905837	4,282910976	4,279011566
397	0,093532	4,293018263	4,274226681	4,251953808	4,131648398	4,128886745
398	0,096142	4,154466739	4,136164958	4,114607793	3,986625707	3,995372569
399	0,098803	4,021403206	4,003575552	3,982705846	3,847675985	3,867155161
400	0,101516	3,893657201	3,876288275	3,85607865	3,714611839	3,744069527
401	0,104279	3,771053249	3,754127961	3,734551939	3,587232803	3,62594588
402	0,107091	3,653412933	3,636916532	3,617948547	3,55507766	3,512611637
403	0,10995	3,540556648	3,524474742	3,506090148	3,445096345	3,403893107

Продолжение таблицы 11

404	0,112855	3,432305064	3,416623635	3,398798706	3,339607382	3,299616903
405	0,115805	3,328480336	3,313185754	3,295897678	3,238437003	3,199611107
406	0,118798	3,228907103	3,213986134	3,197212996	3,141413888	3,103706233
407	0,121833	3,133413292	3,118853098	3,102573868	3,048369945	3,011735994
408	0,124909	3,041830748	3,027618894	3,011813405	2,959140935	2,923537921
409	0,128024	2,95399574	2,94012019	2,924769116	2,873566951	2,838953835
410	0,131177	2,869749332	2,856198448	2,841283279	2,791492787	2,75783021
411	0,134367	2,788937656	2,77570019	2,761203208	2,712768198	2,680018435
412	0,137591	2,711412095	2,698477187	2,684381438	2,637248081	2,605374986
413	0,140848	2,6370294	2,624386569	2,610675834	2,564792583	2,533761538
414	0,144138	2,565651738	2,553290873	2,539949642	2,49526715	2,465045009
415	0,147458	2,497146691	2,485058043	2,47207149	2,428542526	2,39909756
416	0,150808	2,431387221	2,419561393	2,406915342	2,364494712	2,335796555
417	0,154185	2,368251589	2,356679528	2,344360431	2,303004893	2,275024486
418	0,157588	2,30762326	2,296296245	2,284291155	2,243959338	2,216668877
419	0,161016	2,249390779	2,23830041	2,226596951	2,187249281	2,160622165
420	0,164467	2,193447631	2,182585819	2,171172167	2,132770785	2,106781563
421	0,167939	2,139692092	2,129051051	2,117915904	2,080424594	2,055048915
422	0,171433	2,08802707	2,077599305	2,06673186	2,030115976	2,005330543
423	0,174944	2,038359941	2,028138235	2,017528169	1,981754564	1,957537085
424	0,178473	1,99060238	1,980579788	1,970217231	1,93525419	1,911583332
425	0,182018	1,944670189	1,934840026	1,924715542	1,890532718	1,867388066
426	0,185578	1,90048313	1,890838961	1,880943529	1,847511878	1,824873892
427	0,18915	1,857964757	1,848500389	1,838825381	1,806117104	1,783967078
428	0,192734	1,81704225	1,80775172	1,798288884	1,766277368	1,744597394
429	0,196327	1,777646252	1,768523822	1,759265263	1,727925028	1,706697955
430	0,19993	1,739710713	1,730750857	1,721689021	1,690995664	1,670205068
431	0,203539	1,703172734	1,694370132	1,68549779	1,655427939	1,635058085
432	0,207154	1,667972422	1,659321952	1,650632182	1,621163445	1,601199256
433	0,210774	1,634052743	1,625549471	1,617035649	1,588146567	1,568573596
434	0,214396	1,601359387	1,592998562	1,584654341	1,556324348	1,537128744
435	0,21802	1,569840634	1,561617679	1,55343698	1,525646359	1,506814844
436	0,221644	1,539447228	1,531357734	1,523334732	1,496064576	1,477584415
437	0,225267	1,510132255	1,502171972	1,494301086	1,467533326	1,449392237
438	0,228888	1,481851025	1,474015859	1,466291737	1,440008844	1,422195237
439	0,232504	1,454560967	1,446846971	1,439264479	1,413449823	1,395952384
440	0,236116	1,428221515	1,420624884	1,413179101	1,387816656	1,370624586
441	0,239721	1,402794015	1,395311079	1,387997283	1,363071661	1,34617459
442	0,243318	1,378241624	1,370868845	1,363682502	1,339178927	1,322566895
443	0,246907	1,354529221	1,347263185	1,340199946	1,316104221	1,29976766
444	0,250485	1,331623321	1,324460736	1,317516421	1,293814905	1,27774462
445	0,254052	1,309491992	1,302429679	1,295600276	1,272279858	1,256467009
446	0,257607	1,288104776	1,281139668	1,274421322	1,251469396	1,235905484
447	0,261148	1,267432617	1,260561752	1,253950758	1,231355202	1,216032054
448	0,264674	1,247447789	1,240668309	1,234161104	1,211910256	1,196820008
449	0,268184	1,22812383	1,221432974	1,215026133	1,193108773	1,178243857
450	0,271677	1,209435481	1,202830581	1,196520809	1,174926136	1,160279269
451	0,275151	1,191358622	1,1848371	1,178621228	1,157338845	1,142903012
452	0,278607	1,173870217	1,167429583	1,161304559	1,140324453	1,1260929
453	0,282042	1,156948263	1,150586108	1,144548997	1,123861522	1,109827742
454	0,285457	1,140571734	1,134285732	1,128333704	1,107929567	1,094087288
455	0,288849	1,124720539	1,118508438	1,112638769	1,092509011	1,07885219
456	0,292218	1,10937547	1,103235092	1,097445158	1,077581142	1,064103952

Продолжение таблицы 11

457	0,295563	1,094518163	1,088447401	1,082734672	1,06312807	1,049824889
458	0,298882	1,080131055	1,074127871	1,068489908	1,049132686	1,035998092
459	0,302177	1,066197346	1,060259767	1,054694217	1,035578624	1,022607385
460	0,305444	1,052700964	1,046827078	1,041331674	1,022450226	1,009637291
461	0,308684	1,039626525	1,033814483	1,028387034	1,009732508	0,997073001
462	0,311895	1,026959305	1,021207315	1,015845709	0,997411129	0,98490034
463	0,315078	1,014685207	1,008991533	1,003693729	0,985472357	0,973105736
464	0,31823	1,002790731	0,99715369	0,991917719	0,973903043	0,961676194
465	0,321352	0,991262946	0,985680908	0,980504867	0,962690593	0,950599266
466	0,324443	0,980089465	0,974560848	0,969442898	0,951822942	0,939863029
467	0,327502	0,969258417	0,963781688	0,958720051	0,941288529	0,929456055
468	0,330528	0,958758424	0,953332097	0,948325054	0,931076273	0,919367395
469	0,33352	0,94857858	0,943201211	0,938247101	0,921175554	0,909586552
470	0,336479	0,938708429	0,933378618	0,928475832	0,911576189	0,90010346
471	0,339404	0,92913794	0,923854328	0,919001311	0,90226841	0,89090847
472	0,342293	0,919857497	0,914618764	0,909814009	0,893242853	0,881992323
473	0,345147	0,91085787	0,905662736	0,900904785	0,88449053	0,873346141
474	0,347965	0,902130207	0,896977425	0,892264866	0,876002822	0,864961402
475	0,350747	0,893666009	0,888554372	0,883885835	0,867771454	0,856829931
476	0,353491	0,885457122	0,880385453	0,875759613	0,859788485	0,84894388
477	0,356198	0,877495716	0,872462872	0,867878445	0,852046293	0,841295716
478	0,358867	0,869774276	0,864779146	0,860234883	0,84453756	0,833878207
479	0,361497	0,862285582	0,857327086	0,852821778	0,837255258	0,826684408
480	0,364089	0,855022704	0,850099789	0,845632264	0,830192639	0,81970765
481	0,366642	0,847978983	0,843090627	0,838659746	0,823343221	0,812941529
482	0,369155	0,841148025	0,836293231	0,831897888	0,816700777	0,806379891
483	0,371629	0,834523684	0,829701484	0,825340605	0,810259328	0,800016826
484	0,374063	0,82810006	0,823309507	0,818982049	0,804013125	0,793846655
485	0,376456	0,821871478	0,817111653	0,812816603	0,797956649	0,787863922
486	0,378808	0,81583249	0,811102496	0,806838868	0,792084593	0,782063385
487	0,38112	0,809977856	0,80527682	0,801043656	0,786391858	0,776440005
488	0,38339	0,804302545	0,799629613	0,795425981	0,780873546	0,770988941
489	0,385619	0,798801718	0,794156059	0,789981052	0,775524947	0,765705539
490	0,387807	0,793470726	0,78885153	0,784704263	0,770341536	0,760585329
500	0,407355	0,748599734	0,744204504	0,740290772	0,726714845	0,717491232
510	0,422596	0,648599734	0,644204504	0,640290772	0,626714845	0,617491232

Выводы по 2-му разделу бакалаврской работы

Тепловой расчет показал значительное влияние изменения времени сечения клапанов, за счет применения системы регулирования фазами ГРМ на мощностные и экономические характеристики работы двигателя. Получено, что для эффективного использования двигателя с системой регулирования фазами ГРМ требуется проводить дополнительную оптимизацию процесса сгорания по углу опережения зажигания. Но даже без этого удалось достичь почти 15% увеличения мощности, что является весьма значимым результатом.

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 37,8 мм, а длина шатуна 132,3 мм) проводился по известным методикам приведенным в [1,2], при частоте вращения коленчатого вала 6000 мин^{-1} .

Результаты расчета перемещения, скорости и ускорения поршня приведены на рисунках 14, 15 и 16.

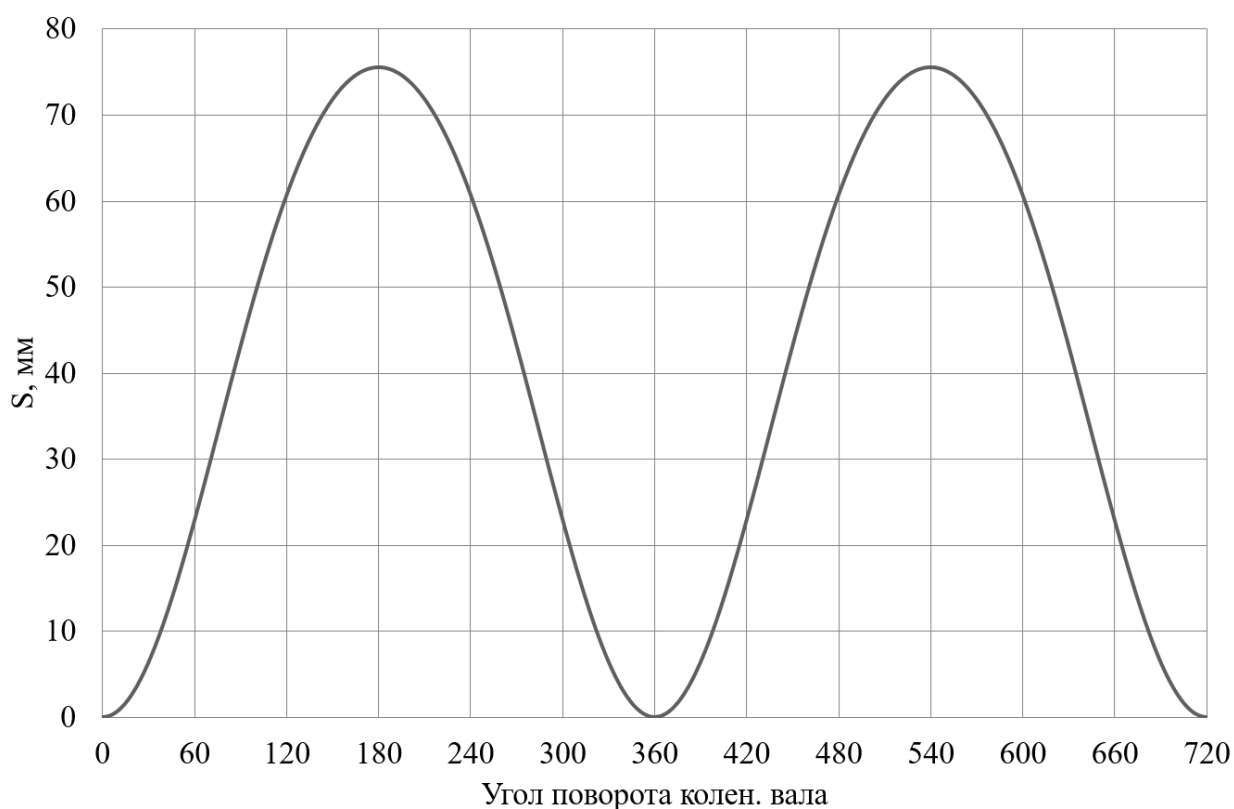


Рисунок 14 – Диаграмма изменения хода поршня

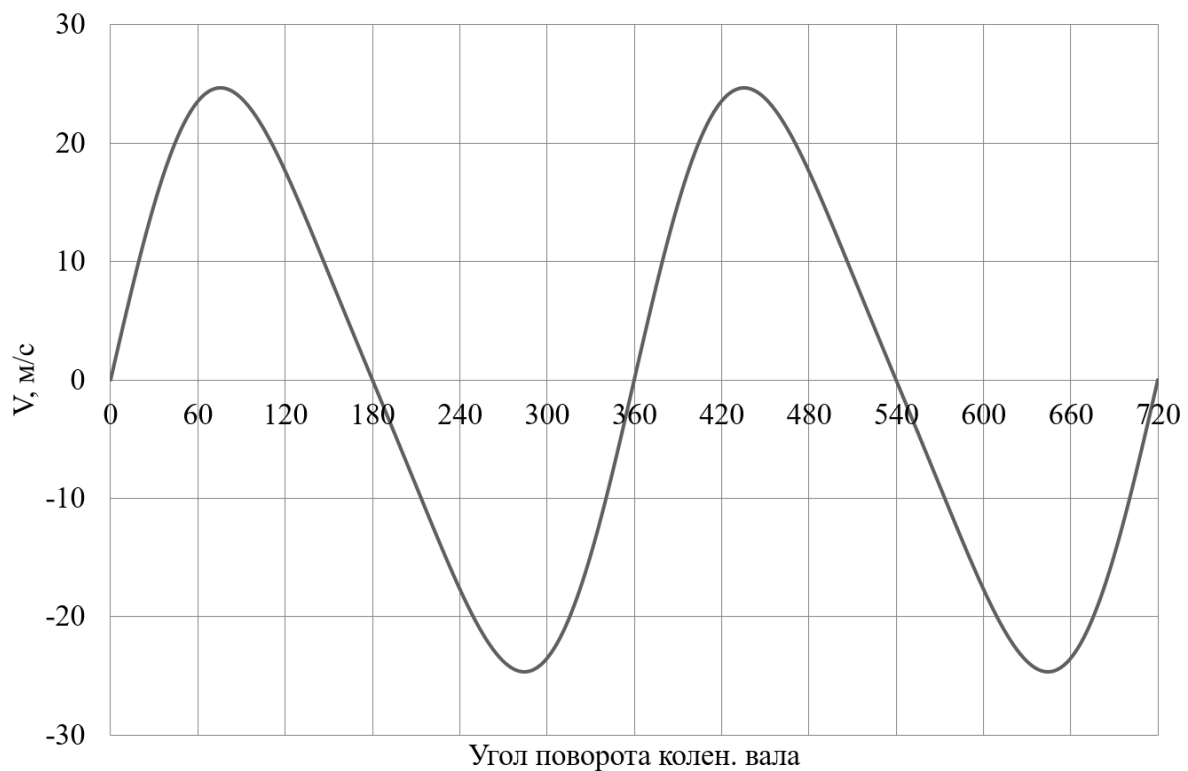


Рисунок 15 – Диаграмма изменения скорости поршня

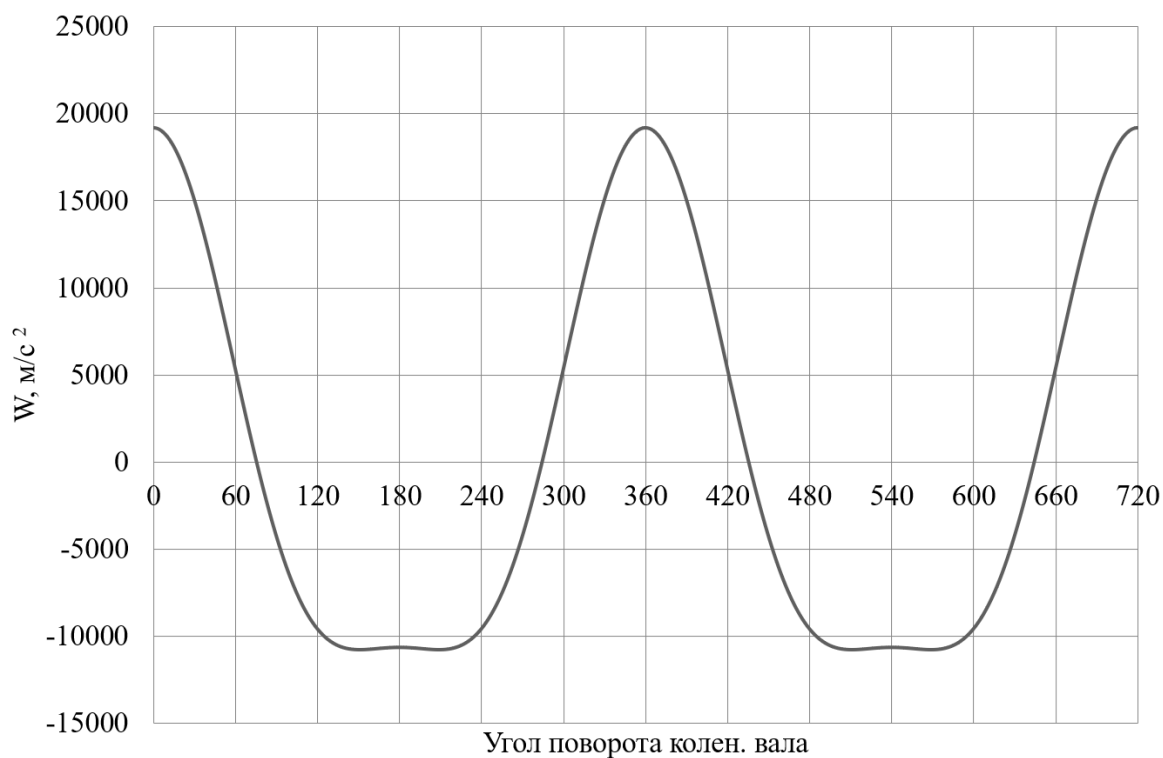


Рисунок 16 – Диаграмма изменения ускорения поршня

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 6000 мин^{-1} , для условий работы в базовом варианте двигателя и при использовании системы регулирования фазами ГРМ, соответственно.

Результаты приведение масс кривошипно-шатунного механизма по двух массовой схеме показаны в таблице 12.

Таблица 12 – Приведение масс кривошипно-шатунного механизма

Параметр	Величина
Площадь поршня, м^2	0,00528102
Удельная масса поршня, $\text{кг}/\text{м}^2$	80
Масса поршневой группы, кг	0,42248
Удельная масса шатуна, $\text{кг}/\text{м}^2$	130
Масса шатуна, кг	0,68653
Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца, кг	0,189
Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа, кг	0,49774
Удельная масса одного колена вала, $\text{кг}/\text{м}^2$	125
Масса неуравновешенных частей одного колена вала, кг	0,6601
Массы, совершающие возвратно-поступательное движение	0,611
Массы, совершающие вращательное движение	1,15786
Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна, Н	-7427,63
Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа, Н	-9851
Центробежная сила инерции вращающихся масс, Н	-17279

Результаты расчета приведены в виде графиков. На рисунке 17 приведены силы инерции возвратно-поступательного движения.

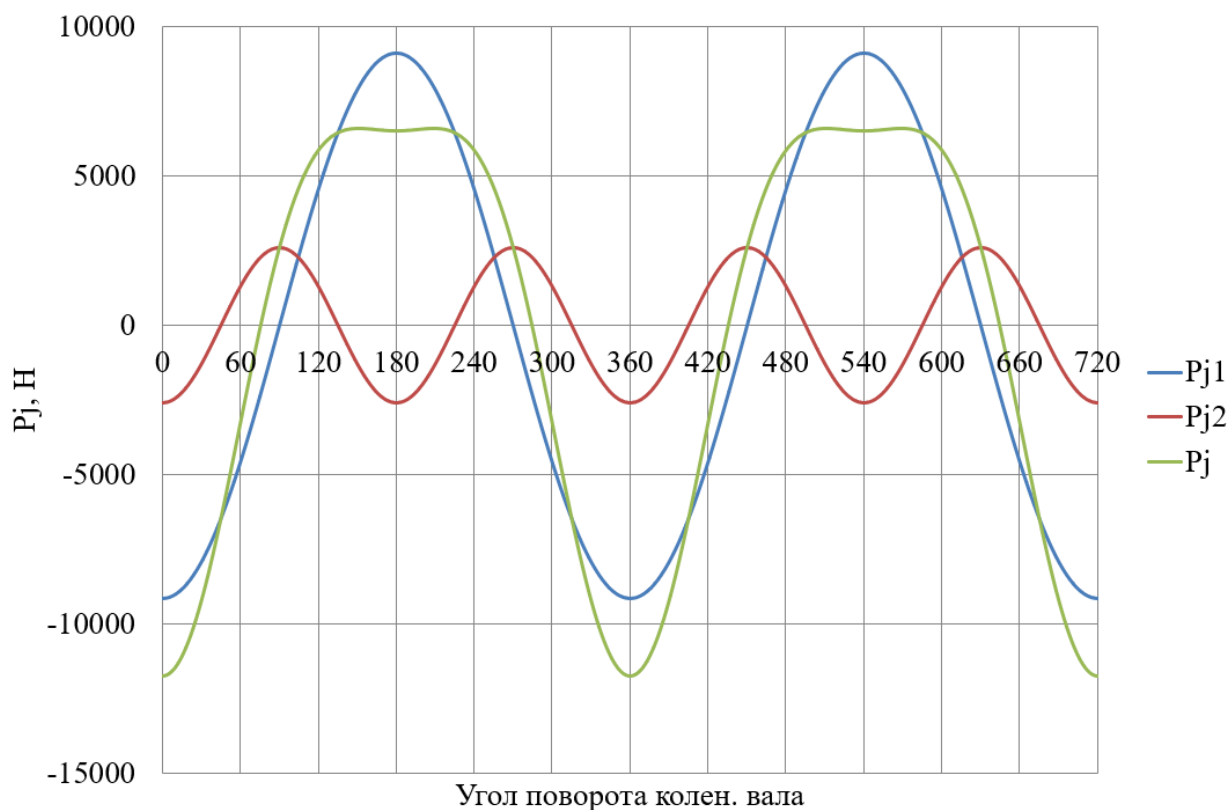


Рисунок 17 – Силы инерции возвратно-поступательного движения поршня и шатуна

На рисунке 18 приведено сравнение суммарных сил, действующих на поршневой палец двигателя при работе в базовом варианте двигателя и при использовании системы регулирования фазами ГРМ.

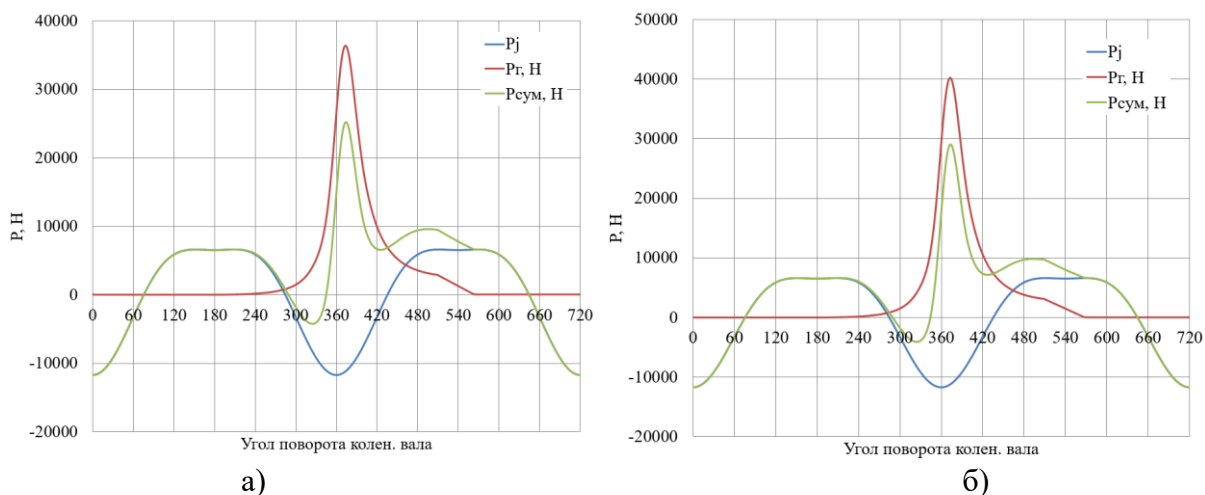


Рисунок 18 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец двигателя: (а) базовый двигатель и (б) с системой регулирования фазами ГРМ

На рисунке 19 приведено сравнение сил, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки в базовом варианте двигателя и при

использовании системы регулирования фазами ГРМ. Видим, увеличение наполнения приводит к увеличению изгибающих коленчатый вал сил на 5000 Н.

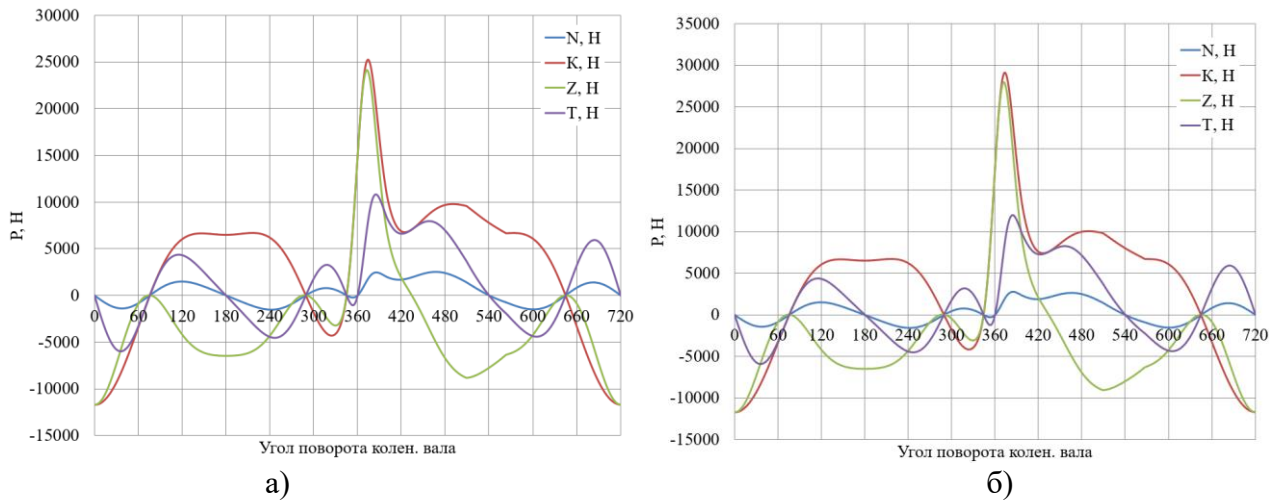


Рисунок 19 – Силы, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки двигателя: (а) базовый двигатель и (б) с системой регулирования фазами ГРМ

На рисунке 20 приведено сравнение крутящего момента двигателя в базовом варианте двигателя и при использовании системы регулирования фазами ГРМ.

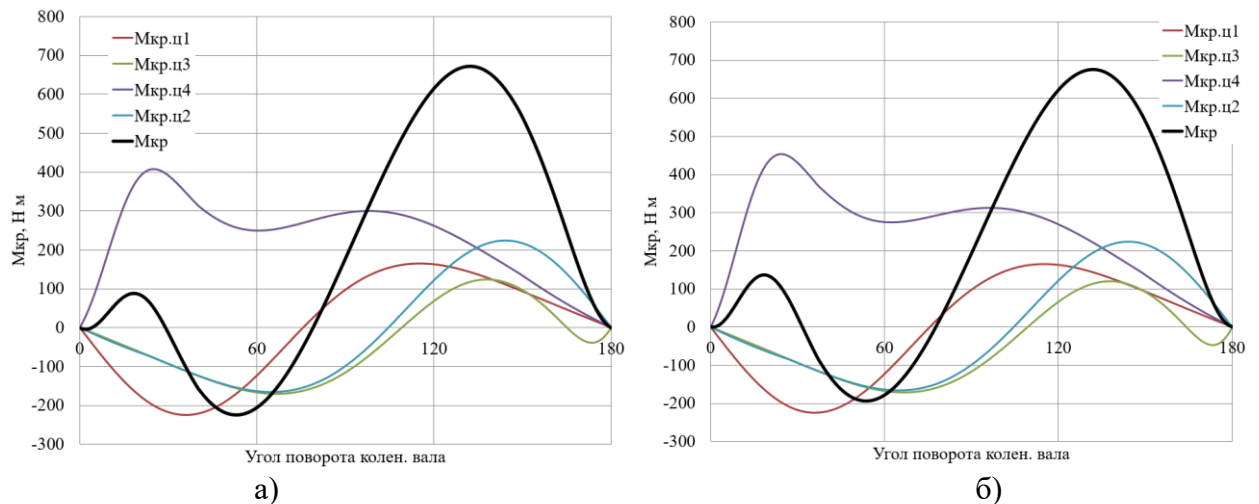


Рисунок 20 – График крутящего момента: (а) базовый двигатель и (б) с системой регулирования фазами ГРМ

Расчет основных сил и моментов, действующих в КШМ, показал, что наибольшую проблему вызывает рост изгибающих шейки коленчатого вала сил. Для оценки прочностных параметров рассчитаем нагрузки, действующие на колено вала.

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

На рисунке 21 приведено сравнение суммарной силы, действующую на шатунную шейку в прямоугольных координатах в базовом варианте двигателя и при использовании системы регулирования фазами ГРМ. Видим, что с улучшением наполнения вследствие использования регулятора фазами ГРМ резко возрастают нагрузки в зоне пикового давления 350 – 380 градусов ПКВ. Рост нагрузки составляет 5000 Н, что составляет 30% нагрузки при работе базового двигателя.

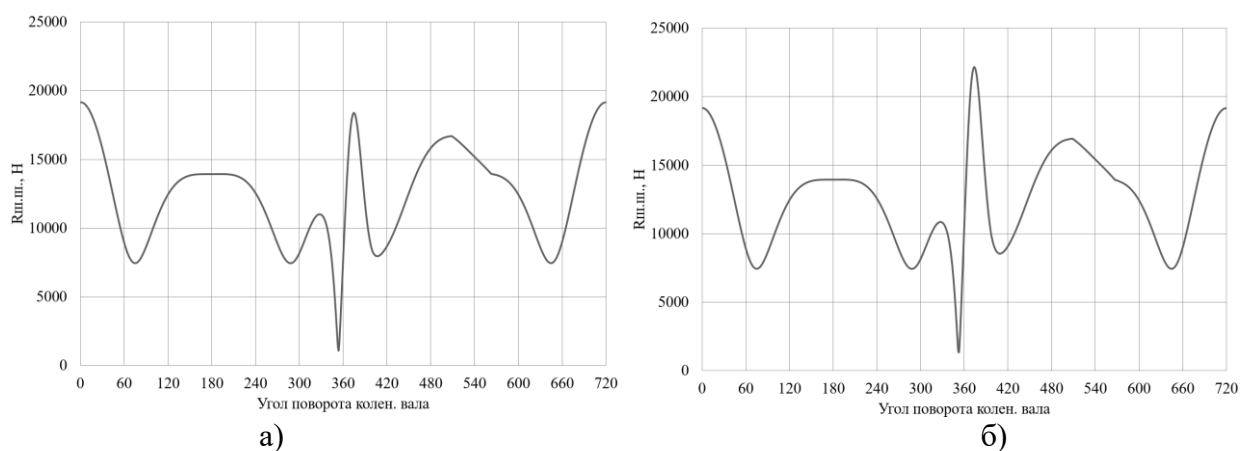


Рисунок 21 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку: (а) базовый двигатель и (б) с системой регулирования фазами ГРМ

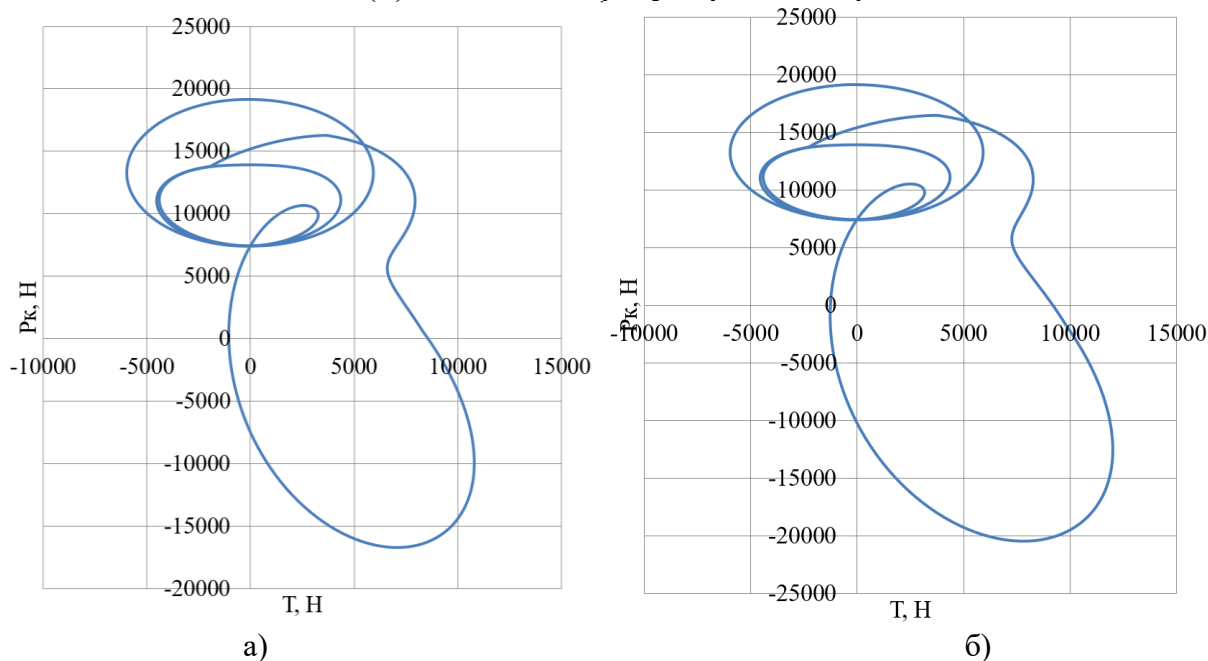


Рисунок 22 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку в полярных координатах: (а) базовый двигатель и (б) с системой регулирования фазами ГРМ

На рисунке 22 приведено сравнение суммарной силы, действующую на шатунную шейку в полярных координатах в базовом варианте двигателя и при использовании системы регулирования фазами ГРМ. Видим, что с улучшением наполнения, происходит рост нагрузки на одном лишь участке шатунной шейки.

На рисунке 23 приведено сравнение суммарных сил, действующих на коренные шейки в прямоугольных координатах в базовом варианте двигателя и при использовании системы регулирования фазами ГРМ.

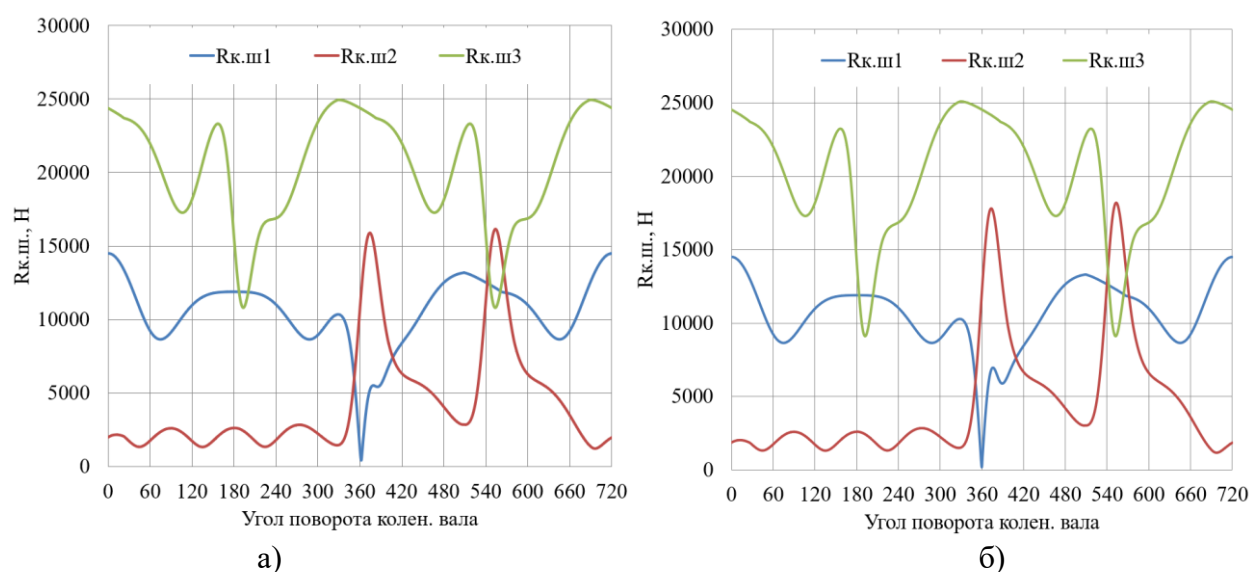


Рисунок 23 – Суммарные силы, действующие на коренные шейки в прямоугольных координатах: (а) базовый двигатель и (б) с системой регулирования фазами ГРМ

Видим, что с улучшением наполнения, также растут нагрузки в зонах действия максимального давления. Видно, что имеются зоны низких нагрузок в независимости от степени охлаждения наддвочного воздуха, в этой зоне и рекомендуется расположить ось масляного канала.

На рисунке 24 приведено сравнение суммарных сил, действующих на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при работе в базовом варианте двигателя и при использовании системы регулирования фазами ГРМ. Видим, что с улучшением наполнения, значительно возрастают нагрузки на одну часть коренной шейки, что позволяет для повышения износостойкости провести целевое упрочнение этой более нагруженной части коренной

шейки. Видно, что имеются зоны низких нагрузок на коренную шейку, в этой зоне и рекомендуется расположить ось масляного канала.

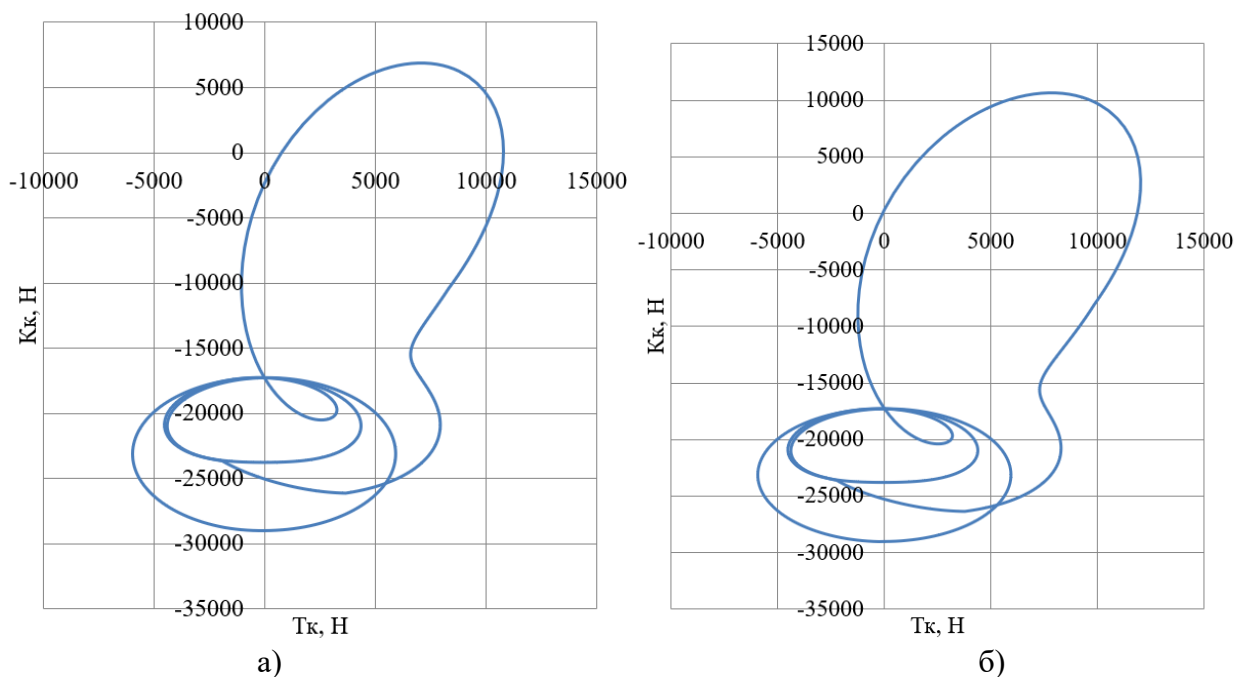


Рисунок 24 – Суммарные силы, действующие на 1-ю коренную шейку в полярных координатах: (а) базовый двигатель и (б) с системой регулирования фазами ГРМ

Выводы по 3-му разделу

Как мы видим повышение наполнения цилиндра вследствие улучшения условий впуска при регулировании фазами ГРМ не приводит к значительному росту нагрузок и принципиальным сложностям, связанным со снижением ресурса элементов кривошипно-шатунного механизма. Имеются локальные постоянные зоны повышенных нагрузок, с углом повышенного нагружения примерно в 40 градусов ПКВ. Узость зоны повышенных нагрузок позволяет, говорить об возможности эффективного локального упрочнения, что позволяет не повышать значительно габариты элементов КШМ.

4 Анализ влияния системы регулирования фазами ГРМ на рабочий процесс ДВС

4.1 Влияния системы регулирования фазами ГРМ на максимальную температуру и давление цикла

Сравнивая величины максимального давления и максимальной температуры в цилиндре двигателя (рисунок 25), следует отметить повышение максимальной температуры цикла более 3000 К для условий применения системы регулирования фазами ГРМ, а также значения максимального давления в цилиндре двигателя в районе 8,5 МПа для степени сжатия 10,5. Это говорит о возможности проведения нормального процесса сгорания без угрозы возникновения детонации.

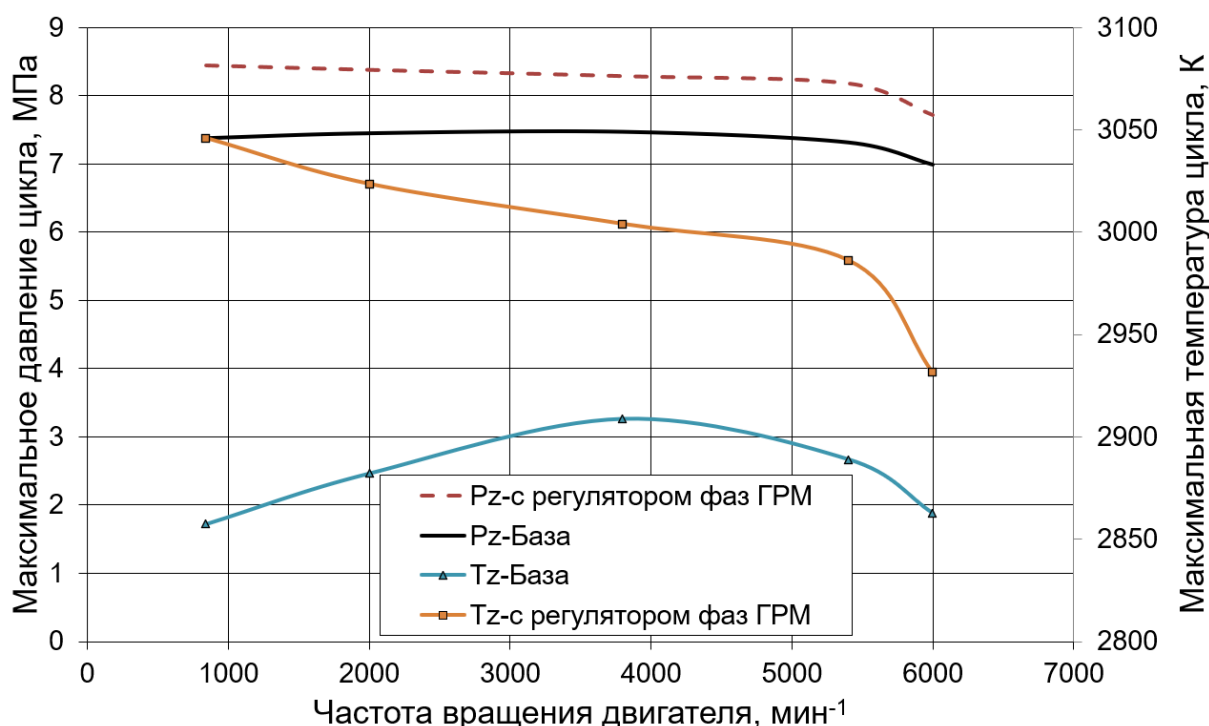


Рисунок 25 – Сравнение величины максимального давления и максимальной температуры в цилиндре двигателя при работе в базовом варианте и с системой регулирования фазами ГРМ.

Для оценки токсичности проведем сравнение изменения температуры в процессе сгорания (рисунки 26 – 30).

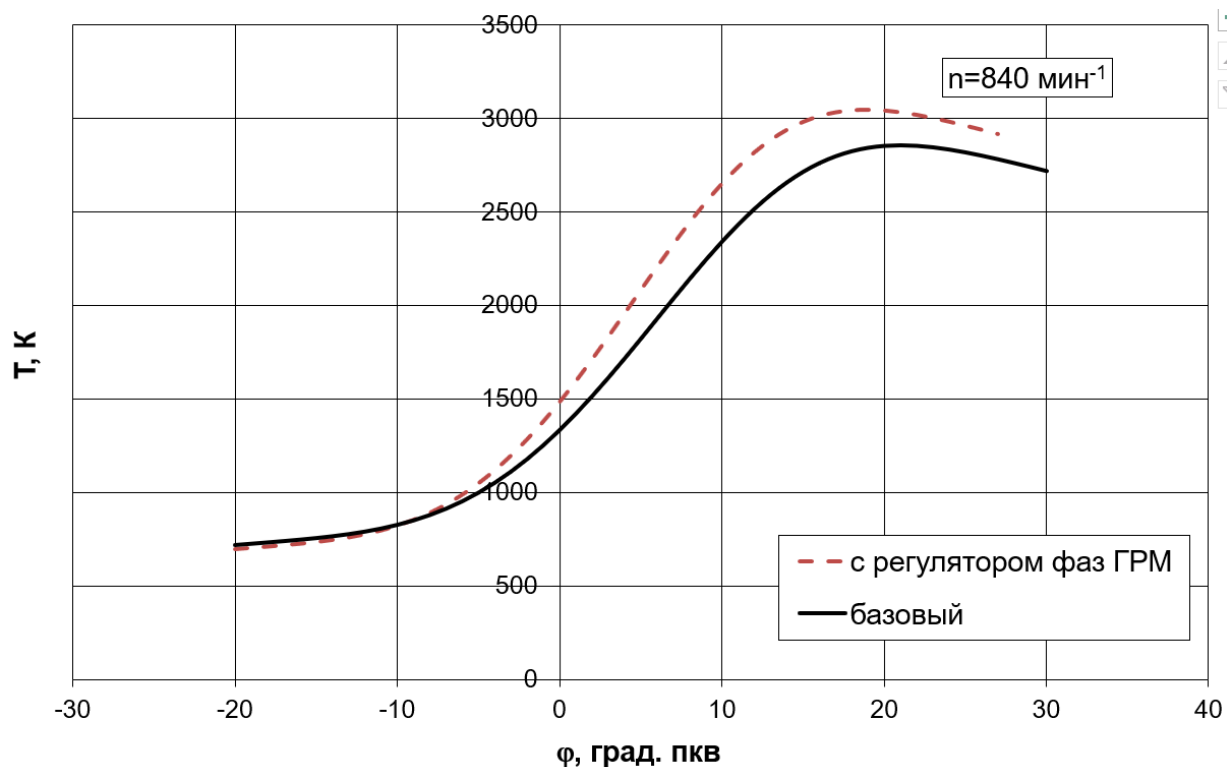


Рисунок 26 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 840 мин^{-1}

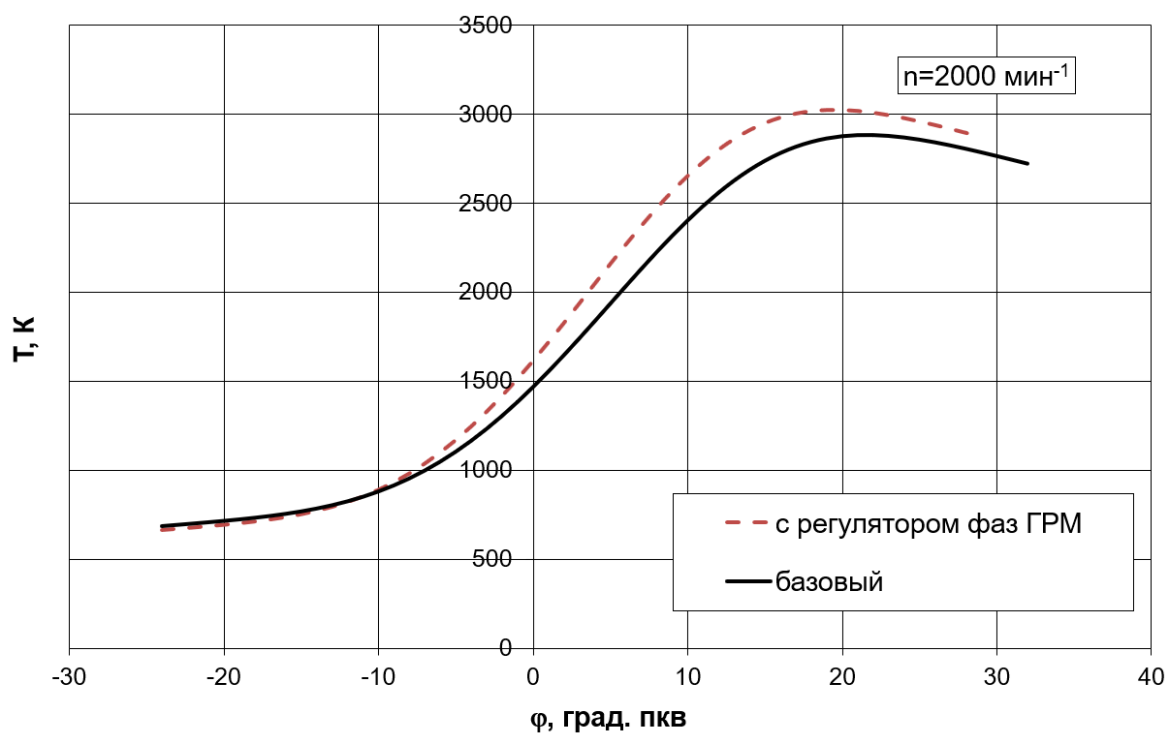


Рисунок 27 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 2000 мин^{-1}

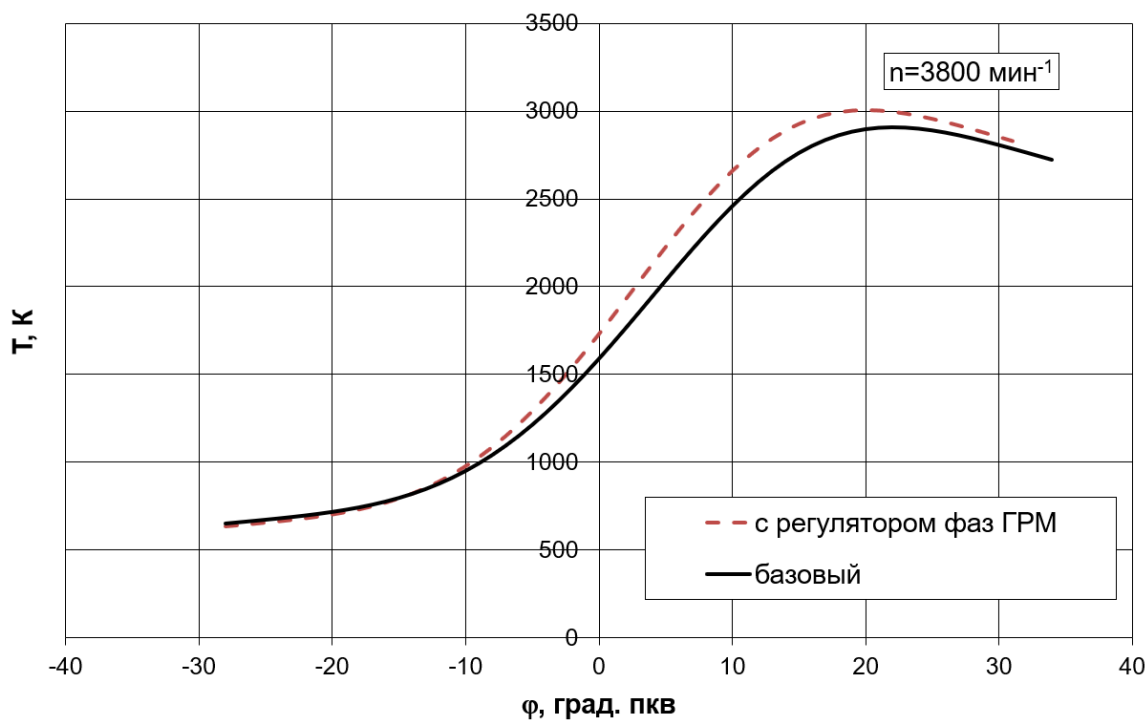


Рисунок 28 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 3400 мин^{-1}

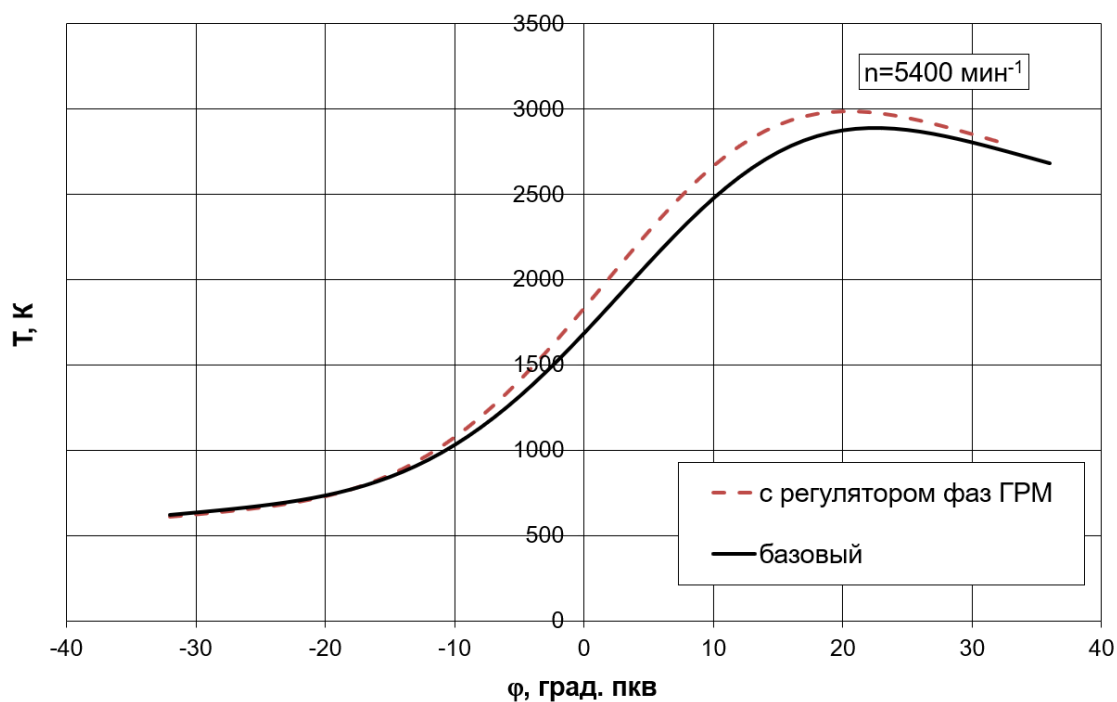


Рисунок 29 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 4800 мин^{-1}

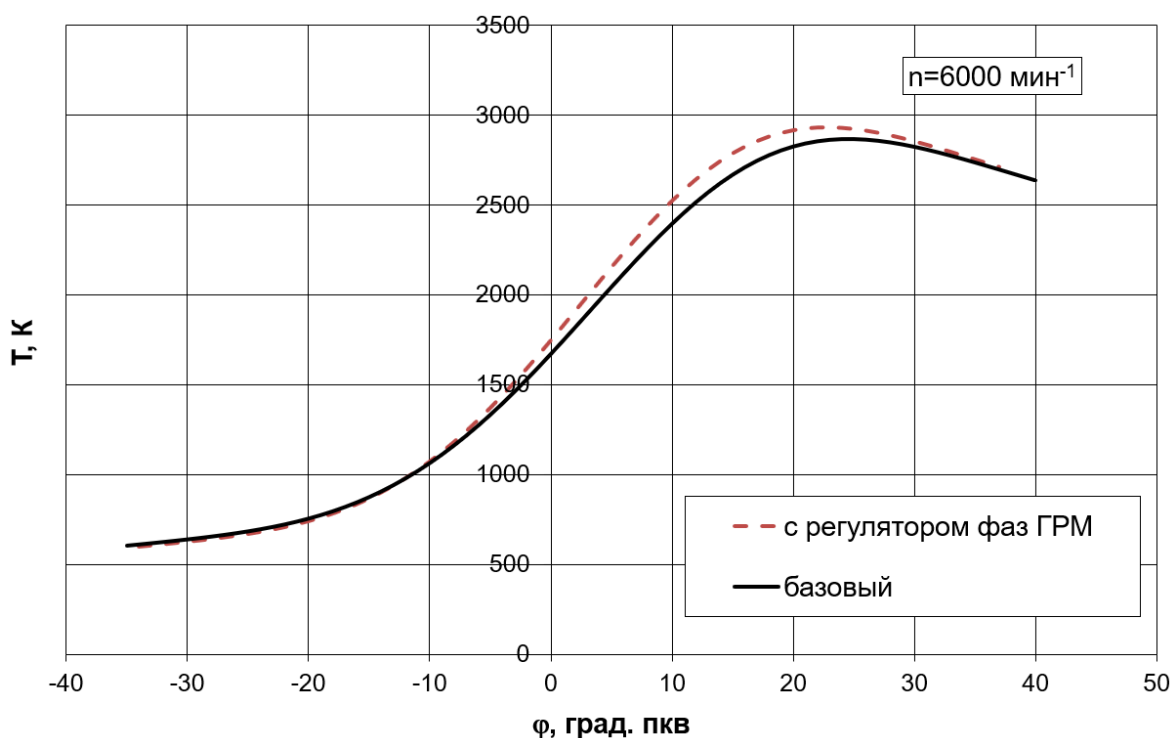


Рисунок 30 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 5200 мин⁻¹

Проводя анализ средней температуры в цилиндре двигателя во время сгорания по рисункам 26 – 30, и её влияние на условия образования токсичных компонентов можно отметить, что применение регулятора фаз ГРМ повышает температуру цикла, что не может не сказаться на увеличении выбросов термических оксидов азота. В тоже время рассматривая условия образования продуктов неполного сгорания отметим практически незначительное влияние на снижение оксидов углерода, и за счет большего давления возможно некоторое увеличение концентрации несгоревших углеводородов в зажатых объемах (зонах гашения) и пристеночном слое. Хотя если рассматривать пристеночный слой, то здесь количество несгоревших углеводородов должно остаться примерно на базовом уровне, вследствие большей температуры цикла, которая снижает толщину пристеночного слоя, но в тоже время увеличение давления увеличивает плотность этого слоя.

4.2 Влияния системы регулирования фазами ГРМ на эффективные показатели цикла

Проводить анализ эффективных показателей работы двигателя правильнее всего по графическому изображению внешней скоростной характеристики (рисунки 31, 32 и 33).

На рисунке 31 представлен графический анализ влияния изменения условий наполнения на характеристики наполнения. Видно, что применение системы регулирования фазами ГРМ привело к улучшению наполнения почти на 10%, что особенно важно при работе на повышенной частоте вращения коленчатого вала.

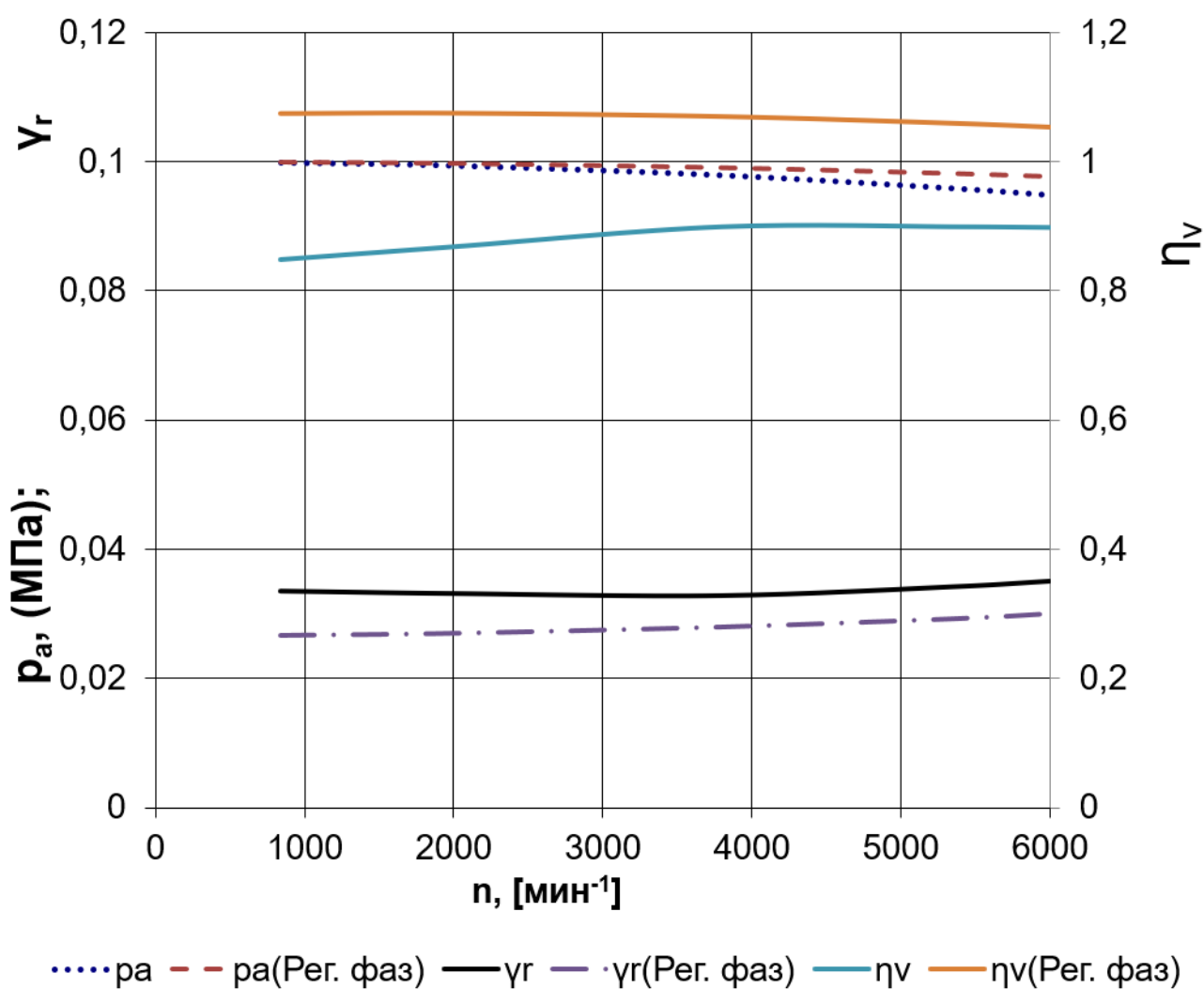


Рисунок 31 – Сравнение характеристик условий наполнения базового двигателя и с системой регулирования фазами ГРМ

Для базового двигателя на рисунке 32 представлена внешняя скоростная характеристика, где наблюдаем снижение крутящего момента при увеличении частоты вращения.

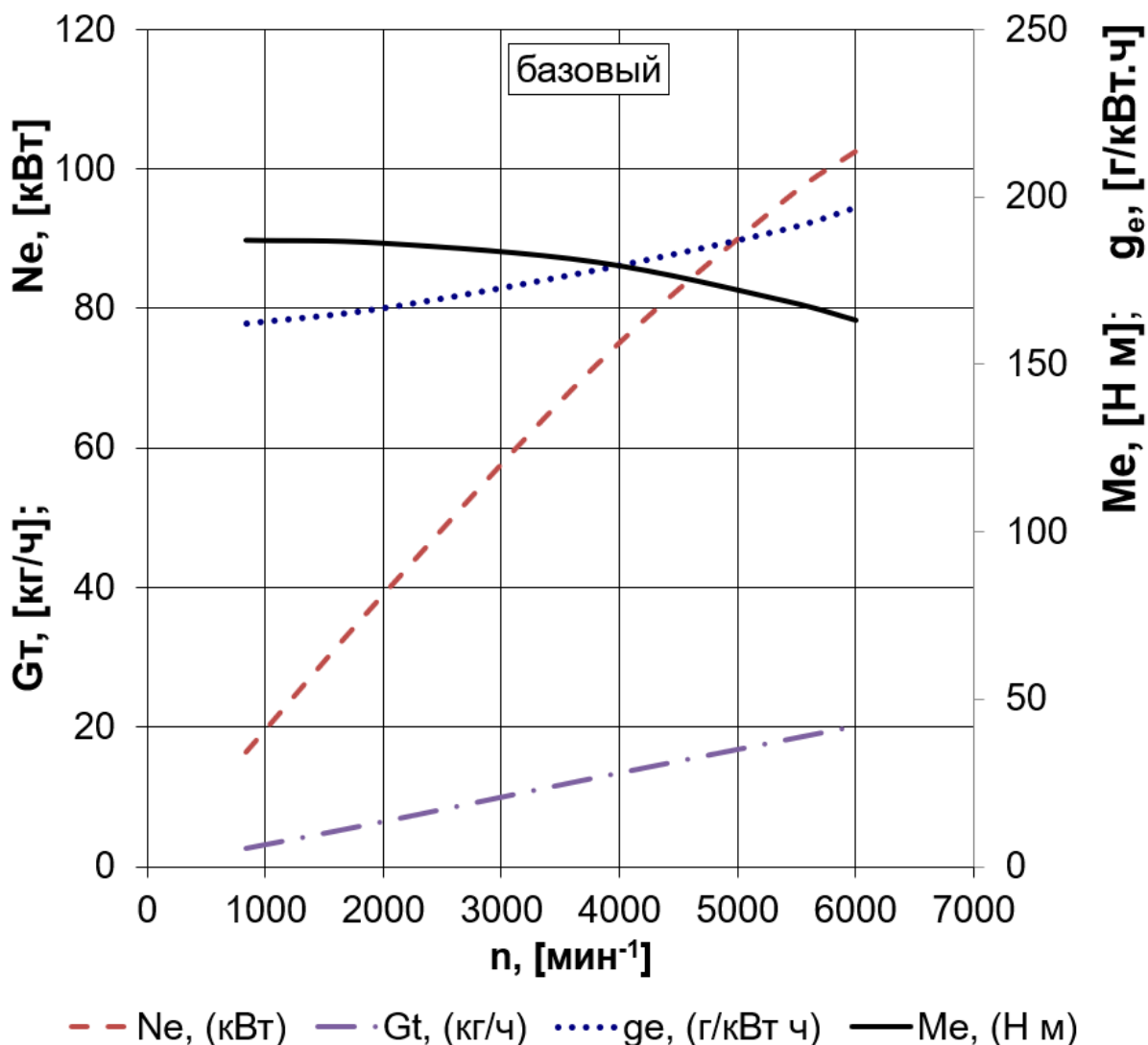


Рисунок 32 – Внешняя скоростная характеристика атмосферного базового двигателя

Для двигателя с системой регулирования фазами ГРМ (рисунок 33), видим снижение влияния частоты вращения на эффективные характеристики работы, при этом получаем в среднем 5% увеличение мощностных показателей.

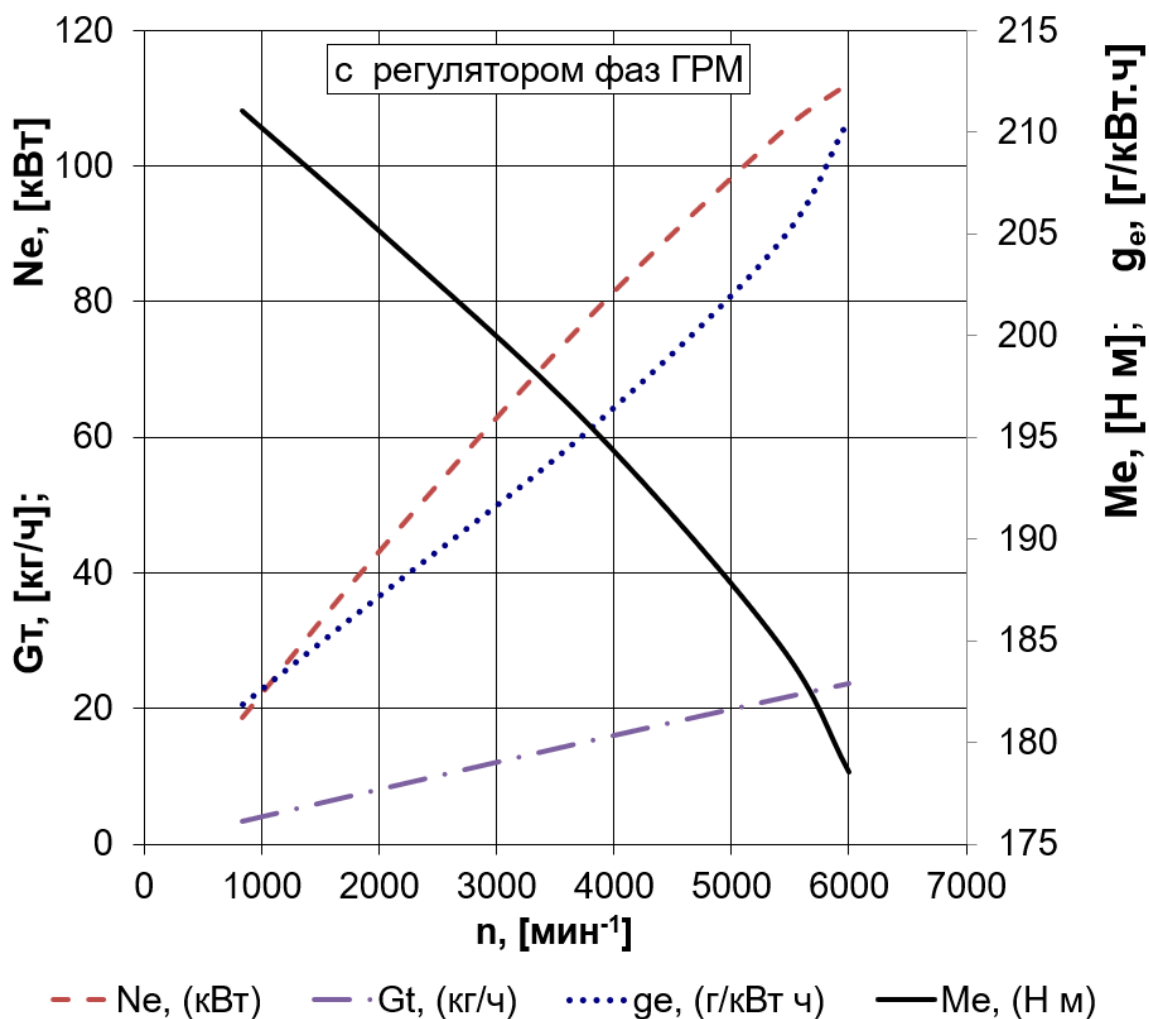


Рисунок 33 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с системой регулирования фазами ГРМ

Для двигателя системой регулирования фазами ГРМ, видим возможности для некоторого выравнивания характеристик работы двигателя именно при повышении частоты вращения. Это связано с тем, что с повышением частоты вращения, при расширении границы детонации, имеется возможность применения более оптимальных углов опережения зажигания и работа в более термически нагруженных условиях, что эффективно сказывается на условиях тепловых потерь.

Выводы по 4-му разделу

Проведенный анализ показал, что для эффективной работы двигателя с системой регулирования фазами ГРМ необходимо осуществлять грамотное регулирование углом опережения зажигания.

5 Расчет механизма газораспределения

Из теплового расчета имеем:

- Диаметр цилиндра $D=82$ мм;
- Площадь поршня $F=54,5$ см²;
- Частоту вращения при номинальной мощности $n_N=6000$ об/мин;
- Угловую скорость вращения коленчатого вала $\omega=753$ рад/с;
- Среднюю скорость поршня $v_{п.ср}=17,9$ м/с;
- Скорость смеси в проходном сечении седла при максимальном подъеме впускного клапана $v_{вп}=15$ м/с;
- Угол предварения открытия впускного клапана $\varphi_{пр}=34^0$;
- Угол запаздывания закрытия впускного клапана $\varphi_{пр}=74^0$;
- Механизм газораспределения верхнеклапанный с верхним расположением распределительного вала.

5.1 Основные размеры проходных сечений в горловине и в клапане

Площадь проходного сечения при максимальном подъеме

$$F_{кл} = v_{н.ср} F_n / \omega_{\text{вп}} = 17,9 \cdot 54,5 / 140 = 5,85 \text{ см}^2 \quad (1)$$

диаметр горловины клапана

$$d_{гор} = \sqrt{4F_{гор} / \pi} = \sqrt{4 \cdot 11,026 / 3,14} = 3,75 \text{ см}, \quad (2)$$

где $F_{гор}=1,12F_{кл}=1,12 \cdot 5,85=7,026$ см².

Максимальная высота подъема клапана при угле фаски клапана $\alpha=45^0$.

$$\begin{aligned} h_{кл\text{ макс}} &= \sqrt{4,93d_{гор}^2 + 4,44F_{кл}} / 2,22 - d_{гор} = \\ &= \sqrt{4,93 \cdot 34,23^2 + 4,44 \cdot 9,85} / 2,22 - 34,23 = 10,6 \text{ мм} \end{aligned} \quad (3)$$

5.2 Основные размеры впускного кулачка

Радиус начальной окружности $r_0=(1,3\dots 2,0)h_{кл\ max}=1,9\cdot 10,6=20,1$ мм; принимаем $r_0=20$ мм; максимальный подъем толкателя $h_{т\ max}=h_{кл\ max}=10,6$ мм, в данном механизме роль толкателя выполняет гидравлический толкатель, находящийся непосредственно в контакте с кулачком.

5.3 Профилирование безударного кулачка с плоским толкателем

Температурный зазор между клапаном и толкателем принимаем $\Delta s=0,2$ мм, а затем определяем радиус окружности тыльной части кулачка.

Протяженность участка сбega

$$\Phi_0 = \frac{\pi^2 \Delta s}{2 \cdot 180 \omega_{ток}} = \frac{3,14 \cdot 0,2}{2 \cdot 180 \cdot 0,02} = 0,27416 \text{ рад} = 15^{\circ}42', \quad (4)$$

где $\omega_{ток}=0,02$ мм/0 – скорость толкателя в конце сбega, принята в пределах, рекомендованных для безударных кулачков.

Протяженность других участков ускорения толкателя: $\Phi_1=24^{\circ}$; $\Phi_2=5^{\circ}7'$; $\Phi_3=42^{\circ}23'$.

В ДВС кулачки с приводом клапанного механизма через толкатель, должны профилироваться методом "полидайн".

В этом случае перемещение толкателя задается полиномом:

$$h_T = h_{T\max} \left[1 + C_2 \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^2 + C_p \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^p + C_q \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^q + C_r \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^r + C_s \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^s \right]. \quad (5)$$

В соответствии с этим определяют его скорость и ускорение:

$$V_T = h_{T\max} \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right) \left[2C_2 \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right) + pC_p \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^{p-1} + qC_q \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^{q-1} + rC_r \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^{r-1} + sC_s \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^{s-1} \right] \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

$$j_T = h_{T\max} \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right) \left[2C_2 + p(p-1)C_p \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^{p-2} + q(q-1)C_q \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^{q-2} + r(r-1)C_r \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^{r-2} + s(s-1)C_s \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_{p0}} \right)^{s-2} \right] \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

Угол φ_k в интервале $\varphi_{p0} \leq \varphi_k \leq 0$ отсчитывается от вершины кулачка.

Постоянные коэффициенты C_2 , C_p , C_r , C_s определяются следующим образом:

$$C_2 = -\frac{pqrs}{(p-2)(q-2)(r-2)(s-2)}; \quad (8)$$

$$C_2 = \frac{2qrs}{(p-2)(q-p)(r-p)(s-p)}; \quad (9)$$

$$C_2 = -\frac{2prs}{(q-2)(q-p)(r-q)(s-q)}; \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{2pqs}{(r-2)(r-p)(r-q)(s-r)}; \quad (11)$$

$$C_2 = -\frac{2pqr}{(s-2)(s-p)(s-q)(s-r)}. \quad (12)$$

Параметры p , q , r , s обычно выбирают по закону возрастающей арифметической прогрессии с разностью $p - 2$.

Радиус кривизны профиля кулачка при плоском толкателе.

$$\rho = r_k - h_T + j_T, \quad (13)$$

Показатель смазочного числа, характеризует устойчивость к износу, не должен превышать значения 0,15.

$$\rho_1 = \frac{1}{\rho}, \quad (14)$$

Данные расчета представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Профилирование безударного кулачка с плоским толкателем

φ^0 , Г.п.р.в.	h_T , мм	V_T , м/с	j_T , м/с ²	ρ	ρ_1	φ^0 , Г.п.р.в.	h_T , мм	V_T , м/с	j_T , м/с ²	ρ	ρ_1
-72	0,0000	0,0000	0,0000	19,8000	0,0505	-2	10,5415	0,0039	-0,5658	8,6927	0,1150
-70	0,0003	0,0002	0,1178	19,9175	0,0502	0	10,5547	0,0000	-0,5658	8,6795	0,1152
-66	0,0410	0,0081	1,1026	20,8616	0,0479	4	10,5019	-0,0077	-0,5658	8,7322	0,1145
-62	0,2799	0,0284	1,7249	21,2450	0,0471	8	10,3438	-0,0154	-0,5658	8,8904	0,1125
-60	0,5140	0,0402	1,7071	20,9931	0,0476	10	10,2251	-0,0193	-0,5658	9,0090	0,1110
-58	0,8270	0,0513	1,5285	20,5016	0,0488	12	10,0801	-0,0232	-0,5658	9,1541	0,1092
-56	1,2108	0,0608	1,2569	19,8461	0,0504	14	9,9087	-0,0270	-0,5658	9,3255	0,1072
-54	1,6531	0,0684	0,9499	19,0968	0,0524	16	9,7110	-0,0309	-0,5657	9,5233	0,1050
-52	2,1397	0,0738	0,6482	18,3085	0,0546	20	9,2365	-0,0386	-0,5651	9,9984	0,1000
-50	2,6565	0,0773	0,3759	17,5194	0,0571	22	8,9597	-0,0425	-0,5643	10,2760	0,0973
-48	3,1911	0,0791	0,1444	16,7533	0,0597	24	8,6566	-0,0463	-0,5627	10,5806	0,0945
-46	3,7325	0,0794	-0,0437	16,0238	0,0624	26	8,3274	-0,0502	-0,5600	10,9127	0,0916

Продолжение таблицы 13

-44	4,2721	0,0786	-0,1910	15,3369	0,0652	28	7,9720	-0,0540	-0,5552	11,2728	0,0887
-42	4,8029	0,0768	-0,3030	14,6941	0,0681	30	7,5908	-0,0577	-0,5474	11,6618	0,0857
-40	5,3197	0,0745	-0,3857	14,0946	0,0709	32	7,1841	-0,0614	-0,5350	12,0809	0,0828
-38	5,8186	0,0716	-0,4453	13,5361	0,0739	34	6,7525	-0,0650	-0,5158	12,5317	0,0798
-36	6,2969	0,0684	-0,4872	13,0160	0,0768	36	6,2969	-0,0684	-0,4872	13,0160	0,0768
-34	6,7525	0,0650	-0,5158	12,5317	0,0798	38	5,8186	-0,0716	-0,4453	13,5361	0,0739
-32	7,1841	0,0614	-0,5350	12,0809	0,0828	40	5,3197	-0,0745	-0,3857	14,0946	0,0709
-30	7,5908	0,0577	-0,5474	11,6618	0,0857	42	4,8029	-0,0768	-0,3030	14,6941	0,0681
-28	7,9720	0,0540	-0,5552	11,2728	0,0887	44	4,2721	-0,0786	-0,1910	15,3369	0,0652
-26	8,3274	0,0502	-0,5600	10,9127	0,0916	46	3,7325	-0,0794	-0,0437	16,0238	0,0624
-24	8,6566	0,0463	-0,5627	10,5806	0,0945	48	3,1911	-0,0791	0,1444	16,7533	0,0597
-22	8,9597	0,0425	-0,5643	10,2760	0,0973	50	2,6565	-0,0773	0,3759	17,5194	0,0571
-20	9,2365	0,0386	-0,5651	9,9984	0,1000	52	2,1397	-0,0738	0,6482	18,3085	0,0546
-16	9,7110	0,0309	-0,5657	9,5233	0,1050	56	1,2108	-0,0608	1,2569	19,8461	0,0504
-14	9,9087	0,0270	-0,5658	9,3255	0,1072	58	0,8270	-0,0513	1,5285	20,5016	0,0488
-12	10,0801	0,0232	-0,5658	9,1541	0,1092	60	0,5140	-0,0402	1,7071	20,9931	0,0476
-10	10,2251	0,0193	-0,5658	9,0090	0,1110	62	0,2799	-0,0284	1,7249	21,2450	0,0471
-8	10,3438	0,0154	-0,5658	8,8904	0,1125	66	0,0410	-0,0081	1,1026	20,8616	0,0479
-6	10,4360	0,0116	-0,5658	8,7981	0,1137	70	0,0003	-0,0002	0,1178	19,9175	0,0502
-4	10,5019	0,0077	-0,5658	8,7322	0,1145	72	0,0000	0,0000	0,0000	19,8000	0,0505

Диаграммы перемещения, скорости и ускорения толкателя представлены в графической части дипломного проекта.

5.4 Время сечения клапана

Исходные данные базового двигателя:

- $d_{гор}$ – диаметр горловины впускного клапана, мм 26
- d – диаметр впускного клапана, мм – 29
- $h_{кл}$ – высота подъема клапана, мм – 7,6
- a – угол фаски впускного клапана – 45
- n – частота вращения коленчатого вала 6000

Условия расчета приведены на рисунке 34.

Результаты расчета по формулам приведенным ниже сведем в таблицу

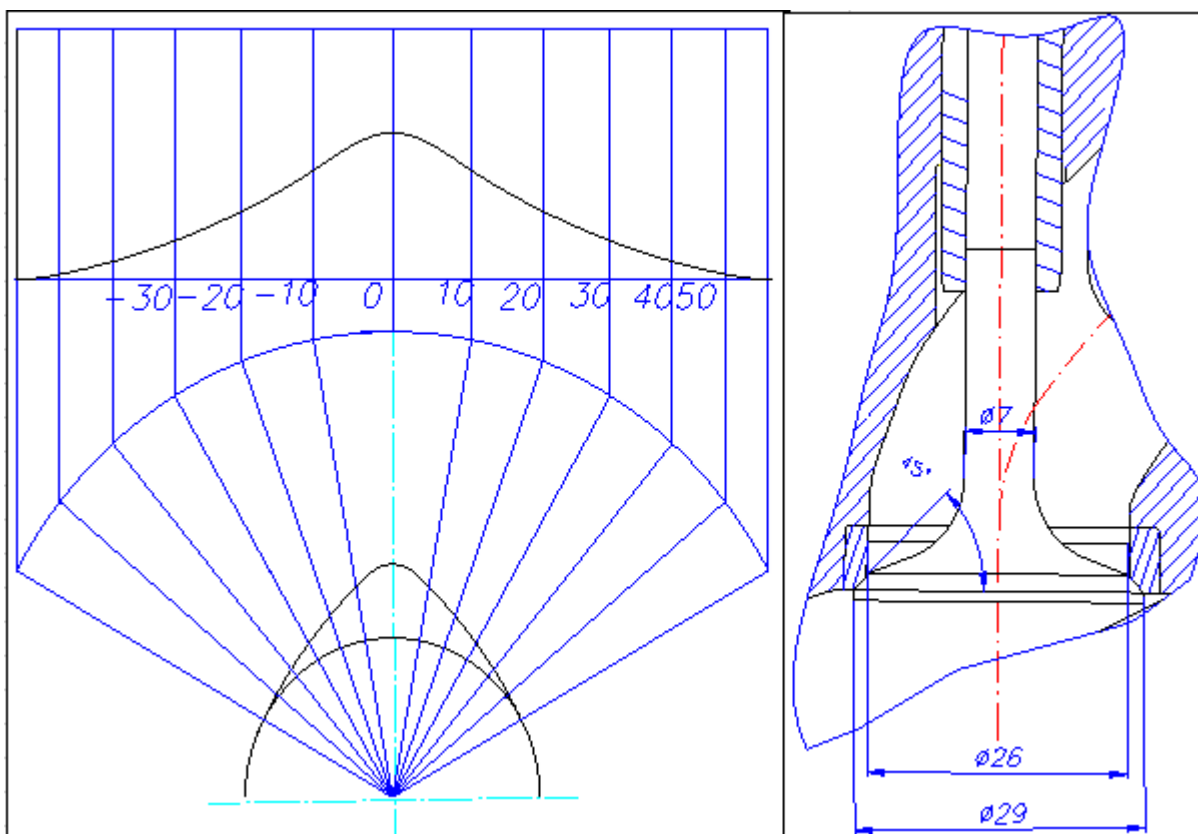


Рисунок 34 – Параметры для расчета времени-сечения впускного клапана

Таблица 14 – Время-сечения впускного клапана базового двигателя

№	f	t,с	h _{кл} , мм	F _{кл} ,мм ²		Базовый вариант	С регулятором фаз ГРМ
0	-60	0	0	0	0	0	0
1	-50	5,56E-05	0,28	16,24862	0,0009	0,000902701	0,001805403
2	-40	0,000111	0,94	55,2376	0,0061	0,007040212	0,014080424
3	-30	0,000167	2,01	120,5017	0,0201	0,027123831	0,054247661
4	-20	0,000222	3,55	218,8948	0,0486	0,075767114	0,151534228
5	-10	0,000278	5,65	361,552	0,1004	0,176198218	0,352396436
6	0	0,000333	7,6	502,7856	0,1676	0,343793418	0,687586836
7	10	0,000389	5,65	361,552	0,1406	0,484396964	0,968793928
8	20	0,000444	3,55	218,8948	0,0973	0,581683531	1,163367061
9	30	0,0005	2,01	120,5017	0,0603	0,641934386	1,283868772
10	40	0,000556	0,94	55,2376	0,0307	0,672621939	1,345243879
11	50	0,000611	0,28	16,24862	0,0099	0,682551654	1,365103308
12	60	0,000667	0	0	0	0,682551654	1,365103308

Результаты расчета также приведены на рисунках 35 и 36

Время-сечение впускного клапана

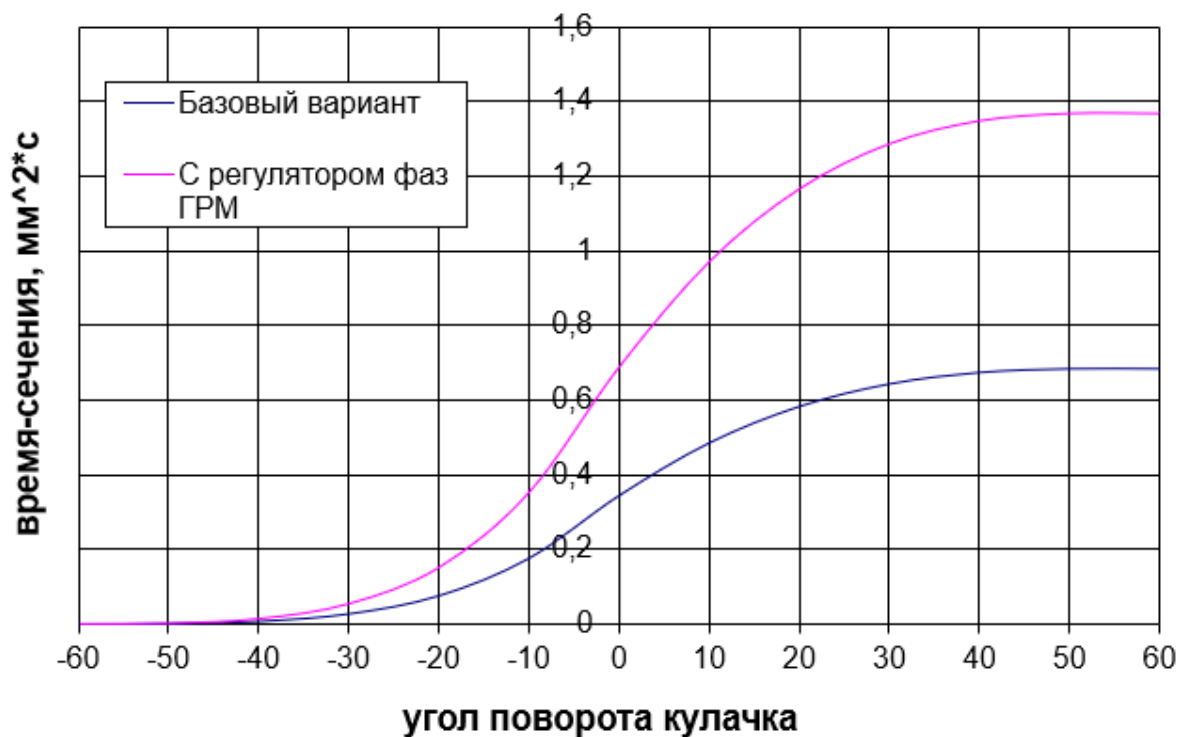


Рисунок 35 – Время-сечения впускного клапана

Диаграмма подъема впускного клапана



Рисунок 36 – Диаграмма подъема впускного клапана базового двигателя

Время – сечения клапана:

$$\int_{t_1}^{t_2} F_{кл} dt = M_t M_F F_{abcd} = 5,952 \cdot 7,60 \cdot 5129 = 2,32 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}, \quad (15)$$

где $M_t = M_{\phi p} / (6n_p) = 1 / (6 \cdot 2800) = 5,952 \cdot 10^{-5} \text{ с/мм}$;

$$M_F = M_{h_{кл}} \cdot 2,22 d_{зоп} = 0,1 \cdot 2,22 \cdot 34,23 = 7,60 \text{ мм}^2/\text{мм};$$

$F_{abcd} = 5129 \text{ мм}^2$ – площадь под кривой подъема толкателя за такт впуска.

Средняя площадь проходного сечения клапана.

$$F_{кл\text{ ср}} = \int_{t_1}^{t_2} F_{кл} dt / (t_2 - t_1) = M_F F_{abcd} / l_{ад}, \quad (16)$$

где $l_{ад} = 90 \text{ мм}$ – продолжительность такта впуска по диаграммам.

Полное время-сечение клапана

$$\int_{t_{ин}}^{t_x} F_{кл} dt = M_t M_F F_{ен} = 5,952 \cdot 7,6 \cdot 5648 = 2,7 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}. \quad (17)$$

где $t_{пр}$ – момент начала открытия впускного клапана; t_x и F_x – текущие значения времени и площади под кривой подъема толкателя.

Выводы по 5-му разделу

Расчет времени сечения показал эффективности применения регулятора фаз ГРМ на условия, обеспечивающие улучшение наполнение цилиндра свежей смесью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе проведена модернизация механизма газораспределения, выполнены все необходимые расчеты и проведено конструирование предложенного объекта. Получены основные выводы по работе:

1. Применение системы регулирования фазами ГРМ привело к улучшению наполнения почти на 10%, что особенно важно при работе на повышенной частоте вращения коленчатого вала, это позволило повысить мощность двигателя на номинальном режиме работы на 10 кВт.
2. Из динамического расчета получено, что с улучшением наполнения вследствие использования регулятора фазами ГРМ резко возрастают нагрузки в зоне пикового давления 350 – 380 градусов ПКВ. Рост нагрузки составляет 5000 Н, что составляет 30% нагрузки при работе базового двигателя.
3. Применение регулятора фаз ГРМ повышает температуру цикла, что не может не сказаться на увеличении выбросов термических оксидов азота. В тоже время рассматривая условия образования продуктов неполного сгорания отметим практически незначительное влияние на снижение оксидов углерода, и за счет большего давления возможно некоторое увеличение концентрации несгоревших углеводородов в зажатых объемах (зонах гашения) и пристеночном слое. Хотя если рассматривать пристеночный слой, то здесь количество несгоревших углеводородов должно остаться примерно на базовом уровне, вследствие большей температуры цикла, которая снижает толщину пристеночного слоя, но в тоже время увеличение давления увеличивает плотность этого слоя.

Выводы по 1-му разделу

Проведенный обзор современного состояния двигателей с регулируемыми механизмами газораспределения, показал, что практически все ведущие автопроизводители имеют серийные образцы систем регулирования хода и времени открытия клапанов.

Основными типами приводов являются системы, которые используют механический или гидравлический принцип работы.

Изменение фаз газораспределения и параметров хода клапана позволяет значительно улучшить характеристики работы двигателя за счет улучшения наполнения на нагрузочных режимах и снижение потерь топлива на режимах дросселирования и малых нагрузок. Причем применение систему регулирования фазами газораспределение невозможно без применения системы перепуска отработавших газов (EGR), так как на режимах малых нагрузок необходимо обеспечить значительную долю в рабочей смеси остаточных газов.

Выводы по 2-му разделу

Тепловой расчет показал значительное влияние изменения времени сечения клапанов, за счет применения системы регулирования фазами ГРМ на мощностные и экономические характеристики работы двигателя. Получено, что для эффективного использования двигателя с системой регулирования фазами ГРМ требуется проводить дополнительную оптимизацию процесса сгорания по углу опережения зажигания. Но даже без этого удалось достичь почти 15% увеличения мощности, что является весьма значимым результатом.

Выводы по 3-му разделу

Как мы видим повышение наполнения цилиндра вследствие улучшения условий впуска при регулировании фазами ГРМ не приводит к значительному росту нагрузок и принципиальным сложностям, связанным со снижением ресурса элементов кривошипно-шатунного механизма. Имеются локальные постоянные зоны повышенных нагрузок, с углом повышенного

нагрузки примерно в 40 градусов ПКВ. Узость зоны повышенных нагрузок позволяет, говорить об возможности эффективного локального упрочнения, что позволяет не повышать значительно габариты элементов КШМ.

Выводы по 4-му разделу

Проведенный анализ показал, что для эффективной работы двигателя с системой регулирования фазами ГРМ необходимо осуществлять грамотное регулирование углом опережения зажигания.

Выводы по 5-му разделу

Расчет времени сечения показал эффективности применения регулятора фаз ГРМ на условия, обеспечивающие улучшение наполнение цилиндра свежей смесью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Общие требования и правила составления. – Москва: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 47 с.
2. 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.
3. Крючков, В. Разбираем новый 1,8-литровый двигатель 21179 [Электронный ресурс]: В. Крючков / Интернет издание «За рулем.рф». - автомобильный журн. — Москва: 1998-2016. – Режим доступа: <http://www.zr.ru/content/articles/834887-novyj-18-litrovyj-dvigatel-vaz-21179>(дата обращения 29.05.18)
4. Макаренко Н.В. Мастеру об охране труда / Н.В. Макаренко//«Машиностроение» - Москва: 1990. - 128 с.
5. Орлин А.С., Круглов М.Г. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей. – М.: «Машиностроение», 1983.
6. Сидоров В.В. Положение о Мастере основного производственного цеха / В.В. Сидоров // ОАО АвтоВаз– Тольятти: 2003.
7. Смоленский, В.В. Автомобильные двигатели: курс лекций / В.В. Смоленский. – Тольятти: ТГУ, 2009. – 183 с.
8. Akmandor, I.S. Novel Thermodynamic Cycle / I.S. Akmandor, N. Ersöz// PTC, WO, 2004. 022919 AI. (March 18th 2004)
9. Baumeister, T. Mark's Standard Handbook for M. Engineer / T Baumeister // McGraw- Hill Inc., New York, 1966.
10. 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
11. 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
12. 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
 13. Clarke, J. M. Thermodynamic Cycle Requirements for Very High Rotational Efficiencies / J. M. Clarke // J. Mech. Eng. Sci. 1974
 14. Fuller, D.D. Theory and Practice of Lubrication for Engineers / D.D. Fuller // John Wiley & Sons Inc., New York, 1966
 15. Habermann K. Demonstration Vehicle with Continuously Variable Compression Ratio (VCR). FEV Magazine “Spectrum”, Issue 22, 2003 [Internet]. Available from: <http://www.fev.com> [Accessed: 5 October 2018]
 16. Haywood, R.W. A Critical Review of Theorems of Thermodynamics Availability // R.W. Haywood / J. Mech. Eng. Sci. vol.16 MIT Press, 1970.
 17. 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
 18. Larsen GJ. Research Engine for Evaluating the Effects of Variable Compression Ratio (VCR) and/or Variable Valve Timing (VVT). SAE Paper No. 910053. Warrendale PA, USA: SAE International; 1991
 19. MCE-5 VCRI: Pushing back the fuel consumption reduction limits, MCE-5 Development 2010 [Internet]. Available from: www.vcri.eu [Accessed: 5 October 2018]
 20. Moteki K, Aoyama S, Ushijima K, Hiyoshi R, Takemura S, Fujimoto H, et al. A study of a variable compression ratio system with a multi-link mechanism. SAE Paper No. 2003-01-0921. Warrendale PA, USA: SAE International; 2003

21. Rabhi V, Beroff J, Dionnet F. Study of a Gear-Based Variable Compression Ratio Engine. SAE Paper No. 2004-01-2931. Warrendale PA, USA: SAE International; 2004
22. Renegar, D.C. The Quasiturbine / D.C. Renegar // USA Patent No:6629065 September 12th 2003
23. Rory, R. D. The Ball Piston Engine: A New Concept in High Efficient Power Machines / R. D. Rory // Convergence Eng. Corporation.
24. 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
25. Stephen, R. T. An Introduction to Combustion / R.T.Stephen // McGraw-Hill Series in Mech. Eng. 1996.
26. SVC Variable Compression Engine, Linköping University, Sweden 2014 [Internet]. Available from: www.vehicular.isy.liu.se [Accessed: 5 October 2018]
27. 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
28. Verhelst, S. A critical review of experimental research on hydrogen fueled SI engines / S. Verhelst, R. Sierens, S. Verstraeten // SAE. - 2006. - №2006-01-0430.
29. 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