

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 легкового автомобиля, форсированный по степени сжатия

Студент

К.В. Андронов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, В.В. Смоленский

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

Тольятти 2022

## АННОТАЦИЯ

Повышение степени сжатия в автомобильных двигателях позволит снизить нагрузку на ископаемые углеводородные источники энергии. Анализ возможностей повышения степени сжатия, является актуальной задачей бакалаврской работы и соответствует профилю направления обучения.

Целью данной работы является оценка возможностей и эффективности использования двигателя внутреннего сгорания со сверхвысокой степенью сжатия.

В бакалаврской работе представлены результаты проектирования двигателя с искровым зажиганием с исследованием влияния степени сжатия на рабочий процесс. Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка состоит из аннотации, введения, 4 разделов, заключения с основными результатами и выводами, содержит 43 рисунка, 14 таблиц, списка использованных источников (34 источников). Основной текст изложен на 76 страницах.

Графическая часть работы содержит 8 листов, из них 2 формата А0 и 6 формата А1 иллюстрирующих материал, представленный в пояснительной записке.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Анализ состояния вопроса .....	6
1.1 Возможные области применения технологии переменной степени сжатия.....	6
1.2 Двигатели с изменяемой степенью сжатия.....	7
1.3 Обзор существующих моделей двигателей с переменной степенью сжатия.....	10
2 Тепловой расчет проектируемого двигателя .....	17
3 Кинематический и динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя .....	45
3.1 Кинематический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя.....	45
3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя	47
4 Анализ влияния степени сжатия на рабочий процесс ДВС .....	56
4.1 Влияния степени сжатия на максимальную температуру и давление цикла .....	56
4.2 Влияния степени сжатия на эффективные показатели цикла .....	65
Заключение .....	70
Список используемых источников .....	73

## ВВЕДЕНИЕ

Стремление к ограничению неблагоприятных внешних воздействий, связанных с развитием автомобилестроения и транспорта, в основном на базе поршневого двигателя внутреннего сгорания как основного источника энергии, выявляет прежде всего при ограничении допустимый уровень выбросов вредных веществ в отработавшие газы. Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в последние годы, дальнейшее улучшение экологических и энергетических показателей поршневых двигателей требует дальнейших изменений в их конструкции, охватывающих практически все функциональные системы.

Одним из наиболее эффективных путей, хотя на современном этапе развития еще имеет много технических и эксплуатационных трудностей, является построение двигателей, в которых степень сжатия становится регулирующим параметром и может изменяться непрерывно в широком диапазоне и относительно короткое время. В обычном двигателе степень сжатия — отношение наименьшего объема цилиндра к наибольшему в положениях верхней мертвой точки поршня — постоянна и определяется геометрией цилиндра и кривошипно-шатунного механизма. Новая технология, называемая переменной степенью сжатия (VCR), полностью меняет ранее неизменную характеристику двигателей. Многие компании заметили значительный потенциал, скрытый в системах с переменным сжатием, и сосредоточили все свое внимание на поиске способов применения и использования этой возможности. Поэтому в последние годы наблюдается растущий интерес к этому виду инновационного строительства.

Двигатель с переменной степенью сжатия имеет несколько преимуществ в отношении эффективности и удельной мощности. При малой выходной мощности двигатель можно заставить работать как безнаддувный двигатель с высокой степенью сжатия. Когда требуется высокая выходная мощность, двигатель можно заставить работать как двигатель с низкой

степенью сжатия и сильным наддувом. Огромный потенциал удельной мощности также предоставляет разработчику двигателя большие возможности для уменьшения рабочего объема двигателя при сохранении соответствия требованиям по мощности для конкретного применения.

Степень сжатия двигателя внутреннего сгорания является важным параметром управления для эффективной конструкции двигателя. Степень сжатия определяется как общий максимальный объем в узле поршневого цилиндра по отношению к его минимальному объему, когда поршень находится ближе всего к головке цилиндра. Типичные значения в современных двигателях с искровым зажиганием колеблются от 8:1 на нижнем уровне до 12:1 или на верхнем уровне. Конструктор двигателя может свободно регулировать целевую степень сжатия в двигателе с верхним расположением клапанов, размещая или опуская конструкционный материал в области камеры сгорания. Конструктор двигателя должен учитывать такие факторы, как целевые характеристики и эффективность, тип топлива, качество топлива, условия окружающей среды и уровень давления наддува, если таковой имеется, при установке целевой степени сжатия. Таким образом, целевая степень сжатия является компромиссом, предназначенным для удовлетворительного удовлетворения множества противоречивых требований. Растущий интерес вызывают системы, позволяющие регулировать степень сжатия двигателя. Эта регулировка может выполняться при работающем двигателе, что позволяет установить наилучшую возможную степень сжатия в зависимости от требований пользователя, условий окружающей среды и используемого топлива. Существует множество различных конструкций систем, которые могут облегчить регулировку степени сжатия, но конечная польза для характеристик двигателя в основном одинакова; КПД может быть максимальным при низких уровнях мощности без значительного снижения максимальной пиковой мощности двигателя.

## 1 Анализ состояния вопроса

### 1.1 Возможные области применения технологии переменной степени сжатия

Возникновение идеи переменной степени сжатия было связано с желанием использовать для двигателя подачу топлива с разными свойствами; это так называемая возможность гибкого топлива. Мировая автомобильная промышленность, а также научно-исследовательские институты, занимающиеся разработкой технологии VCR, говорят о возможности снижения расхода топлива за счет использования переменной степени сжатия в двигателях разной мощности. Значительные экономические выгоды особенно заметны, когда технология переменной степени сжатия используется для двигателей большой мощности. Важно также, если это безнаддувные или форсированные двигатели с непосредственным впрыском (DFI) и регулируемым приводом клапана (VVA) [8,9,10,11]. На Рисунке 1 показаны потенциальные преимущества индивидуального и комбинированного использования этих решений. Существенно, что большие преимущества в области экономии топлива и экологии двигателя могут быть получены при комбинировании систем VCR и VVA с регулируемым приводом клапанов.

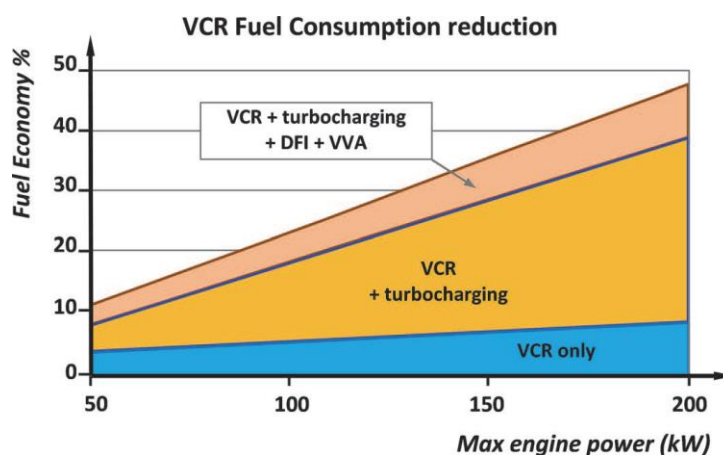


Рисунок 1 – Прогнозируемое увеличение топливной экономичности двигателя при использовании технологии VCR.

## 1.2 Двигатели с изменяемой степенью сжатия

Некоторые авторы считают, что двигатель с переменной степенью сжатия (VCR) может быть технологией, соответствующей этим стандартам. Эрикссон и Нильсен [18] считают, что двигатели VCR могут сделать два шага к улучшению характеристик двигателя [12,13,14,15]:

1. устранение конструктивного компромисса между степенью сжатия (эффективностью) и детонацией двигателя;
2. возможность значительного уменьшения габаритов и наддува для улучшения топливной экономичности.

Гупта [16] утверждает, что современные двигатели должны удовлетворять требованиям клиентов по высокой выходной мощности, а также по низкому расходу топлива, и обе цели могут быть достигнуты с помощью двигателя VCR. Раджпут [17] отмечает, что двигатель с фиксированной степенью сжатия не может соответствовать различным требованиям высокой удельной мощности. Следовательно, разработка двигателя с переменной степенью сжатия представляется необходимостью.

В течение последних десятилетий исследователи и производители разработали несколько концепций двигателей, позволяющих изменять степень сжатия. Несколько авторов предложили различные классификации, чтобы облегчить понимание темы VCR. Shaik, Moorthi and Rudramoorthy [19] были одними из первых авторов, предложивших классификацию двигателя с переменной степенью сжатия. Однако они не упоминают, как была получена классификация, и их пять типов двигателей VCR основаны на конкретных конструкциях производителей автомобилей, а не на общем анализе результатов. Пять групп двигателей VCR, определенные Шайком, Мурти и Рудрамурти [20], перечислены ниже:

- Перемещение оси коленчатого вала: степень сжатия регулируется с помощью эксцентрика между блоком цилиндров и коленчатым валом.

- Изменение геометрии шатуна: многорычажный механизм между шатуном и коленчатым валом используется для создания двигателя VCR.
- Перемещение головки блока цилиндров: эта концепция объединяет головку блока цилиндров с гильзами цилиндров в конструкцию с одной головкой, которая поворачивается относительно остальной части двигателя и, таким образом, изменяет степень сжатия.
- Изменение объема камеры сгорания с помощью вторичного поршня. тонн или клапана: в головку блока цилиндров встроен вторичный поршень для изменения объема камеры сгорания и, следовательно, степени сжатия.
- Изменение высоты днища поршня: эта концепция также изменяет объем камеры сгорания за счет изменения положения поршня по отношению к шатуноу.
- Перемещение шатунных шатунов: в этой концепции также используется эксцентриковый подшипник для изменения степени сжатия. Однако он расположен между коленчатым валом и шатуном.

Nilsson [21], с другой стороны, не дает формальной классификации двигателей VCR. Он утверждает, что помимо двигателя SAAB SVC существует еще четыре концепта двигателя VCR. Эти концепции перечислены ниже, в которых и классификация, и описание были даны Нильссоном [22]:

- Вторичный поршень: камера сгорания имеет небольшой вторичный поршень, который используется для изменения степени сжатия.
- Соединительные звенья шатуна: Обычный шатун заменен двухкомпонентной конструкцией, в которой верхний элемент соединяется с поршнем, а нижний элемент соединяется с коленчатым валом.



- Движение коленчатого вала или шатунных шеек: Положение коленчатого вала смещены относительно головки блока цилиндров, или шатунные шейки смещены эксцентрично относительно шатуна.
- Переменная высота поршня: степень сжатия можно увеличить, увеличив высоту поршня. Если верхняя часть головки поршня не прикреплена к остальной части поршня, высоту поршня можно регулировать подачей моторного масла.

Радониц [23] был первым автором, который представил правильную классификацию двигателей VCR. Он делит двигатели видеоманитофонов на три основные группы с подклассами внутри каждой из них. Однако Radonjić [24] не дает дополнительных пояснений по каждому классу, а приводит лишь некоторые рисунки, иллюстрирующие типы двигателей VCR. Его классификация приведена ниже:

Эксцентрикковые подшипники:

- основной журнал
- шатунный штифт
- поршневой палец

Изменяемая геометрия шатуна:

- многорычажный шатун-кривошип
- изменение длины шатуна (механическая или гидравлическая система)

Переменные размеры поршня или камеры сгорания:

- переменная высота поршневой платформы
- переменный объем камеры сгорания
- два коленчатых фазированных поршневых двигателя
- подвижная головка блока цилиндров

Вос и др. [25] имеет правильную классификацию двигателей VCR. Его работа основана на принципах изменения степени сжатия, а не на конкретной конструкции того или иного производителя. Вос и др. [26] первым представил схематические рисунки для объяснения своей

классификации, как показано на рисунке 2. Согласно Вос и др. [27], двигатели VCR можно разделить на следующие типы, перечисленные ниже:

- а) шарнирно-сочлененная моноголовка
- б) поршень переменной высоты деки
- в) эксцентрики на подшипниках коленчатого вала
- г) многосвязные шатунно-кривошипные механизмы
- д) вторичный движущийся поршень или клапан в головке блока цилиндров
- е) кривошипно-шатунные механизмы;
- г) точно сдвинутый блок цилиндров;

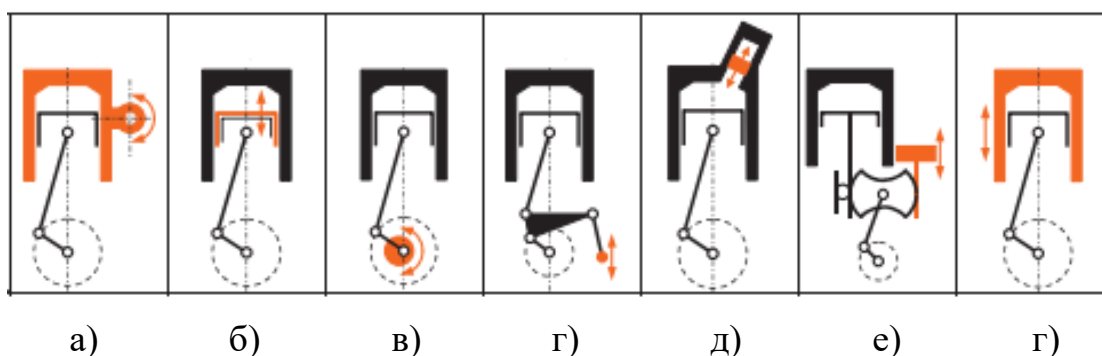


Рисунок 2 – Схематическое представление классификации, предложенной Вос

### 1.3 Обзор существующих моделей двигателей с переменной степенью сжатия

#### 1.3.1 Двигатель SAAB SVC

Первым известным производителем, выпустившим концепт двигателя VCR, была шведская компания SAAB. Он назывался двигателем SVC (Saab Variable Compression) и, согласно веб-сайту компании, двигатель SVC мог снизить расход топлива по сравнению с обычным безнаддувным двигателем на 30%, в то же время обеспечивая впечатляющие характеристики. Также согласно SAAB, двигатель SVC состоял из головки блока цилиндров со встроенными цилиндрами, известной как моноголовка, и нижней части, состоящей из блока цилиндров, коленчатого вала и поршней. Степень сжатия

варьируется путем регулировки наклона моноголовки по отношению к блоку цилиндров и внутренним возвратно-поступательным компонентам. Это изменяет объем камеры сгорания с поршнем в верхней мертвой точке и, следовательно, изменяет степень сжатия [28]. На рисунке 3 схематически показан двигатель SAAB SVC (рисунок 3а). Изображение слева представляет двигатель с самой высокой степенью сжатия. С правой стороны двигатель установлен с наименьшей степенью сжатия, и можно заметить, что моноголовка наклонена. На рисунке 3б представлен законченный проект двигателя SAAB SVC 2013 года.

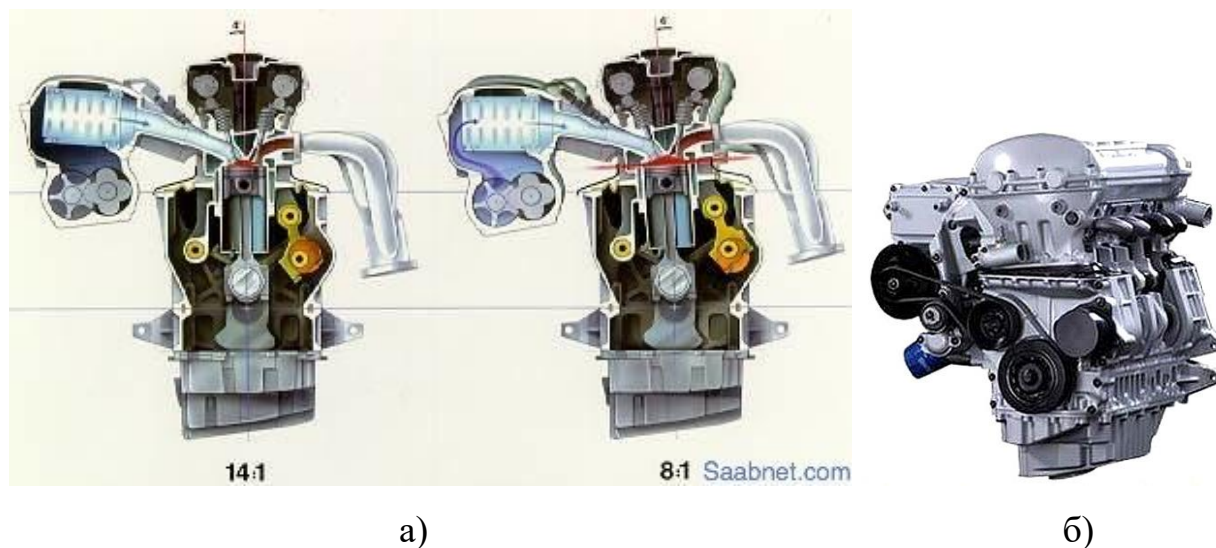


Рисунок 3 – Двигатель SAAB SVC: (а) Схематическое изображение модели 2000 года; (б) общий вид модели 2013 года

### 3.3.2 Двигатель Nissan VCR

У Nissan также есть пресс-релиз о концепции двигателя VCR. По словам японского производителя, новый механизм двигателя обеспечивает как высокую мощность турбодвигателей, так и низкий расход топлива атмосферных двигателей [29]. В отличие от выпуска SAAB, Nissan не приводит номера своего двигателя, но заявляет, что за счет применения многозвенного механизма было достигнуто значительное улучшение вибрации двигателя в сочетании с уменьшением трения [30]. На рисунке 4 показана концепция двигателя VCR от Nissan. С левой стороны можно

увидеть многорычажный механизм. Вал управления позиционирует все механизмы и, следовательно, изменяет степень сжатия. Справа японский производитель сравнивает вибрацию своего двигателя VCR с обычными двигателями и двигателями V6.

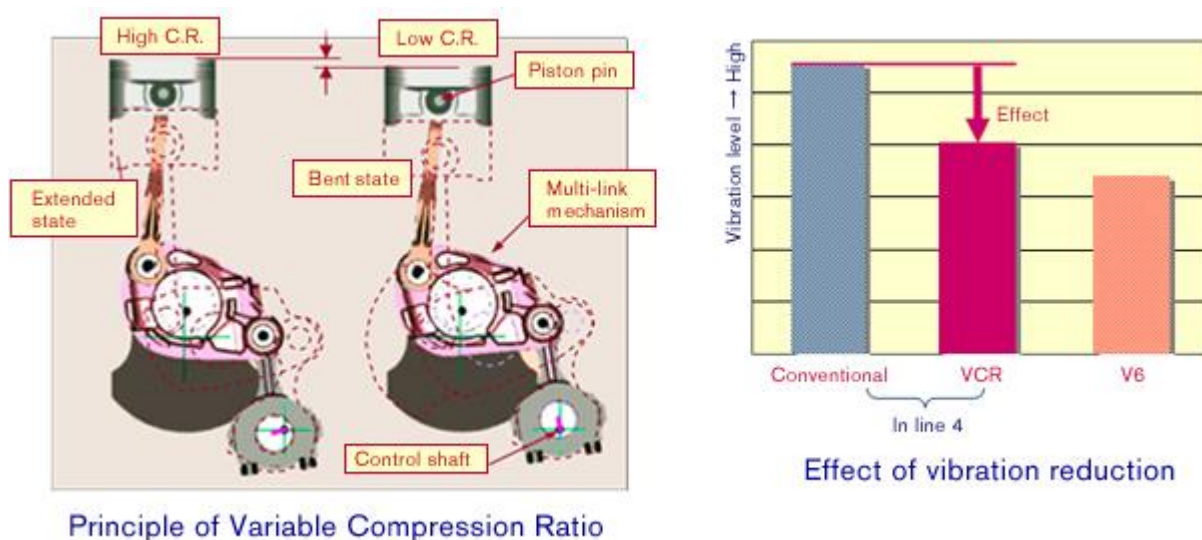


Рисунок 4 – Концепция двигателя Nissan VCR. Можно заметить многорычажный механизм и эффект снижения вибраций

### 3.3.3 Технология VCR Gomecsys

Gomecsys — голландская инженеринговая компания, специализирующаяся на разработке технологий двигателей, позволяющих экономить топливо. В рамках этих технологий существует концепция двигателя VCR. В нем используется эксцентриковая муфта между шатунной шейкой и большим концом шатуна, чтобы способствовать изменению степени сжатия. Положение эксцентрикового звена может быть изменено набором шестерен и валом, который входит в коленчатый вал с передней стороны двигателя. Согласно веб-сайту Gomecsys, его концепция VCR позволяет изменять степень сжатия от 8:1 до 18:1 и может экономить до 18% топлива по сравнению с двигателем с фиксированной степенью сжатия. Голландская компания еще не выпустила свой двигатель на рынок, однако партнерство с PSA Group позволяет протестировать некоторые прототипы на дорогах. Несмотря на это, Gomecsys не сообщает дату выпуска продукта. На

рисунке 5 представлено схематическое изображение концепции Gomescys. Эксцентриковое звено (А) между коленчатым валом и большой головкой шатуна изменяет положение ВМТ двигателя и, следовательно, степень сжатия.

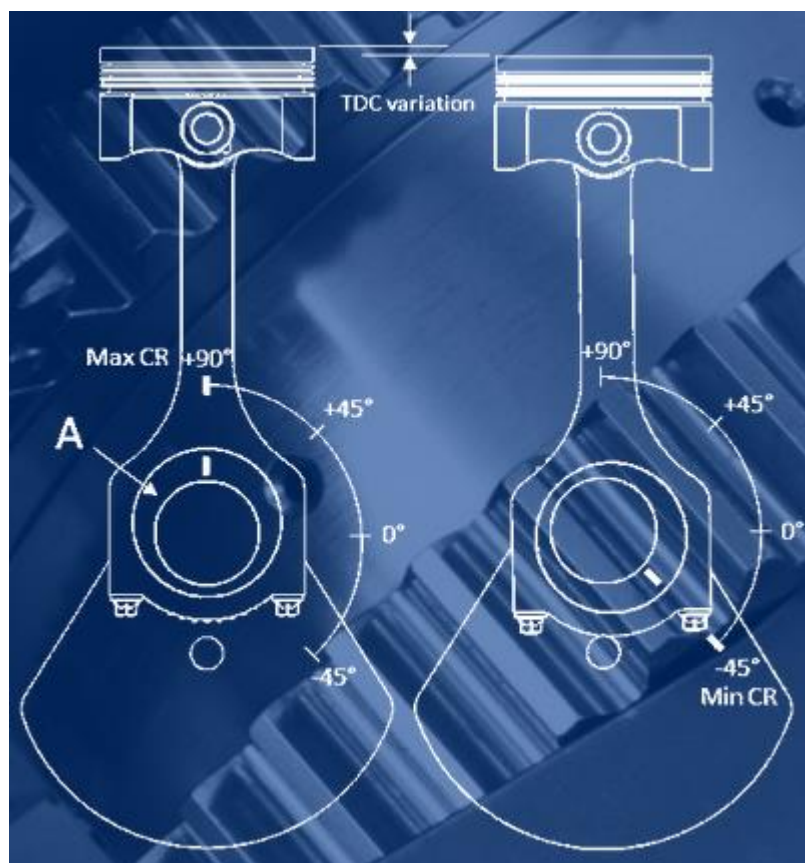


Рисунок 5 – Концепция модуля видеомagniтофона от Gomescys

### 3.3.4 Двигатель MCE-5 VCRI

MCE-5 — французский разработчик двигателей, который претендует на совершенно новый двигатель VCR. Согласно официальному веб-сайту, двигатель MCE-5 VCRI оптимизирует эффективность, производительность, уровни выбросов загрязняющих веществ и себестоимость. Уровни крутящего момента и мощности впечатляют по сравнению с «обычными» двигателями объемом 1,5 л. MCE-5 также заявляет о снижении расхода топлива до 30% по сравнению с двигателем с фиксированной степенью сжатия. Согласно [31], уже есть несколько прототипов двигателей, которые проходят испытания как на дорожных транспортных средствах, так и на испытательных стендах. На



рисунке 6 схематично показан двигатель VCRi. Внешне его концепция имеет почти такую же комплектацию, как и обычный двигатель с фиксированной степенью сжатия. Однако внутри блока все совсем по-другому. Эта концепция использует несколько зубчатых соединений для изменения степени сжатия. Рассматривая рисунок 6, можно обратить внимание на два поршня. Тот, что справа, используется для регулировки степени сжатия. Тот, что слева, - рабочий поршень сгорания. Заметьте, что этот поршень не соединен с шатуном.

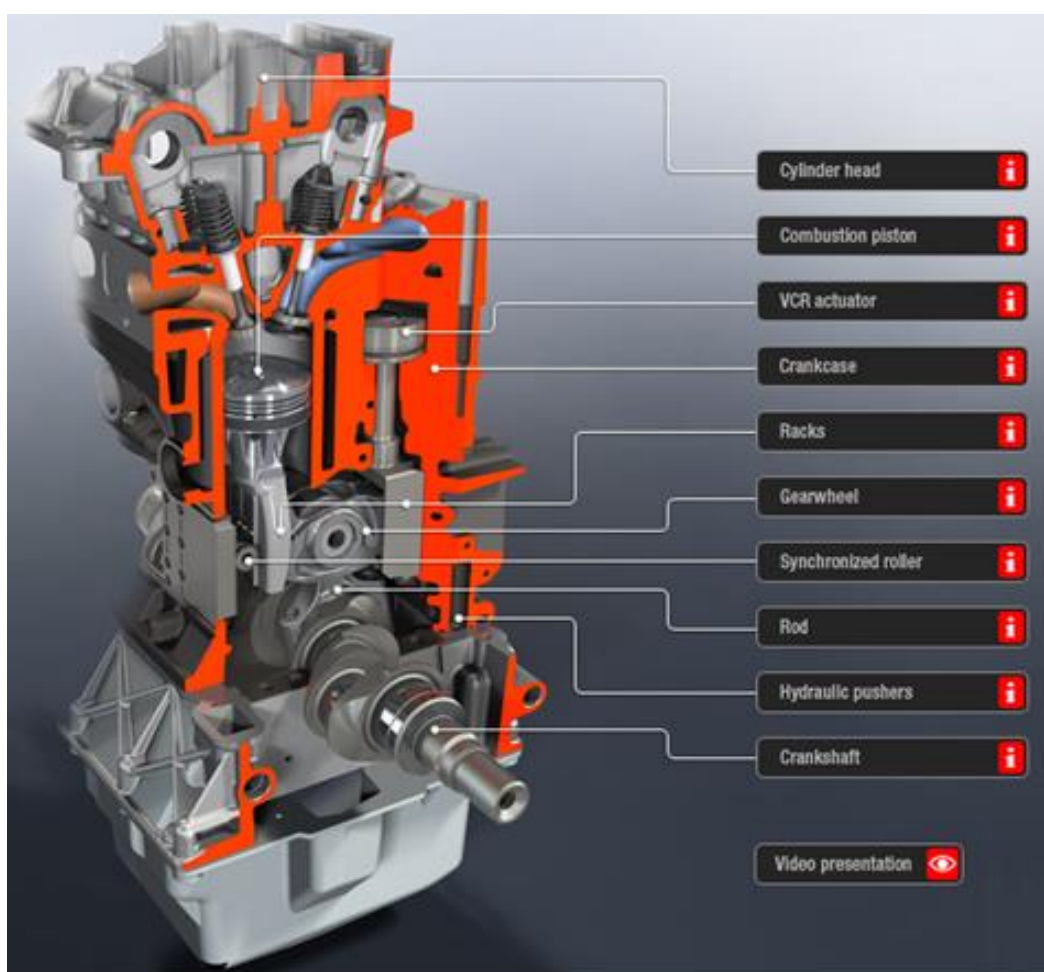


Рисунок 6 – Концепция двигателя MCE-5 VCRi. Двигатель состоит из нескольких зубчатых механизмов, способных изменять степень сжатия.

### 3.3.5 Двухступенчатый двигатель VCR FEV

FEV — немецкая инжиниринговая компания, работающая как в сфере консалтинга, так и в сфере разработки. Среди ее продуктов есть концепция

VCR, в которой используется эксцентриковая связь между шатуном и поршневым пальцем. Согласно веб-сайту FEV, двигатель VCR представляет собой решение для улучшения расхода топлива в двигателях с искровым зажиганием, позволяющее уменьшить размеры сверх сегодняшних пределов, уменьшить выбросы твердых частиц в дизельных двигателях и минимизировать потери на трение [32]. На рисунке 7 показана концепция, разработанная FEV.



Рисунок 7 – Концепция двухступенчатого шатуна FEV VCR

Фактически, их продукт представляет собой шатун, способный способствовать изменению степени сжатия. Шатун имеет эксцентриковый подшипник, который изменяет положение поршневого пальца, изменяя ВМТ двигателя и, следовательно, степень сжатия. Упомянутое эксцентриковое звено приводится в действие двумя гидравлическими поршнями, которые также встроены в конструкцию шатуна. В отличие от других концепций, продукт FEV предлагает двухступенчатый двигатель VCR, а не бесступенчатую регулировку степени сжатия в пределах диапазона. Также,

согласно веб-сайту компании, FEV эксплуатирует демонстрационный автомобиль Lotus Elise MK1 [34]. Упомянутый автомобиль оснащен двигателем объемом 1,8 л, уменьшенным до 1,65 л, 6-ступенчатой механической коробкой передач и шатуном VCR со ступенями CR 8,8:1 и 12:1 [33].

#### Выводы по первому разделу

Проведенный обзор современного состояния двигателей с переменной степенью сжатия показал постоянный интерес к данному направлению развития среди ведущих мировых инжиниринговых центров. В результате было достигнуто надлежащее отображение технологии и рассмотрена расширенная классификация двигателей VCR. Эта классификация была объяснена с помощью репрезентативных примеров, которые были представлены как в схематическом, так и в структурном представлении.

На основании проведенного обзора был выбран для дальнейшего моделирования двигатель SAAB SVC, как единственная модель, выпускаемая серийно.



## 2 Тепловой расчет проектируемого двигателя

Основные характеристики двигателя на базе серийного двигателя SAAB B234 с переменной степенью сжатия, принятого для расчета приведены в таблице 1, а общий вид его конструкции на рисунке 8.

Таблица 1 – Технические характеристики двигателя

Тип	4-тактный двухтопливный с искровым зажиганием
Число и расположение цилиндров	4 – рядно
Порядок работы цилиндров	1-3-4-2
Диаметр цилиндров, мм	90
Ход поршня, мм	79
Длина шатуна, мм	147,5
Рабочий объем, л	2,015
Степень сжатия	8 - 14
Номинальная частота вращения коленчатого вала, об/мин	4800
Максимальный частота вращения коленчатого вала, об/мин	5200
Минимальная частота вращения коленчатого вала при режиме холостого хода, об/мин	840
Номинальная мощность при частоте вращения коленчатого вала 5200 об/мин, кВт (л.с.)	100
Максимальный крутящий момент, Нм	220



Рисунок 8 – Общий вид двигателя SAAB B234 взятого как базовый для расчета

Тепловой расчет производится по методике И.И. Вибе, для степени сжатия 8, 10, 12 и 14, 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 1 в связи с требованиями к токсичности отработавших газов, то результаты расчета параметров рабочего тела проводятся (таблица 2) для одного состава смеси, без учета частоты вращения. Анализ результатов расчета процесса впуска приведен в таблице 3.

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 <sub>2</sub> /кг топл.	$M_{H_2O}$ , кмоль H <sub>2</sub> O/кг топл.	$M_{N_2}$ , кмоль N <sub>2</sub> /кг топл.	$M_2$ , кмоль пр.сг./кг топл.	$\mu_0$
0,51683	14,957	0,52552	0,07125	0,0725	0,409327	0,553077	1,052432

Таблица 3 – Результаты расчета процесса впуска

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$\Delta p_a$ , Мпа	$p_a$ , Мпа	$T_r$ , К	$p_r$ , Мпа	$\gamma_r$	$T_a$ , К	$\eta_v$	$V_a$ , м <sup>3</sup> /кг	$\omega_{вп}$ , м/с
Степень сжатия 8									
840	0,00016	0,09984	1115	0,103878	0,042754	337,44883	0,9126	0,9267125	9,991764
2000	0,00091	0,099092	1135	0,105645	0,042462	336,50009	0,918	0,9310796	23,78991
3400	0,00262	0,097376	1165	0,109699	0,043305	336,527	0,9106	0,9475609	40,44285
4800	0,00523	0,094771	1195	0,115855	0,045086	337,373	0,9005	0,9760576	57,09579
5200	0,00614	0,093863	1210	0,118	0,046492	338,6601	0,878441	0,9892583	61,85378
Степень сжатия 10									
840	0,00016	0,09984	1085	0,103878	0,034081	329,9385	0,915	0,9145097	9,991764
2000	0,00091	0,099092	1105	0,105645	0,033814	328,8399	0,9209	0,9183417	23,78991
3400	0,00262	0,097376	1134	0,109699	0,034435	328,3914	0,915	0,9332483	40,44285
4800	0,00523	0,094771	1168	0,115855	0,035618	328,6031	0,9071	0,9595228	57,09579
5200	0,00614	0,093863	1180	0,118	0,036752	329,411	0,886268	0,9711847	61,85378
Степень сжатия 12									
840	0,00016	0,09984	1080	0,103878	0,027965	325,31	0,9166	0,9021559	9,991764
2000	0,00091	0,099092	1090	0,105645	0,02799	324,03	0,9228	0,9053958	23,78991
3400	0,00262	0,097376	1118	0,109699	0,028439	323,31	0,9178	0,919282	40,44285
4800	0,00523	0,094771	1154	0,115855	0,029462	323,07	0,9113	0,9438578	57,09579
5200	0,00614	0,093863	1167	0,118	0,030417	323,5914	0,891249	0,9545279	61,85378
Степень сжатия 14									
840	0,00016	0,09984	1076	0,103878	0,023745	322,08	0,9177	0,8932063	9,991764
2000	0,00091	0,099092	1088	0,105645	0,02387	320,72	0,9241	0,8961317	23,78991
3400	0,00262	0,097376	1112	0,109699	0,024229	319,8	0,9198	0,9092985	40,44285
4800	0,00523	0,094771	1149	0,115855	0,025069	319,28	0,9142	0,9327884	57,09579
5200	0,00614	0,093863	1163	0,118	0,025529	319,73	0,894697	0,9431334	61,85378

Из таблицы 3 видно, что с ростом степени сжатия снижается удельный объем рабочего тела и улучшаются параметры газообмена, также снижается температура рабочего заряда в конце процесса наполнения, что положительно сказывается на повышении энергетических показателей работы двигателя.

Анализ результатов расчета параметров в конце сжатия и начала воспламенения (таблица 4) показал снижение угла опережения зажигания, что соответственно способствовало повышению плотности заряда в момент воспламенения, это выражается через удельного снижение объема при значительном увеличении давления и гораздо менее значительным ростом температуры.

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

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$\mu$	$n_l$	Угол опережения зажигания, ° ПКВ	$V_y$ , м <sup>3</sup> /кг	$P_y$ , МПа	$T_y$ , К
Степень сжатия 8						
840	1,0502825	1,3774	20	0,146654	1,264999	676,6156
2000	1,0502966	1,3774	24	0,160652	1,114735	653,1566
3400	1,050256	1,3774	28	0,179253	0,96502	630,9022
4800	1,05017	1,3774	32	0,203033	0,823982	610,1579
5200	1,050103	1,377252	35	0,221108	0,739061	595,9954
Степень сжатия 10						
840	1,050704	1,3762	18	0,116864	1,694322	715,5103
2000	1,050717	1,3764	22	0,12971	1,465472	686,8994
3400	1,050687	1,3764	26	0,146671	1,243328	658,9776
4800	1,050629	1,3764	30	0,16832	1,040218	632,7031
5200	1,0505736	1,376297	32	0,180043	0,954653	621,1005
Степень сжатия 12						
840	1,0510059	1,3752	16	0,09541	2,192921	755,6632
2000	1,051005	1,3753	20	0,106989	1,869005	722,2086
3400	1,05098	1,3754	25	0,126185	1,494791	681,2439
4800	1,0509	1,3754	27	0,137802	1,336788	665,3224
5200	1,050893518	1,375317	29	0,14825	1,216049	651,1171
Степень сжатия 14						
840	1,051217	1,3741	13	0,077243	2,884957	804,8473
2000	1,051219	1,3743	17	0,086974	2,44481	767,9728
3400	1,0511941	1,3744	22	0,103648	1,926195	721,065
4800	1,05116	1,3744	25	0,117617	1,632355	693,4221
5200	1,0511249	1,374368	27	0,127217	1,473024	676,8122

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 повышении степени сжатия.

Таблица 5 – Коэффициенты термодинамического расчета

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$\xi$	$q_z$ , Дж/кг	$E_2$ , МПа	$\varphi_z$ , град, пкв.	$m$
Степень сжатия 8					
840	0,86	2270,6	39,202128	50	3
2000	0,88	2324	39,936846	56	3
3400	0,9	2374,9	40,101637	62	3
4800	0,9	2370,9	38,864491	68	3
5200	0,91	2393,997	38,719871	75	3
Степень сжатия 10					
840	0,87	2316,2	50,655261	47	2,9
2000	0,89	2370,1	51,616805	53	2,9
3400	0,91	2421,9	51,902569	59	2,9
4800	0,92	2445,7	50,977795	65	2,9
5200	0,93	2469,597	50,857405	71	2,9
Степень сжатия 12					
840	0,89	2383,6	63,410204	44	2,8
2000	0,90	2410,3	63,891665	50	2,8
3400	0,92	2462,7	64,296851	55	2,8
4800	0,94	2462,7	64,296851	61	2,8
5200	0,95	2538,665	63,819156	66	2,8
Степень сжатия 14					
840	0,91	2447,2	76,713858	39	2,7
2000	0,93	2501,1	78,134405	46	2,7
3400	0,94	2526,8	77,803696	50	2,7
4800	0,96	2578,8	77,394701	56	2,7
5200	0,97	2603,895	77,308437	60	2,7

Анализ результатов расчета процесса расширения и выпуска (таблица б) показал, что с повышением степени сжатия с 8 до 14 происходит повышение температуры конца сгорания при снижении температуры отработавших газов, за счет большего теплоиспользования в процессе расширения и увеличения степени последующего расширения, что приводит к улучшению условий работы трехкомпонентного каталитического нейтрализатора, так как при повышенных температурах имеется вероятность его перегрева и выхода из окна эффективной работы.

Таблица 6 – Результаты расчета процесса расширения и выпуска

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$Vz'$ , м <sup>3</sup>	$Tz'$ , К	$Pz'$ , МПа	$\delta$	$n_2$	$P_b$ , МПа	$T_b$ , К	$T_r$ , К	$\Delta$ , %
Степень сжатия 8									
840	0,1838	2750,02	4,30856	5,042222	1,183	0,63589	2046,483	1118,72	0,3339
2000	0,1937	2761,02	4,105047	4,80739	1,184	0,64082	2072	1136,14	0,1007
3400	0,2068	2771,43	3,859362	4,58258	1,182	0,63893	2103	1168,6	0,3091
4800	0,2234	2736,51	3,526227	4,36832	1,183	0,61692	2091	1197,63	0,2202
5200	0,249	2695,56	3,11625	3,97233	1,183	0,60974	2095	1211,86	0,154
Степень сжатия 10									
840	0,1561	2749,1079	5,121825	5,860171	1,1845	0,631313	1985,739	1088,13	0,2888
2000	0,1656	2752,82	4,832937	5,54524	1,185	0,63624	2010	1104,54	-0,0415
3400	0,1778	2756,62	4,506475	5,24748	1,184	0,63413	2035	1134,17	0,0151
4800	0,1932	2739,33	4,122673	4,9671	1,184	0,6187	2042	1168,24	0,0206
5200	0,2179	2690,02	3,589605	4,45793	1,183	0,61235	2046	1181,6	0,1356
Степень сжатия 12									
840	0,1358	2792,44	5,982028	6,641764	1,182	0,637688	1977,094	1079,77	-0,021
2000	0,145	2766,24	5,551216	6,24414	1,182	0,63633	1980	1088,21	-0,1642
3400	0,1472	2804,53	5,543185	6,24414	1,183	0,63549	2008	1117,84	-0,0141
4800	0,1708	2764,25	4,707707	5,52516	1,183	0,62347	2023	1154,24	0,0208
5200	0,189	2726,17	4,196086	5,05054	1,183	0,6177	2027	1167,32	0,0274
Степень сжатия 14									
840	0,1165	2864,43	7,157005	7,668412	1,182	0,64455	1978,194	1076,53	0,049
2000	0,1293	2831,86	6,37186	6,9293	1,182	0,64664	1991	1088,65	0,0594
3400	0,1269	2866,9	6,575962	7,16688	1,182	0,64156	2005	1112,61	0,0546
4800	0,144	2838,47	5,737766	6,48031	1,182	0,63065	2022	1149,31	0,0265
5200	0,1555	2814,03	5,266759	6,06533	1,182	0,62578	2028	1162,92	-0,0068

Анализ результатов расчета индикаторных показателей рабочего цикла (таблица 7) показал, значительное улучшение мощностных показателей с увеличением степени сжатия, так рост индикаторной мощности составил почти 11 кВт на каждые 2 единицы увеличения степени сжатия. Это позволило значительно повысить индикаторный КПД двигателя, что отразилось на снижении удельного индикаторного расхода топлива. Также следует отметить рост среднего индикаторного давления и индикаторной работы цикла при увеличении степени сжатия.

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

Таблица 7 – Результаты расчета индикаторных показателей рабочего цикла

$n, \text{мин}^{-1}$	$L_i, \text{кДж}$	$P_i, \text{Мпа}$	$N_i, \text{кВт}$	$\eta_i$	$g_i, \text{г/кВт ч}$
Степень сжатия 8					
840	1,1463047	1,413667	19,89331	0,451663	181,4394
2000	1,1671121	1,432576	47,99858	0,454993	180,1114
3400	1,1827017	1,426461	81,24931	0,456735	179,4245
4800	1,1678933	1,367476	109,9618	0,442751	185,0917
5200	1,1600951	1,340219	116,7508	0,444834	184,2247
Степень сжатия 10					
840	1,260773	1,531814	21,5559	0,488097	167,896
2000	1,2794963	1,548076	51,86841	0,490112	167,2055
3400	1,2942705	1,540939	87,76978	0,491008	166,9007
4800	1,294561	1,49908	120,5443	0,481846	170,0742
5200	1,2878909	1,473448	128,3568	0,484735	169,0603
Степень сжатия 12					
840	1,3757178	1,663552	23,40973	0,529169	154,8644
2000	1,3784747	1,660921	55,64929	0,524776	156,1608
3400	1,405596	1,668099	95,01265	0,529898	154,6513
4800	1,4265061	1,64859	132,5667	0,527471	155,3629
5200	1,4025402	1,602649	139,6119	0,524293	156,3046
Степень сжатия 14					
840	1,4797119	1,784024	25,10503	0,566822	144,5772
2000	1,4905662	1,790976	60,00679	0,565077	145,0235
3400	1,5094396	1,787621	101,8205	0,566665	144,6172
4800	1,519202	1,753614	141,0119	0,559298	146,522
5200	1,5152908	1,730319	150,7336	0,563878	145,3319

Таблица 8 – Результаты расчета эффективных показателей рабочего цикла

$n, \text{мин}^{-1}$	$V_{п.ср}, \text{м/с}$	$P_m, \text{Мпа}$	$P_e, \text{Мпа}$	$\eta_m$	$\eta_e$	$g_e, \text{г/(кВт.ч)}$	$N_e, \text{кВт}$	$M_e, \text{Н.м}$	$G_t, \text{кг/ч}$
Степень сжатия 8									
840	2,212	0,059	1,3547	0,95827	0,43281	189,34102	19,0631	216,7135	3,60943
2000	5,2667	0,0935	1,3391	0,93472	0,42529	192,68949	44,8654	214,2166	8,64509
3400	8,9533	0,1352	1,2913	0,90524	0,41345	198,20674	73,5501	206,5739	14,5781
4800	12,64	0,1768	1,1906	0,87069	0,3855	212,58113	95,7423	190,4733	20,353
5200	13,693	0,1887	1,1515	0,85918	0,38219	214,4202	100,31	184,2087	21,5084
Степень сжатия 10									
840	2,212	0,059	1,4728	0,96149	0,4693	174,62127	20,7257	235,6141	3,61915
2000	5,2667	0,0935	1,4546	0,93959	0,46051	177,95505	48,7352	232,6936	8,67268
3400	8,9533	0,1352	1,4058	0,91228	0,44794	182,94913	80,0705	224,8874	14,6488
4800	12,64	0,1768	1,3222	0,88204	0,48334	192,81917	106,325	211,5266	20,5015
5200	13,693	0,1887	1,2847	0,87191	0,42265	193,89658	111,915	205,522	21,7
Степень сжатия 12									
840	2,212	0,1151	1,5485	0,93081	0,49256	166,37599	21,79	247,7133	3,62533
2000	5,2667	0,1511	1,5098	0,909	0,47702	171,79441	50,5851	241,5261	8,69024
3400	8,9533	0,1946	1,4734	0,88331	0,46806	175,08147	83,9257	235,7151	14,6938
4800	12,64	0,2382	1,4104	0,85554	0,45127	181,59586	113,416	225,6348	20,5959
5200	13,693	0,2506	1,3521	0,84365	0,44232	185,27286	117,783	216,297	21,822
Степень сжатия 14									
840	2,212	0,1151	1,6689	0,93548	0,53025	154,54835	23,4853	266,9859	3,62961
2000	5,2667	0,1511	1,6398	0,91561	0,51739	158,3906	54,9426	262,3316	8,70239
3400	8,9533	0,1946	1,593	0,89111	0,50496	162,2883	90,7335	254,8357	14,725
4800	12,64	0,2382	1,5155	0,86419	0,48334	169,54771	121,862	242,436	20,6614
5200	13,693	0,2506	1,4797	0,85518	0,48222	169,94271	128,905	236,721	21,9064

Анализ результатов расчета теплового баланса (таблица 9) показал, снижение тепловых потерь с отработавшими газами примерно на 1 – 2 % на каждые 2 единицы повышения степени сжатия. При этом снижение доли потерь на охлаждение двигателя наблюдается в большей степени при работе на степени сжатия 14 и степени сжатия 10.

Таблица 9 – Результаты расчета теплового баланса

п, мин <sup>-1</sup>	Q <sub>0</sub> , Дж/с	Q <sub>е</sub> , Дж/с	q <sub>е</sub> , %	Q <sub>в</sub> , Дж/с	q <sub>в</sub> , %	Q <sub>г</sub> , Дж/с	q <sub>г</sub> , %	Q <sub>ост</sub> , Дж/с	q <sub>ост</sub> , %
Степень сжатия 8									
840	44045	19063	43,281	9329,96	21,183	14948,539	33,9396	702,9507	1,596
2000	105493	44865	42,529	23660,7	22,4287	36767,918	34,8534	198,8891	0,18853
3400	177892	73550	41,345	34486,3	19,3862	64453,931	36,2322	5401,188	3,03623
4800	248360	95742	38,55	52465,7	21,1248	93434,168	37,6204	6718,227	2,70503
5200	262459	100310	38,219	55578,2	21,1759	100569,32	38,3181	6002,115	2,28688
Степень сжатия 10									
840	44163	20726	46,93	7971,72	18,0506	14386,908	32,5767	2,442821	2,44282
2000	105830	48735	46,051	20041,6	18,9376	35436,231	33,4842	1,527461	1,52746
3400	178754	80071	44,794	34486,3	19,2926	62220,199	34,8076	1,106194	1,10619
4800	250172	106325	42,501	52465,7	20,9718	90988,959	36,3706	0,156907	0,15691
5200	264798	111915	42,265	46629,3	17,6094	97776,764	36,9251	3,200955	3,20095
Степень сжатия 12									
840	44239	21790	49,256	9329,96	21,0901	13010,38	29,4095	108,2872	0,24478
2000	106044	50585	47,702	23660,7	22,3122	31623,429	29,8211	174,5733	0,16462
3400	179304	83926	46,806	34486,3	19,2335	55545,607	30,9785	5345,924	2,98149
4800	251325	113416	45,127	52465,7	20,8756	81624,671	32,4777	3818,156	1,51921
5200	266286	117783	44,232	55578,2	20,8716	87933,407	33,0222	4991,282	1,87441
Степень сжатия 14									
840	44291	23485	53,025	6811,22	15,3784	12952,954	29,2452	1041,406	2,35129
2000	106192	54943	51,739	16976,1	15,9862	31580,171	29,7387	2693,277	2,53623
3400	179684	90734	50,496	29056,8	16,1711	55216,579	30,7299	4676,849	2,60282
4800	252123	121862	48,334	36989,7	14,6713	81357,03	32,2688	11914,72	4,72576
5200	267316	128905	48,222	46629,3	17,4435	87825,346	32,8545	3956,673	1,48015

Приведем основные термодинамические параметры работы двигателя по результатам теплового расчета в таблице 10, 11, 12 и 13 для частот вращения 840, 2000, 3400, 4800 и 5200 мин<sup>-1</sup>, соответственно.

Таблица 10 – Основные термодинамические параметры работы двигателя при частоте вращения 840 мин<sup>-1</sup>.

Угол ПКВ, град.	Объем цилиндра	P <sub>i</sub> , при степени сжатия 8, МПа	P <sub>i</sub> , при степени сжатия 10, МПа	P <sub>i</sub> , при степени сжатия 12, МПа	P <sub>i</sub> , при степени сжатия 14, МПа
230	0,504567	0,11934804	0,119983105	0,120403315	0,12070071

Продолжение таблицы 10

231	0,501772	0,120264671	0,12093414	0,121377291	0,121691014
232	0,498925	0,121210971	0,121916382	0,122383518	0,122714318
233	0,496026	0,122187779	0,122930743	0,123422956	0,123771622
234	0,493075	0,12319597	0,123978174	0,12449661	0,124863967
235	0,490074	0,124236454	0,125059666	0,125605528	0,125992444
236	0,487021	0,125310179	0,126176253	0,126750803	0,127158189
237	0,483919	0,126418133	0,127329014	0,127933577	0,12836239
238	0,480766	0,127561343	0,128519071	0,129155039	0,129606287
239	0,477564	0,12874088	0,129747597	0,130416433	0,130891175
240	0,474313	0,129957859	0,131015814	0,131719057	0,132218406
241	0,471013	0,131213443	0,132324999	0,133064265	0,133589396
242	0,467666	0,132508841	0,133676481	0,134453475	0,135005622
243	0,464271	0,133845313	0,135071649	0,135888162	0,136468629
244	0,460829	0,135224174	0,136511953	0,137369873	0,137980031
245	0,457341	0,136646792	0,137998903	0,13890022	0,139541517
246	0,453807	0,138114595	0,13953408	0,14048089	0,141154854
247	0,450228	0,139629068	0,141119133	0,142113647	0,142821889
248	0,446604	0,141191763	0,142755781	0,143800333	0,144544555
249	0,442937	0,142804295	0,144445825	0,145542875	0,146324878
250	0,439227	0,14446835	0,146191143	0,147343292	0,148164975
251	0,435475	0,146185686	0,147993697	0,149203691	0,150067066
252	0,431681	0,147958136	0,14985554	0,151126281	0,152033474
253	0,427847	0,149787614	0,151778817	0,153113374	0,154066636
254	0,423973	0,151676114	0,153765771	0,155167388	0,156169103
255	0,42006	0,15362572	0,155818746	0,157290858	0,158343552
256	0,416108	0,155638606	0,157940198	0,15948644	0,160592788
257	0,41212	0,157717042	0,160132692	0,161756914	0,162919756
258	0,408095	0,159863396	0,162398916	0,164105199	0,165327544
259	0,404035	0,162080144	0,164741682	0,16653435	0,167819395
260	0,399941	0,164369871	0,167163935	0,169047574	0,170398713
261	0,395814	0,166735276	0,169668759	0,171648236	0,173069073
262	0,391654	0,16917918	0,172259386	0,174339866	0,175834234
263	0,387464	0,171704531	0,174939199	0,177126168	0,178698143
264	0,383243	0,174314411	0,177711748	0,180011034	0,181664951
265	0,378994	0,177012041	0,180580753	0,182998551	0,184739026
266	0,374717	0,179800789	0,183550113	0,186093012	0,187924961
267	0,370413	0,182684176	0,18662392	0,189298929	0,191227592
268	0,366085	0,185665885	0,189806466	0,192621047	0,194652008
269	0,361733	0,188749769	0,193102256	0,196064355	0,198203573
270	0,357358	0,191939858	0,196516017	0,199634101	0,201887935
271	0,352961	0,195240372	0,200052713	0,203335809	0,205711048
272	0,348545	0,198655722	0,203717558	0,207175292	0,209679192
273	0,344111	0,20219053	0,207516028	0,211158672	0,213798988
274	0,339659	0,20584963	0,211453876	0,215292398	0,218077426
275	0,335191	0,209638086	0,215537151	0,219583265	0,222521882
276	0,330709	0,213561197	0,219772209	0,224038433	0,227140145
277	0,326215	0,217624515	0,224165733	0,228665453	0,231940446
278	0,321709	0,221833852	0,228724754	0,233472289	0,236931482
279	0,317193	0,226195295	0,233456666	0,238467343	0,242122447
280	0,31267	0,230715221	0,238369248	0,243659481	0,247523065
281	0,308139	0,235400307	0,243470689	0,249058063	0,253143627
282	0,303604	0,240257549	0,248769606	0,254672973	0,258995021
283	0,299065	0,245294274	0,254275072	0,260514652	0,265088781



Продолжение таблицы 10

284	0,294524	0,250518157	0,259996639	0,266594132	0,271437119
285	0,289983	0,255937236	0,265944368	0,272923073	0,278052979
286	0,285444	0,261559932	0,272128855	0,2795138	0,284950082
287	0,280908	0,267395062	0,278561262	0,28637935	0,292142976
288	0,276377	0,27345186	0,285253348	0,293533511	0,299647095
289	0,271852	0,279739994	0,292217503	0,300990871	0,307478819
290	0,267336	0,286269585	0,299466782	0,308766869	0,315655534
291	0,26283	0,293051228	0,307014942	0,316877846	0,324195703
292	0,258336	0,300096004	0,314876479	0,325341103	0,33311894
293	0,253856	0,30741551	0,323066668	0,334174959	0,342446085
294	0,249391	0,31502187	0,331601604	0,343398817	0,35219929
295	0,244943	0,322927757	0,340498248	0,353033226	0,362402108
296	0,240514	0,331146411	0,349774464	0,363099956	0,373079587
297	0,236106	0,339691659	0,359449072	0,373622069	0,384258371
298	0,231721	0,34857793	0,369541889	0,384623997	0,39596681
299	0,22736	0,357820272	0,380073782	0,396131626	0,408235075
300	0,223025	0,367434364	0,391066709	0,408172379	0,421095277
301	0,218718	0,377436534	0,402543775	0,420775303	0,4345816
302	0,214441	0,387843761	0,414529275	0,433971168	0,448730435
303	0,210196	0,398673689	0,427048745	0,447792554	0,463580528
304	0,205984	0,409944624	0,440129005	0,462273954	0,479173128
305	0,201808	0,421675535	0,453798206	0,477451874	0,495552149
306	0,197668	0,433886045	0,468085867	0,493364932	0,512764337
307	0,193568	0,44659642	0,483022916	0,510053961	0,530859442
308	0,189508	0,459827544	0,498641718	0,527562109	0,549890397
309	0,18549	0,473600889	0,514976095	0,545934939	0,569913506
310	0,181517	0,487938477	0,532061347	0,56522052	0,590988624
311	0,17759	0,502862822	0,549934248	0,585469515	0,613179353
312	0,17371	0,518396867	0,568633035	0,606735261	0,636553227
313	0,16988	0,5345639	0,588197383	0,629073831	0,661181894
314	0,166101	0,551387452	0,608668348	0,652544079	0,687141292
315	0,162374	0,568891177	0,630088296	0,677207669	0,714511815
316	0,158703	0,587098704	0,652500799	0,703129071	0,743378449
317	0,155087	0,60603347	0,675950491	0,730375518	0,773830888
318	0,151529	0,625718519	0,700482894	0,75901693	0,805963614
319	0,148031	0,646176267	0,726144185	0,789125775	0,839875927
320	0,144594	0,667428238	0,752980918	0,82077687	0,87567191
321	0,141219	0,689494755	0,781039676	0,854047109	0,913460318
322	0,137908	0,712394589	0,810366658	0,88901509	0,953354375
323	0,134664	0,736144567	0,841007177	0,925760641	0,995471439
324	0,131486	0,760759127	0,873005074	0,96436422	1,039932529
325	0,128377	0,786249819	0,906402025	1,00490616	1,086861669
326	0,125338	0,812624759	0,941236739	1,04746575	1,136385019
327	0,122371	0,839888024	0,977544028	1,092120116	1,188629755
328	0,119477	0,868038988	1,015353746	1,138942886	1,24372264
329	0,116657	0,897071611	1,054689585	1,1880026	1,301788256
330	0,113913	0,926973668	1,095567719	1,239360845	1,362946819
331	0,111245	0,957725937	1,137995292	1,293070091	1,427311543
332	0,108656	0,989301344	1,181968755	1,349171194	1,494985474
333	0,106146	1,02166408	1,227472041	1,407690557	1,566057738
334	0,103717	1,0547687	1,274474605	1,468636931	1,640599164
335	0,101369	1,088559227	1,322929338	1,531997861	1,718657212
336	0,099105	1,122968273	1,372770382	1,597735775	1,800250192

Продолжение таблицы 10

337	0,096924	1,157916219	1,423910893	1,665783771	1,885360753
338	0,094828	1,19331046	1,476240792	1,736041141	1,973928684
339	0,092818	1,229044778	1,529624585	1,808368718	2,065843069
340	0,090895	1,264998857	1,583899322	1,882584175	2,160933944
341	0,08906	1,300992677	1,638872802	1,958457432	2,258963638
342	0,087314	1,337231991	1,69432213	2,035706368	2,359618078
343	0,085657	1,37397817	1,749778509	2,113993085	2,462498431
344	0,084091	1,411670978	1,805821113	2,192921016	2,56711356
345	0,082616	1,450938386	1,862969167	2,271622004	2,672873865
346	0,081232	1,492601493	1,922056832	2,351354389	2,779087186
347	0,079941	1,537672425	1,984240625	2,43316017	2,884957497
348	0,078743	1,587342939	2,05099595	2,518623388	2,989262475
349	0,077639	1,642961708	2,124097501	2,609859326	3,09483312
350	0,076629	1,705998879	2,205579008	2,709478584	3,204314672
351	0,075714	1,777997528	2,297669087	2,820515022	3,321447424
352	0,074894	1,860512955	2,402702189	2,946310211	3,450950469
353	0,07417	1,955042119	2,523006495	3,090352019	3,598325432
354	0,073541	2,062946551	2,660773559	3,256071248	3,769558774
355	0,073008	2,18537258	2,817916828	3,446606742	3,970720763
356	0,072572	2,323172613	2,995927373	3,664554388	4,207480149
357	0,072233	2,476830697	3,195735047	3,911717698	4,484572098
358	0,071991	2,646395079	3,417582388	4,188877156	4,805267277
359	0,071845	2,83142024	3,660917657	4,495593368	5,170889741
360	0,071797	3,030921095	3,924312932	4,830056919	5,580423693
361	0,071845	3,243342611	4,205413428	5,18899668	6,030240488
362	0,071991	3,466548683	4,50092472	5,567658093	6,513972083
363	0,072233	3,697834479	4,806644652	5,959862449	7,022555267
364	0,072572	3,933966163	5,117545895	6,358156122	7,544468241
365	0,073008	4,171250981	5,427912795	6,75405411	8,06617283
366	0,073541	4,405638846	5,731532495	7,13837497	8,572759332
367	0,07417	4,632854168	6,021935352	7,501654849	9,048767619
368	0,074894	4,848553693	6,292674152	7,834618105	9,479131255
369	0,075714	5,048503076	6,537626144	8,12867257	9,850166308
370	0,076629	5,228762034	6,751297303	8,376390428	10,15050875
371	0,077639	5,385865719	6,929105383	8,571932584	10,37189874
372	0,078743	5,51698876	7,067617752	8,711376173	10,5097196
373	0,079941	5,620078551	7,164722261	8,792912065	10,56322436
374	0,081232	5,69394602	7,219714423	8,816891257	10,53542043
375	0,082616	5,738305255	7,233291743	8,785714777	10,4326284
376	0,084091	5,753757759	7,207455142	8,703578974	10,26377497
377	0,085657	5,7417223	7,145327124	8,57610437	10,03951571
378	0,087314	5,704316692	7,050905047	8,40988896	9,771302453
379	0,08906	5,644202607	6,928774463	8,212033897	9,470509251
380	0,090895	5,564408045	6,783810717	7,989689609	9,147710775
381	0,092818	5,468143796	6,620896557	7,749663797	8,812172556
382	0,094828	5,358629851	6,444679315	7,498120705	8,471572106
383	0,096924	5,238945383	6,259384273	7,240386052	8,131932543
384	0,099105	5,111911994	6,06869226	6,980856808	7,797723129
385	0,101369	4,980015151	5,875680955	6,723002272	7,472067962
386	0,103717	4,845363863	5,682822137	6,469434515	7,157004579
387	0,106146	4,709684472	5,492022186	6,22202282	6,876449758
388	0,108656	4,574341487	5,304691015	5,982027962	6,607205634
389	0,111245	4,440376923	5,12182501	5,767522186	6,349164941

Продолжение таблицы 10

390	0,113913	4,308559638	4,957114819	5,560936111	6,102148256
391	0,116657	4,18894814	4,797574765	5,362215893	5,865918463
392	0,119477	4,072273995	4,643236386	5,171261714	5,640193363
393	0,122371	3,95861505	4,494096616	4,98793611	5,424656546
394	0,125338	3,848025708	4,350122805	4,812071333	5,218966667
395	0,128377	3,740539485	4,211257294	4,643475796	5,02276529
396	0,131486	3,636171433	4,077421547	4,481939681	4,835683448
397	0,134664	3,534920399	3,94851984	4,327239761	4,657347076
398	0,137908	3,436771133	3,824442552	4,179143519	4,487381463
399	0,141219	3,341696217	3,705069052	4,037412634	4,325414844
400	0,144594	3,249657837	3,590270238	3,901805914	4,171081267
401	0,148031	3,160609386	3,479910742	3,772081724	4,02402284
402	0,151529	3,074496918	3,37385083	3,647999984	3,883891443
403	0,155087	2,991260446	3,271948036	3,529323797	3,750350007
404	0,158703	2,910835108	3,174058552	3,415820747	3,623073424
405	0,162374	2,83315219	3,080038397	3,307263922	3,501749149
406	0,166101	2,758140046	2,9897444	3,203432694	3,386077557
407	0,16988	2,685724887	2,903035011	3,104113312	3,275772098
408	0,17371	2,615831485	2,819770964	3,009099309	3,170559288
409	0,17759	2,548383775	2,739815818	2,918191781	3,070178569
410	0,181517	2,483305379	2,663036375	2,831199544	2,974382075
411	0,18549	2,420520052	2,589303015	2,747939194	2,882934311
412	0,189508	2,359952061	2,518489938	2,668235088	2,795611782
413	0,193568	2,301526507	2,450475346	2,591919269	2,712202578
414	0,197668	2,245169595	2,385141557	2,518831327	2,632505927
415	0,201808	2,190808849	2,322375073	2,448818234	2,556331736
416	0,205984	2,138373298	2,26206661	2,381734141	2,483500114
417	0,210196	2,087793616	2,204111081	2,317440155	2,413840905
418	0,214441	2,039002238	2,148407569	2,255804099	2,347193211
419	0,218718	1,99193344	2,094859258	2,19670026	2,283404932
420	0,223025	1,946523403	2,043373359	2,140009135	2,222332312
421	0,22736	1,902710257	1,993861013	2,085617169	2,163839499
422	0,231721	1,8604341	1,946237188	2,033416498	2,107798122
423	0,236106	1,819637008	1,900420563	1,983304687	2,054086881
424	0,240514	1,780263031	1,856333412	1,935184483	2,002591158
425	0,244943	1,742258181	1,813901473	1,888963563	1,953202639
426	0,249391	1,705570404	1,77305383	1,844554295	1,905818964
427	0,253856	1,670149554	1,733722778	1,801873507	1,860343383
428	0,258336	1,635947354	1,695843697	1,760842261	1,816684437
429	0,26283	1,602917353	1,65935493	1,721385634	1,774755654
430	0,267336	1,571014885	1,624197654	1,683432516	1,73447526
431	0,271852	1,540197018	1,590315756	1,64691541	1,69576591
432	0,276377	1,510422504	1,557655718	1,611770239	1,658554428
433	0,280908	1,481651731	1,5261665	1,57793617	1,622771564
434	0,285444	1,453846662	1,495799424	1,545355441	1,588351774
435	0,289983	1,426970793	1,466508069	1,513973195	1,555232994
436	0,294524	1,400989092	1,438248164	1,48373733	1,523356447
437	0,299065	1,375867946	1,410977486	1,454598345	1,49266645
438	0,303604	1,351575116	1,384655766	1,426509206	1,463110234
439	0,308139	1,328079676	1,359244593	1,399425214	1,434637776
440	0,31267	1,305351969	1,334707327	1,373303874	1,407201646
441	0,317193	1,283363556	1,311009011	1,348104784	1,380756852
442	0,321709	1,262087165	1,288116293	1,323789518	1,355260705

Продолжение таблицы 10

443	0,326215	1,241496648	1,265997345	1,300321522	1,330672688
444	0,330709	1,221566931	1,244621792	1,277666017	1,30695433
445	0,335191	1,202273974	1,223960638	1,255789898	1,284069095
446	0,339659	1,183594726	1,203986203	1,234661651	1,261982267
447	0,344111	1,165507083	1,184672053	1,214251267	1,240660857
448	0,348545	1,147989849	1,165992946	1,19453016	1,2200735
449	0,352961	1,1310227	1,147924769	1,175471098	1,200190366
450	0,357358	1,114586141	1,130444487	1,157048124	1,18098308
451	0,361733	1,098661479	1,113530084	1,139236497	1,162424636
452	0,366085	1,08323078	1,097160524	1,122012623	1,144489328
453	0,370413	1,068276842	1,081315693	1,105354002	1,127152677
454	0,374717	1,053783163	1,065976362	1,089239164	1,110391364
455	0,378994	1,039733909	1,05112414	1,073647621	1,09418317
456	0,383243	1,026113888	1,036741438	1,058559816	1,078506917
457	0,387464	1,012908518	1,022811424	1,043957076	1,063342411
458	0,391654	1,000103807	1,009317996	1,029821566	1,048670393
459	0,395814	0,98768632	0,996245738	1,016136249	1,034472489
460	0,399941	0,975643163	0,983579895	1,002884842	1,020731164
461	0,404035	0,963961955	0,971306338	0,990051784	1,007429678
462	0,408095	0,952630806	0,959411534	0,977622196	0,994552046
463	0,41212	0,941638297	0,947882522	0,96558185	0,982083
464	0,416108	0,930973463	0,936706882	0,953917136	0,970007953
465	0,42006	0,920625767	0,925872714	0,94261503	0,958312963
466	0,423973	0,910585088	0,915368611	0,931663072	0,946984702
467	0,427847	0,900841701	0,905183637	0,92104933	0,936010425
468	0,431681	0,891386258	0,895307308	0,910762384	0,925377943
469	0,435475	0,882209778	0,885729567	0,900791294	0,915075595
470	0,439227	0,873303627	0,87644077	0,891125583	0,905092218
471	0,442937	0,864659503	0,867431664	0,881755211	0,895417132
472	0,446604	0,856269426	0,858693369	0,872670558	0,886040109
473	0,450228	0,848125722	0,850217365	0,863862403	0,876951355
474	0,453807	0,840221012	0,841995473	0,855321905	0,868141489
475	0,457341	0,832548198	0,834019842	0,84704059	0,859601523
476	0,460829	0,825100454	0,826282932	0,839010327	0,851322844
477	0,464271	0,817871211	0,818777506	0,83122332	0,8432972
478	0,467666	0,810854154	0,81149661	0,823672087	0,835516676
479	0,471013	0,804043202	0,804433566	0,816349452	0,827973686
480	0,474313	0,797432507	0,797581959	0,809248525	0,820660955
481	0,477564	0,791016442	0,790935626	0,802362696	0,813571506
482	0,480766	0,784789591	0,784488644	0,795685618	0,806698645
483	0,483919	0,778746741	0,778235323	0,7892112	0,800035951
484	0,487021	0,772882876	0,772170193	0,78293359	0,793577262
485	0,490074	0,767193168	0,766287997	0,776847172	0,787316665
486	0,493075	0,76167297	0,760583683	0,770946552	0,781248486
487	0,496026	0,756317811	0,755052395	0,765226547	0,775367279
488	0,498925	0,751123384	0,749689464	0,759682184	0,769667814
489	0,501772	0,746085547	0,744490403	0,754308681	0,764145074
490	0,504567	0,741200312	0,739450898	0,749101448	0,758794239
500	0,529589	0,69996415	0,696993932	0,705284665	0,713808901
510	0,549156	0,59996415	0,596993932	0,605284665	0,613808901

Таблица 11 – Основные термодинамические параметры работы двигателя при частоте вращения 2000 мин<sup>-1</sup>.

Угол ПКВ, град.	Объем цилиндра	P <sub>i</sub> , при степени сжатия 8, МПа	P <sub>i</sub> , при степени сжатия 10, МПа	P <sub>i</sub> , при степени сжатия 12, МПа	P <sub>i</sub> , при степени сжатия 14, МПа
230	0,504567	0,11845566	0,119086178	0,119503766	0,119799003
231	0,501772	0,119365497	0,120030172	0,120470558	0,120782003
232	0,498925	0,120304783	0,121005143	0,121469362	0,121797762
233	0,496026	0,121274352	0,122011996	0,122501134	0,122847269
234	0,493075	0,122275072	0,123051674	0,123566871	0,123931561
235	0,490074	0,123307846	0,124125163	0,124667612	0,12505172
236	0,487021	0,124373616	0,125233488	0,125804443	0,126208872
237	0,483919	0,125473361	0,126377718	0,126978497	0,127404198
238	0,480766	0,126608101	0,12755897	0,128190955	0,128638929
239	0,477564	0,127778901	0,128778408	0,129443053	0,129914349
240	0,474313	0,128986866	0,130037244	0,130736077	0,131231803
241	0,471013	0,13023315	0,131336745	0,132071374	0,132592695
242	0,467666	0,131518955	0,132678232	0,133450348	0,13399849
243	0,464271	0,13284553	0,134063083	0,134874467	0,135450723
244	0,460829	0,134214181	0,135492736	0,136345264	0,136950996
245	0,457341	0,135626267	0,136968692	0,137864341	0,138500987
246	0,453807	0,137083203	0,13849252	0,139433373	0,140102448
247	0,450228	0,138586465	0,140065856	0,141054108	0,141757214
248	0,446604	0,140137594	0,141690408	0,142728378	0,143467204
249	0,442937	0,141738191	0,143367961	0,144458096	0,145234428
250	0,439227	0,143389932	0,145100382	0,146245263	0,147060989
251	0,435475	0,145094561	0,146889618	0,148091974	0,148949089
252	0,431681	0,146853897	0,148737706	0,15000042	0,150901037
253	0,427847	0,14866984	0,150646776	0,151972897	0,15291925
254	0,423973	0,150544371	0,152619054	0,154011806	0,155006261
255	0,42006	0,152479557	0,154656869	0,156119662	0,157164727
256	0,416108	0,154477557	0,156762655	0,158299103	0,159397435
257	0,41212	0,156540623	0,158938962	0,160552889	0,161707305
258	0,408095	0,158671108	0,161188457	0,162883916	0,164097406
259	0,404035	0,160871468	0,163513931	0,165295219	0,166570956
260	0,399941	0,163144269	0,165918308	0,167789981	0,169131333
261	0,395814	0,165492191	0,16840465	0,170371542	0,171782089
262	0,391654	0,167918034	0,170976163	0,173043406	0,174526953
263	0,387464	0,170424726	0,173636209	0,175809252	0,177369844
264	0,383243	0,173015324	0,176388309	0,178672942	0,180314885
265	0,378994	0,175693026	0,179236156	0,181638534	0,18336641
266	0,374717	0,178461175	0,182183622	0,18471029	0,18652898
267	0,370413	0,181323267	0,185234769	0,18789269	0,189807395
268	0,366085	0,184282959	0,188393857	0,191190443	0,193206709
269	0,361733	0,187344074	0,191665358	0,194608504	0,196732245
270	0,357358	0,190510615	0,195053965	0,198152081	0,200389611
271	0,352961	0,193786768	0,198564606	0,201826659	0,204184719
272	0,348545	0,197176914	0,202202456	0,205638009	0,208123802
273	0,344111	0,200685639	0,205972952	0,20959221	0,212213435
274	0,339659	0,204317744	0,209881806	0,213695662	0,216460555
275	0,335191	0,208078255	0,213935021	0,217955111	0,220872487
276	0,330709	0,211972433	0,218138907	0,222377667	0,225456963
277	0,326215	0,216005788	0,222500099	0,226970827	0,230222155
278	0,321709	0,220184091	0,227025577	0,231742496	0,235176696

Продолжение таблицы 11

279	0,317193	0,224513384	0,231722681	0,236701015	0,240329715
280	0,31267	0,228999998	0,236599133	0,241855187	0,245690867
281	0,308139	0,23365056	0,241663063	0,247214305	0,251270366
282	0,303604	0,238472016	0,246923025	0,252788181	0,257079025
283	0,299065	0,24347164	0,252388026	0,258587181	0,263128292
284	0,294524	0,248657049	0,258067549	0,264622258	0,269430293
285	0,289983	0,254036225	0,263971582	0,270904987	0,275997878
286	0,285444	0,259617526	0,270110643	0,277447606	0,28284467
287	0,280908	0,265409705	0,276495814	0,284263058	0,289985112
288	0,276377	0,27142193	0,283138769	0,29136503	0,297434528
289	0,271852	0,277663798	0,290051807	0,298768008	0,30520918
290	0,267336	0,284145356	0,297247889	0,306487317	0,313326329
291	0,26283	0,29087712	0,304740672	0,314539184	0,321804306
292	0,258336	0,297870095	0,312544547	0,322940784	0,330662584
293	0,253856	0,305135791	0,320674679	0,331710305	0,339921854
294	0,249391	0,312686243	0,329147047	0,340867011	0,34960411
295	0,244943	0,320534033	0,337978487	0,350431304	0,359732735
296	0,240514	0,328692306	0,347186735	0,360424799	0,370332599
297	0,236106	0,337174787	0,356790475	0,370870391	0,381430155
298	0,231721	0,345995801	0,36680938	0,381792339	0,393053551
299	0,22736	0,355170286	0,377264167	0,393216343	0,405232742
300	0,223025	0,364713809	0,388176635	0,40516963	0,41799961
301	0,218718	0,374642578	0,399569723	0,417681041	0,431388095
302	0,214441	0,384973451	0,41146755	0,430781125	0,445434329
303	0,210196	0,395723942	0,423895467	0,444502229	0,460176781
304	0,205984	0,406912226	0,436880102	0,458878603	0,475656407
305	0,201808	0,418557134	0,450449401	0,47394649	0,491916808
306	0,197668	0,430678147	0,464632674	0,489744235	0,509004398
307	0,193568	0,443295386	0,479460623	0,506312379	0,526968573
308	0,189508	0,456429582	0,49496538	0,523693764	0,54586189
309	0,18549	0,470102053	0,511180526	0,541933629	0,565740253
310	0,181517	0,484334663	0,528141106	0,561079702	0,586663093
311	0,17759	0,499149762	0,545883629	0,581182286	0,60869356
312	0,17371	0,514570129	0,564446059	0,602294341	0,63189871
313	0,16988	0,530618885	0,583867785	0,624471541	0,656349684
314	0,166101	0,547319389	0,604189569	0,647772324	0,682121883
315	0,162374	0,564695127	0,625453475	0,672257919	0,709295132
316	0,158703	0,582769557	0,647702759	0,697992338	0,737953816
317	0,155087	0,60156595	0,67098174	0,725042341	0,768186998
318	0,151529	0,621107183	0,695335612	0,753477355	0,800088494
319	0,148031	0,641415513	0,720810224	0,783369335	0,833756902
320	0,144594	0,66251231	0,747451796	0,814792574	0,869295573
321	0,141219	0,684417751	0,775306581	0,847823424	0,9068125
322	0,137908	0,707150474	0,804420447	0,882539931	0,94642011
323	0,134664	0,730727189	0,834838387	0,919021364	0,988234937
324	0,131486	0,75516223	0,866603931	0,957347617	1,032377154
325	0,128377	0,780467068	0,89975846	0,997598462	1,078969916
326	0,125338	0,806649764	0,93434041	1,039852635	1,128138504
327	0,122371	0,833714367	0,970384348	1,084186727	1,180009205
328	0,119477	0,861660262	1,007919921	1,130673853	1,234707903
329	0,116657	0,890481455	1,046970658	1,179382082	1,292358312
330	0,113913	0,920165814	1,087552622	1,230372579	1,35307982
331	0,111245	0,95069426	1,129672918	1,283697456	1,41698486

Продолжение таблицы 11

332	0,108656	0,98203992	1,173328026	1,339397295	1,484175769
333	0,106146	1,014167248	1,218502007	1,397498331	1,554741072
334	0,103717	1,047031133	1,265164543	1,458009272	1,628751122
335	0,101369	1,080576006	1,313268874	1,520917769	1,706253071
336	0,099105	1,114734972	1,362749625	1,586186537	1,787265128
337	0,096924	1,149450388	1,413520584	1,65374917	1,8717701
338	0,094828	1,184784717	1,465472474	1,72350569	1,959708229
339	0,092818	1,220889207	1,518355824	1,795317938	2,050969417
340	0,090895	1,25802042	1,57248186	1,869004897	2,145384931
341	0,08906	1,296548085	1,628153634	1,944013786	2,24271881
342	0,087314	1,336961125	1,685855461	2,021111926	2,342659227
343	0,085657	1,379870865	1,746261893	2,100887404	2,444810189
344	0,084091	1,426010278	1,810242912	2,184230558	2,548084236
345	0,082616	1,476228105	1,878862816	2,272339103	2,654161779
346	0,081232	1,531476796	1,953370316	2,366714848	2,764269011
347	0,079941	1,592793482	2,035177605	2,469146368	2,880185804
348	0,078743	1,66127362	2,125826692	2,581672889	3,004226283
349	0,077639	1,738037509	2,226942176	2,706525851	3,139195182
350	0,076629	1,824190503	2,340170784	2,846046429	3,288307472
351	0,075714	1,920778222	2,467109245	3,002579667	3,455063379
352	0,074894	2,028738469	2,609223226	3,178348498	3,643076215
353	0,07417	2,148851682	2,767760859	3,375313246	3,855856815
354	0,073541	2,281691706	2,943664783	3,595023929	4,096564816
355	0,073008	2,427578574	3,137486709	3,838473518	4,36774219
356	0,072572	2,586534822	3,349308346	4,105960428	4,671047436
357	0,072233	2,758246934	3,578672453	4,3969683	5,007009336
358	0,071991	2,942033618	3,824527776	4,710070826	5,374818058
359	0,071845	3,136822857	4,085191793	5,042869161	5,772169633
360	0,071797	3,341139914	4,358335279	5,391969172	6,19517811
361	0,071845	3,553108559	4,640992582	5,75300504	6,638367908
362	0,071991	3,770467685	4,929600933	6,120714261	7,09475644
363	0,072233	3,990605034	5,220071018	6,489066593	7,556033002
364	0,072572	4,210609054	5,507889323	6,851446059	8,012834031
365	0,073008	4,427338853	5,788250642	7,200880885	8,455107087
366	0,073541	4,637510981	6,056216627	7,530311747	8,872547219
367	0,07417	4,83780039	6,30689377	7,832884398	9,255080833
368	0,074894	5,024951505	6,535621877	8,102249233	9,593365093
369	0,075714	5,195894143	6,738162349	8,332848166	9,879266365
370	0,076629	5,347858024	6,910874518	8,520168653	10,10628031
371	0,077639	5,478479087	7,050868264	8,660946125	10,26985911
372	0,078743	5,585890832	7,156122136	8,753299355	10,36761833
373	0,079941	5,668794472	7,225558244	8,79678829	10,39940586
374	0,081232	5,726502839	7,259068212	8,792390038	10,36722811
375	0,082616	5,758954731	7,257488169	8,742395585	10,27504184
376	0,084091	5,766698442	7,222524751	8,650236489	10,12843256
377	0,085657	5,750845591	7,156638087	8,520256661	9,934210962
378	0,087314	5,712998634	7,062891154	8,357448665	9,699965209
379	0,08906	5,655157518	6,944777424	8,167176136	9,433609306
380	0,090895	5,579612466	6,806040082	7,954903875	9,142964902
381	0,092818	5,48883076	6,650496021	7,725954759	8,835407172
382	0,094828	5,38534548	6,48187649	7,485308405	8,517595422
383	0,096924	5,271653468	6,303693729	7,237450997	8,195297681
384	0,099105	5,150128412	6,119139704	6,986279729	7,873307444

Продолжение таблицы 11

385	0,101369	5,022953065	5,931019424	6,735059718	7,555441459
386	0,103717	4,892072556	5,741717905	6,48642666	7,24460113
387	0,106146	4,759168621	5,553196986	6,242425422	6,942877161
388	0,108656	4,625652852	5,367016158	6,004573388	6,651677326
389	0,111245	4,492675681	5,184370562	5,773937525	6,371860031
390	0,113913	4,361147103	5,006139231	5,551215564	6,123925487
391	0,116657	4,231764911	4,832937358	5,352808339	5,886819263
392	0,119477	4,105046534	4,677493321	5,162156144	5,660257987
393	0,122371	3,990454725	4,527284109	4,979121628	5,44392395
394	0,125338	3,87895822	4,382276912	4,803537207	5,237474424
395	0,128377	3,770590783	4,24241373	4,635211502	5,04054953
396	0,131486	3,66536756	4,107615536	4,473934932	4,852778829
397	0,134664	3,56328736	3,977785991	4,319484533	4,673786772
398	0,137908	3,464334778	3,852814754	4,171628073	4,503197165
399	0,141219	3,368482141	3,732580396	4,03012753	4,340636782
400	0,144594	3,275691297	3,616952951	3,89474202	4,185738237
401	0,148031	3,185915228	3,505796139	3,765230219	4,038142239
402	0,151529	3,09909952	3,39896928	3,641352366	3,897499313
403	0,155087	3,015183666	3,296328941	3,52287188	3,763471083
404	0,158703	2,934102247	3,197730329	3,409556658	3,635731179
405	0,162374	2,855785963	3,103028478	3,301180095	3,513965851
406	0,166101	2,780162555	3,012079234	3,197521872	3,39787432
407	0,16988	2,707157608	2,924740069	3,09836853	3,287168934
408	0,17371	2,636695257	2,840870759	3,003513894	3,181575159
409	0,17759	2,568698795	2,760333915	2,912759339	3,080831441
410	0,181517	2,503091197	2,682995417	2,825913954	2,984688966
411	0,18549	2,439795576	2,608724741	2,742794597	2,892911342
412	0,189508	2,378735563	2,537395215	2,663225879	2,805274223
413	0,193568	2,319835631	2,468884189	2,587040084	2,721564894
414	0,197668	2,263021364	2,403073158	2,514077037	2,641581822
415	0,201808	2,20821968	2,339847832	2,444183936	2,565134194
416	0,205984	2,155359014	2,279098157	2,377215146	2,492041441
417	0,210196	2,104369461	2,220718314	2,31303198	2,422132762
418	0,214441	2,055182891	2,164606672	2,251502457	2,355246654
419	0,218718	2,007733033	2,110665736	2,192501052	2,291230446
420	0,223025	1,961955536	2,058802062	2,135908444	2,22993984
421	0,22736	1,917788015	2,008926164	2,081611248	2,171238477
422	0,231721	1,87517007	1,96095241	2,029501763	2,114997503
423	0,236106	1,834043294	1,914798904	1,979477712	2,061095167
424	0,240514	1,794351276	1,870387368	1,931441989	2,00941642
425	0,244943	1,756039576	1,827643016	1,885302414	1,959852546
426	0,249391	1,719055712	1,786494426	1,840971491	1,912300803
427	0,253856	1,683349121	1,746873413	1,798366176	1,866664082
428	0,258336	1,648871125	1,7087149	1,757407654	1,822850584
429	0,26283	1,615574891	1,671956788	1,718021119	1,780773515
430	0,267336	1,583415383	1,636539834	1,680135572	1,740350801
431	0,271852	1,552349315	1,602407528	1,643683623	1,701504808
432	0,276377	1,522335098	1,569505969	1,608601295	1,66416209
433	0,280908	1,493332791	1,537783752	1,574827853	1,628253143
434	0,285444	1,465304048	1,50719185	1,542305625	1,593712178
435	0,289983	1,438212061	1,47768351	1,510979843	1,560476907
436	0,294524	1,41202151	1,449214144	1,480798488	1,528488333
437	0,299065	1,386698506	1,421741227	1,451712137	1,49769057
438	0,303604	1,362210544	1,3952242	1,423673835	1,468030655



Продолжение таблицы 11

439	0,308139	1,338526445	1,369624376	1,396638951	1,439458382
440	0,31267	1,315616308	1,344904852	1,370565063	1,411926147
441	0,317193	1,29345146	1,32103042	1,345411831	1,385388794
442	0,321709	1,272004406	1,297967486	1,321140893	1,359803477
443	0,326215	1,251248781	1,275683995	1,297715757	1,335129532
444	0,330709	1,231159309	1,254149351	1,275101697	1,311328347
445	0,335191	1,211711751	1,233334351	1,253265665	1,288363252
446	0,339659	1,192882868	1,213211112	1,232176198	1,266199407
447	0,344111	1,174650374	1,193753012	1,211803337	1,244803702
448	0,348545	1,156992901	1,174934624	1,192118544	1,224144657
449	0,352961	1,139889958	1,156731662	1,17309463	1,204192336
450	0,357358	1,123321891	1,139120923	1,154705683	1,184918258
451	0,361733	1,107269854	1,122080233	1,136927003	1,166295323
452	0,366085	1,091715766	1,105588402	1,119735037	1,148297729
453	0,370413	1,076642286	1,08962517	1,103107319	1,13090091
454	0,374717	1,062032777	1,074171169	1,087022418	1,114081462
455	0,378994	1,047871276	1,059207875	1,07145988	1,097817086
456	0,383243	1,034142466	1,044717569	1,056400181	1,082086527
457	0,387464	1,020831647	1,030683299	1,04182468	1,06686952
458	0,391654	1,007924712	1,017088843	1,027715571	1,052146736
459	0,395814	0,99540812	1,003918675	1,014055846	1,037899734
460	0,399941	0,983268868	0,991157932	1,000829252	1,024110917
461	0,404035	0,971494476	0,97879238	0,988020252	1,010763484
462	0,408095	0,960072958	0,96680839	0,975613994	0,997841393
463	0,41212	0,948992802	0,955192905	0,963596274	0,985329323
464	0,416108	0,938242953	0,943933414	0,951953505	0,973212632
465	0,42006	0,92781279	0,93301793	0,940672686	0,96147733
466	0,423973	0,917692108	0,922434963	0,929741378	0,95011004
467	0,427847	0,907871103	0,912173497	0,919147671	0,939097973
468	0,431681	0,898340354	0,902222971	0,908880162	0,928428895
469	0,435475	0,889090805	0,892573255	0,898927933	0,918091104
470	0,439227	0,880113751	0,883214633	0,889280523	0,908073398
471	0,442937	0,871400825	0,874137784	0,879927911	0,898365058
472	0,446604	0,862943981	0,865333764	0,870860493	0,88895582
473	0,450228	0,854735484	0,856793989	0,862069064	0,879835854
474	0,453807	0,846767895	0,848510222	0,8535448	0,870995747
475	0,457341	0,839034057	0,840474552	0,84527924	0,862426479
476	0,460829	0,83152709	0,832679387	0,837264268	0,854119407
477	0,464271	0,824240373	0,825117432	0,829492101	0,846066247
478	0,467666	0,817167537	0,817781685	0,821955272	0,838259059
479	0,471013	0,810302456	0,810665418	0,814646616	0,83069023
480	0,474313	0,803639232	0,80376217	0,807559256	0,823352457
481	0,477564	0,797172192	0,79706573	0,800686594	0,81623874
482	0,480766	0,790895877	0,790570133	0,794022294	0,809342361
483	0,483919	0,784805033	0,784269646	0,787560274	0,802656876
484	0,487021	0,778894603	0,77815876	0,781294695	0,796176101
485	0,490074	0,77315972	0,772232179	0,77521995	0,789894104
486	0,493075	0,7675957	0,766484813	0,769330654	0,783805188
487	0,496026	0,762198034	0,76091177	0,763621636	0,77790389
488	0,498925	0,756962382	0,755508347	0,758087927	0,772184962
489	0,501772	0,751884569	0,750270023	0,752724759	0,766643367
490	0,504567	0,746960573	0,745192453	0,747527546	0,76127427
500	0,529589	0,705397448	0,702414503	0,703795339	0,716135617
510	0,549156	0,605397448	0,602414503	0,603795339	0,616135617

Таблица 12 – Основные термодинамические параметры работы двигателя при частоте вращения 3400 мин<sup>-1</sup>.

Угол ПКВ, град.	Объем цилиндра	P <sub>i</sub> , при степени сжатия 8, МПа	P <sub>i</sub> , при степени сжатия 10, МПа	P <sub>i</sub> , при степени сжатия 12, МПа	P <sub>i</sub> , при степени сжатия 14, МПа
230	0,504567	0,116404478	0,117024699	0,117435707	0,117726338
231	0,501772	0,117298554	0,117952372	0,118385817	0,118692402
232	0,498925	0,118221569	0,118910487	0,119367387	0,11969066
233	0,496026	0,119174342	0,119899932	0,120381357	0,120722086
234	0,493075	0,120157726	0,120921636	0,121428705	0,121787699
235	0,490074	0,121172609	0,121976565	0,122510455	0,12288856
236	0,487021	0,122219915	0,123065729	0,123627672	0,12402578
237	0,483919	0,123300609	0,124190177	0,12478147	0,125200516
238	0,480766	0,124415692	0,125351008	0,125973011	0,126413978
239	0,477564	0,125566209	0,126549364	0,127203508	0,12766743
240	0,474313	0,126753248	0,127786438	0,128474226	0,128962193
241	0,471013	0,127977941	0,129063474	0,129786488	0,130299646
242	0,467666	0,129241471	0,13038177	0,131141675	0,131681231
243	0,464271	0,130545065	0,131742681	0,132541229	0,133108454
244	0,460829	0,131890005	0,13314762	0,133986656	0,134582892
245	0,457341	0,133277628	0,134598063	0,135479531	0,136106192
246	0,453807	0,134709323	0,136095549	0,1370215	0,137680078
247	0,450228	0,136186543	0,137641688	0,138614282	0,139306352
248	0,446604	0,137710799	0,139238158	0,140259676	0,140986901
249	0,442937	0,139283667	0,140886714	0,141959563	0,1427237
250	0,439227	0,140906793	0,142589189	0,143715909	0,144518815
251	0,435475	0,142581889	0,144347499	0,145530774	0,146374413
252	0,431681	0,144310746	0,146163643	0,14740631	0,148292761
253	0,427847	0,146095228	0,148039716	0,149344774	0,150276234
254	0,423973	0,147937283	0,149977905	0,151348526	0,152327325
255	0,42006	0,149838942	0,151980498	0,153420038	0,154448642
256	0,416108	0,151802327	0,154049889	0,155561902	0,156642925
257	0,41212	0,15382965	0,156188582	0,157776831	0,158913046
258	0,408095	0,155923224	0,158399198	0,16006767	0,161262019
259	0,404035	0,158085462	0,160684482	0,162437403	0,163693007
260	0,399941	0,160318886	0,163047305	0,164889159	0,166209332
261	0,395814	0,162626129	0,165490678	0,167426218	0,168814483
262	0,391654	0,165009943	0,16801775	0,170052027	0,171512125
263	0,387464	0,167473204	0,170631826	0,172770199	0,174306113
264	0,383243	0,170018918	0,173336367	0,175584532	0,177200496
265	0,378994	0,172650226	0,176135001	0,178499013	0,180199536
266	0,374717	0,175370414	0,179031534	0,18151783	0,183307714
267	0,370413	0,178182918	0,182029956	0,184645387	0,186529749
268	0,366085	0,181091329	0,185134456	0,187886313	0,189870607
269	0,361733	0,184099406	0,188349427	0,191245475	0,193335522
270	0,357358	0,187211082	0,191679483	0,194727995	0,196930005
271	0,352961	0,19043047	0,195129465	0,198339261	0,200659867
272	0,348545	0,193761876	0,198704459	0,202084947	0,204531233
273	0,344111	0,197209806	0,202409809	0,205971025	0,208550567
274	0,339659	0,200778978	0,206251128	0,210003788	0,212724688
275	0,335191	0,20447433	0,210234315	0,214189865	0,217060793
276	0,330709	0,208301032	0,214365572	0,218536244	0,221566485
277	0,326215	0,2122645	0,21865142	0,223050291	0,226249793
278	0,321709	0,216370403	0,223098716	0,227739779	0,231119204
279	0,317193	0,22062468	0,227714676	0,232612904	0,236183691

Продолжение таблицы 12

280	0,31267	0,22503355	0,232506888	0,237678318	0,241452743
281	0,308139	0,229603528	0,237483341	0,242945154	0,246936401
282	0,303604	0,234341438	0,242652442	0,248423057	0,25264529
283	0,299065	0,239254426	0,248023043	0,254122214	0,258590665
284	0,294524	0,244349981	0,253604464	0,26005339	0,264784445
285	0,289983	0,249635944	0,259406518	0,266227961	0,271239259
286	0,285444	0,255120528	0,265439545	0,272657957	0,277968498
287	0,280908	0,260812336	0,271714434	0,279356097	0,284986357
288	0,276377	0,266720375	0,278242658	0,286335834	0,2923079
289	0,271852	0,272854076	0,285036304	0,293611405	0,29994911
290	0,267336	0,279223313	0,292108109	0,301197874	0,307926954
291	0,26283	0,28583842	0,299471495	0,309111187	0,316259449
292	0,258336	0,292710209	0,307140605	0,317368227	0,324965736
293	0,253856	0,299849991	0,315130342	0,325986869	0,334066154
294	0,249391	0,307269594	0,32345641	0,334986046	0,343582319
295	0,244943	0,31498138	0,332135354	0,344385813	0,353537218
296	0,240514	0,322998267	0,341184606	0,35420741	0,363955294
297	0,236106	0,331333743	0,350622526	0,364473344	0,37486255
298	0,231721	0,340001882	0,360468449	0,375207457	0,386286654
299	0,22736	0,349017365	0,370742734	0,386435008	0,39825705
300	0,223025	0,358395489	0,381466805	0,398182757	0,410805075
301	0,218718	0,36815218	0,392663205	0,410479053	0,423964093
302	0,214441	0,378304003	0,404355638	0,42335392	0,437769618
303	0,210196	0,38886817	0,416569018	0,436839153	0,452259464
304	0,205984	0,39986254	0,429329513	0,450968413	0,467473889
305	0,201808	0,411305617	0,44266459	0,465777325	0,483455752
306	0,197668	0,423216546	0,456603051	0,481303575	0,500250676
307	0,193568	0,435615097	0,471175071	0,497587013	0,517907214
308	0,189508	0,448521642	0,486412228	0,514669746	0,536477032
309	0,18549	0,46195713	0,502347525	0,532596239	0,556015078
310	0,181517	0,475943044	0,519015401	0,551413404	0,576579774
311	0,17759	0,490501349	0,536451739	0,571170684	0,598233196
312	0,17371	0,505654427	0,554693849	0,591920132	0,621041257
313	0,16988	0,521424997	0,573780439	0,61371647	0,64507389
314	0,166101	0,537836015	0,593751571	0,636617139	0,670405214
315	0,162374	0,554910558	0,614648584	0,660682318	0,697113695
316	0,158703	0,572671679	0,636513991	0,685974929	0,725282285
317	0,155087	0,591142244	0,659391346	0,712560588	0,754998534
318	0,151529	0,610344732	0,683325065	0,740507537	0,786354663
319	0,148031	0,630301015	0,708360209	0,769886503	0,819447597
320	0,144594	0,651032092	0,734542202	0,800770509	0,854378933
321	0,141219	0,672557789	0,761916501	0,833234604	0,891254831
322	0,137908	0,694896423	0,790528186	0,867355502	0,930185808
323	0,134664	0,718064411	0,820421475	0,903211121	0,971286426
324	0,131486	0,74207584	0,851639149	0,940879991	1,014674817
325	0,128377	0,766941981	0,88422188	0,980440524	1,060472053
326	0,125338	0,792670754	0,91820744	1,021970115	1,108801289
327	0,122371	0,81926614	0,953629806	1,06554405	1,159786678
328	0,119477	0,846727531	0,990518114	1,111234202	1,213551973
329	0,116657	0,875049038	1,028895489	1,159107479	1,270218797
330	0,113913	0,90421874	1,068777722	1,20922401	1,329904522
331	0,111245	0,934217887	1,110171796	1,261635023	1,392719685
332	0,108656	0,965020071	1,153074256	1,316380416	1,458764901

Продолжение таблицы 12

333	0,106146	0,996688309	1,197469438	1,373485983	1,528127206
334	0,103717	1,029183485	1,24332755	1,432960294	1,600875778
335	0,101369	1,062609215	1,290626186	1,494791221	1,677056989
336	0,099105	1,097133098	1,339481383	1,558900041	1,75668876
337	0,096924	1,13299219	1,39010609	1,62569075	1,839754213
338	0,094828	1,170497839	1,44282185	1,695633766	1,926194631
339	0,092818	1,210039414	1,498065655	1,769393357	2,015661677
340	0,090895	1,252086381	1,556395632	1,847835313	2,109249461
341	0,08906	1,297188091	1,618494305	1,932031865	2,207953455
342	0,087314	1,345970684	1,685168198	2,023260823	2,313144142
343	0,085657	1,399130491	1,757342504	2,122996132	2,426568026
344	0,084091	1,457423503	1,836049641	2,232887327	2,550338744
345	0,082616	1,521650603	1,922410734	2,354725837	2,686910327
346	0,081232	1,59263853	2,017609397	2,490396836	2,839026386
347	0,079941	1,671216822	2,122857706	2,641816308	3,009640746
348	0,078743	1,758191204	2,239354745	2,810854135	3,201807462
349	0,077639	1,854314162	2,368238689	2,999245048	3,418540974
350	0,076629	1,960253515	2,510533835	3,208490224	3,662650114
351	0,075714	2,076559936	2,667094351	3,43975305	3,936552214
352	0,074894	2,203634339	2,838546739	3,693753133	4,242075569
353	0,07417	2,341696099	3,025233173	3,970663205	4,58025991
354	0,073541	2,490753074	3,227157989	4,270014128	4,951165704
355	0,073008	2,650574484	3,443939745	4,590613824	5,353704234
356	0,072572	2,820667809	3,674771419	4,930486452	5,785501569
357	0,072233	3,000260987	3,918391435	5,28683841	6,242810311
358	0,071991	3,188291303	4,17306826	5,656057417	6,720482899
359	0,071845	3,383402359	4,436601149	6,033749952	7,212018595
360	0,071797	3,583950479	4,706339267	6,414820517	7,709692658
361	0,071845	3,788021625	4,97922071	6,793593651	8,204770695
362	0,071991	3,993459576	5,251832046	7,16397649	8,687804024
363	0,072233	4,197905585	5,520487773	7,51965628	9,148994003
364	0,072572	4,39884913	5,781327802	7,854323893	9,578605543
365	0,073008	4,593688643	6,030429685	8,161911589	9,967403641
366	0,073541	4,779800421	6,263931037	8,436831214	10,30708262
367	0,07417	4,954613204	6,478156562	8,674198144	10,59065654
368	0,074894	5,115685343	6,669743344	8,870026599	10,81278129
369	0,075714	5,260781024	6,835757789	9,021383604	10,96998391
370	0,076629	5,387941834	6,973797739	9,126491604	11,06078255
371	0,077639	5,495549908	7,082073964	9,184773437	11,08568961
372	0,078743	5,582379246	7,1594663	9,196837566	11,04710088
373	0,079941	5,647632268	7,205551221	9,164405841	10,94908296
374	0,081232	5,690959492	7,220599367	9,090190227	10,79707943
375	0,082616	5,712461147	7,205543451	8,977728369	10,597562
376	0,084091	5,71267064	7,161918852	8,83119047	10,3576558
377	0,085657	5,692520903	7,091780929	8,655171327	10,08476798
378	0,087314	5,653295713	6,997604475	8,454481522	9,786245556
379	0,08906	5,596568988	6,882171739	8,233950717	9,46908353
380	0,090895	5,524135787	6,748455864	7,998253903	9,139697037
381	0,092818	5,437939109	6,599506543	7,751768608	8,803764091
382	0,094828	5,339996695	6,438344049	7,498467757	8,466138221
383	0,096924	5,232331767	6,267866763	7,241849582	8,130824264
384	0,099105	5,116911123	6,090775872	6,984902919	7,801006261
385	0,101369	4,995593192	5,9095194	6,730103751	7,47911398

Продолжение таблицы 12

386	0,103717	4,870087729	5,726256034	6,479437193	7,166914112
387	0,106146	4,741927874	5,542837843	6,23443821	6,865613289
388	0,108656	4,612454297	5,360809692	5,996244285	6,575962281
389	0,111245	4,482810402	5,181422369	5,765653827	6,31915145
390	0,113913	4,353946912	5,005655958	5,543185157	6,073311709
391	0,116657	4,226633777	4,834249914	5,345076508	5,838207107
392	0,119477	4,101477237	4,667736553	5,154710808	5,613556823
393	0,122371	3,9789399	4,506475166	4,971950947	5,399045988
394	0,125338	3,859361967	4,362228138	4,796629626	5,194334912
395	0,128377	3,751666853	4,223095176	4,628555787	4,999066898
396	0,131486	3,647092966	4,088997896	4,467520195	4,812874762
397	0,134664	3,545639338	3,959840686	4,313300253	4,635386249
398	0,137908	3,447290873	3,835513999	4,165664102	4,466228454
399	0,141219	3,352020282	3,715897249	4,024374108	4,305031406
400	0,144594	3,259789858	3,600861352	3,889189771	4,151430918
401	0,148031	3,170553082	3,49027093	3,759870155	4,005070819
402	0,151529	3,084256074	3,383986219	3,636175879	3,865604665
403	0,155087	3,000838897	3,281864705	3,517870737	3,732697007
404	0,158703	2,920236721	3,183762515	3,404722994	3,606024301
405	0,162374	2,842380853	3,089535588	3,296506402	3,485275502
406	0,166101	2,767199649	2,999040664	3,193000988	3,370152425
407	0,16988	2,694619318	2,91213609	3,093993627	3,260369894
408	0,17371	2,624564614	2,828682494	2,999278467	3,155655737
409	0,17759	2,556959448	2,748543317	2,908657194	3,055750645
410	0,181517	2,491727408	2,671585241	2,821939192	2,960407939
411	0,18549	2,428792207	2,597678522	2,738941604	2,869393254
412	0,189508	2,368078068	2,526697232	2,659489314	2,782484164
413	0,193568	2,309510038	2,458519443	2,583414865	2,699469773
414	0,197668	2,253014266	2,393027343	2,510558329	2,620150271
415	0,201808	2,198518217	2,330107302	2,44076714	2,544336473
416	0,205984	2,145950857	2,269649903	2,373895887	2,471849349
417	0,210196	2,095242792	2,211549932	2,309806094	2,402519556
418	0,214441	2,04632639	2,15570634	2,248365986	2,336186964
419	0,218718	1,999135857	2,102022184	2,189450229	2,272700201
420	0,223025	1,953607305	2,050404548	2,132939682	2,211916196
421	0,22736	1,909678791	2,00076445	2,078721136	2,153699747
422	0,231721	1,86729034	1,953016736	2,026687053	2,097923094
423	0,236106	1,826383957	1,907079966	1,976735311	2,044465518
424	0,240514	1,786903621	1,862876297	1,928768953	1,993212945
425	0,244943	1,748795269	1,820331354	1,882695939	1,944057579
426	0,249391	1,712006779	1,77937411	1,838428904	1,896897548
427	0,253856	1,676487933	1,739936751	1,79588493	1,851636562
428	0,258336	1,642190382	1,701954555	1,754985321	1,808183599
429	0,26283	1,609067609	1,665365761	1,715655386	1,766452599
430	0,267336	1,577074879	1,630111445	1,677824232	1,726362176
431	0,271852	1,546169194	1,596135402	1,641424568	1,687835354
432	0,276377	1,516309239	1,563384019	1,606392516	1,650799305
433	0,280908	1,487455338	1,531806166	1,572667431	1,61518511
434	0,285444	1,459569393	1,501353078	1,540191729	1,580927534
435	0,289983	1,432614836	1,471978249	1,508910723	1,54796481
436	0,294524	1,406556575	1,443637327	1,47877247	1,516238441
437	0,299065	1,38136094	1,416288009	1,449727624	1,485693006
438	0,303604	1,356995633	1,389889951	1,421729298	1,456275989

Продолжение таблицы 12

439	0,308139	1,333429672	1,364404667	1,394732929	1,427937606
440	0,31267	1,310633348	1,339795445	1,368696157	1,400630649
441	0,317193	1,288578166	1,316027261	1,343578703	1,374310342
442	0,321709	1,267236803	1,293066696	1,319342262	1,348934198
443	0,326215	1,246583062	1,270881858	1,295950394	1,324461892
444	0,330709	1,226591819	1,249442309	1,273368428	1,300855136
445	0,335191	1,207238987	1,228718995	1,251563362	1,278077567
446	0,339659	1,188501468	1,208684176	1,230503782	1,256094635
447	0,344111	1,170357114	1,189311365	1,210159772	1,234873506
448	0,348545	1,152784686	1,170575264	1,190502836	1,214382963
449	0,352961	1,135763816	1,15245171	1,171505825	1,194593321
450	0,357358	1,11927497	1,134917615	1,153142866	1,175476335
451	0,361733	1,103299414	1,117950919	1,135389296	1,157005131
452	0,366085	1,087819175	1,101530537	1,118221594	1,139154122
453	0,370413	1,072817016	1,08563631	1,10161733	1,121898946
454	0,374717	1,058276396	1,070248966	1,085555102	1,105216395
455	0,378994	1,044181447	1,055350074	1,070014488	1,089084354
456	0,383243	1,030516942	1,040922001	1,054975992	1,073481746
457	0,387464	1,017268268	1,02694788	1,040421	1,058388473
458	0,391654	1,004421398	1,013411569	1,026331732	1,043785367
459	0,395814	0,99196287	1,000297617	1,012691206	1,02965414
460	0,399941	0,979879756	0,987591234	0,99948319	1,015977341
461	0,404035	0,968159647	0,975278256	0,986692173	1,002738308
462	0,408095	0,956790626	0,963345119	0,974303323	0,989921134
463	0,41212	0,945761246	0,95177883	0,962302457	0,977510621
464	0,416108	0,935060514	0,94056694	0,950676007	0,965492252
465	0,42006	0,92467787	0,929697518	0,939410992	0,95385215
466	0,423973	0,914603167	0,91915913	0,928494991	0,942577051
467	0,427847	0,904826654	0,908940812	0,91791611	0,931654271
468	0,431681	0,895338964	0,899032054	0,907662965	0,921071676
469	0,435475	0,88613109	0,889422774	0,897724651	0,910817661
470	0,439227	0,877194375	0,880103304	0,888090725	0,900881118
471	0,442937	0,8685205	0,871064365	0,878751178	0,891251415
472	0,446604	0,860101461	0,862297057	0,869696421	0,881918373
473	0,450228	0,851929567	0,853792837	0,860917263	0,872872245
474	0,453807	0,843997417	0,845543504	0,852404891	0,864103692
475	0,457341	0,836297896	0,837541187	0,844150858	0,855603771
476	0,460829	0,828824159	0,829778327	0,836147059	0,847363909
477	0,464271	0,821569621	0,822247666	0,828385722	0,839375892
478	0,467666	0,814527949	0,814942233	0,820859391	0,831631843
479	0,471013	0,807693046	0,807855333	0,81356091	0,824124213
480	0,474313	0,801059048	0,800980532	0,806483415	0,816845759
481	0,477564	0,794620313	0,79431165	0,799620315	0,809789538
482	0,480766	0,788371409	0,78784275	0,792965283	0,802948888
483	0,483919	0,78230711	0,781568124	0,786512247	0,796317417
484	0,487021	0,776422386	0,775482288	0,780255377	0,789888994
485	0,490074	0,770712395	0,769579972	0,774189072	0,783657733
486	0,493075	0,765172478	0,763856109	0,768307956	0,777617986
487	0,496026	0,75979815	0,758305829	0,762606864	0,771764333
488	0,498925	0,754585092	0,752924451	0,757080837	0,76609157
489	0,501772	0,749529152	0,747707474	0,75172511	0,760594701
490	0,504567	0,744626328	0,742650573	0,746535107	0,755268932
500	0,529589	0,703240375	0,700045838	0,702863478	0,71049426
510	0,549156	0,603240375	0,600045838	0,602863478	0,61049426

Таблица 13 – Основные термодинамические параметры работы двигателя при частоте вращения 4800 мин<sup>-1</sup>.

Угол ПКВ, град.	Объем цилиндра	P <sub>i</sub> , при степени сжатия 8, МПа	P <sub>i</sub> , при степени сжатия 10, МПа	P <sub>i</sub> , при степени сжатия 12, МПа	P <sub>i</sub> , при степени сжатия 14, МПа
230	0,504567	0,113288927	0,113893884	0,114293903	0,114577237
231	0,501772	0,114159028	0,114796752	0,115218608	0,115517494
232	0,498925	0,115057293	0,115729248	0,116173931	0,116489085
233	0,496026	0,115984517	0,116692236	0,117160788	0,117492959
234	0,493075	0,11694153	0,117686621	0,118180132	0,118530106
235	0,490074	0,117929198	0,118713343	0,119232957	0,11960156
236	0,487021	0,11894842	0,119773383	0,120320301	0,120708402
237	0,483919	0,120000132	0,120867766	0,121443249	0,121851758
238	0,480766	0,121085311	0,121997558	0,12260293	0,123032807
239	0,477564	0,122204974	0,123163872	0,123800525	0,124252778
240	0,474313	0,123360179	0,124367869	0,125037267	0,125512957
241	0,471013	0,124552027	0,125610759	0,126314442	0,126814686
242	0,467666	0,12578167	0,126893807	0,127633394	0,128159368
243	0,464271	0,127050302	0,12821833	0,128995527	0,129548471
244	0,460829	0,128359171	0,129585705	0,130402307	0,130983528
245	0,457341	0,129709576	0,130997366	0,131855267	0,132466142
246	0,453807	0,131102872	0,132454814	0,133356008	0,133997991
247	0,450228	0,13254047	0,133959614	0,134906204	0,135580831
248	0,446604	0,134023841	0,135513399	0,136507606	0,137216496
249	0,442937	0,135554521	0,137117878	0,138162043	0,138906909
250	0,439227	0,137134108	0,138774835	0,139871431	0,140654083
251	0,435475	0,138764272	0,140486133	0,141637773	0,142460124
252	0,431681	0,140446752	0,142253721	0,143463165	0,144327241
253	0,427847	0,142183366	0,144079635	0,145349802	0,146257745
254	0,423973	0,143976006	0,145966005	0,147299982	0,14825406
255	0,42006	0,14582665	0,147915057	0,149316111	0,150318729
256	0,416108	0,147737363	0,149929121	0,151400711	0,152454416
257	0,41212	0,149710297	0,152010636	0,153556423	0,154663916
258	0,408095	0,151747704	0,154162151	0,155786017	0,156950164
259	0,404035	0,153851931	0,156386338	0,158092396	0,159316239
260	0,399941	0,156025432	0,158685992	0,160478605	0,161765373
261	0,395814	0,158270771	0,161064042	0,162947838	0,164300963
262	0,391654	0,160590624	0,163523555	0,165503448	0,166926576
263	0,387464	0,162987791	0,166067746	0,168148953	0,169645963
264	0,383243	0,165465197	0,168699984	0,170888049	0,172463067
265	0,378994	0,168025898	0,1714238	0,173724615	0,175382035
266	0,374717	0,170673092	0,174242899	0,17666273	0,178407229
267	0,370413	0,173410122	0,177161164	0,179706678	0,181543242
268	0,366085	0,176240483	0,180182672	0,182860965	0,184794909
269	0,361733	0,179167834	0,183311698	0,186130328	0,188167322
270	0,357358	0,182196001	0,186552733	0,189519753	0,191665847
271	0,352961	0,185328986	0,189910489	0,193034483	0,195296138
272	0,348545	0,18857098	0,193389917	0,19668004	0,19906416
273	0,344111	0,191926368	0,196996217	0,200462238	0,202976202
274	0,339659	0,19539974	0,200734852	0,2043872	0,207038901
275	0,335191	0,198995902	0,204611563	0,20846138	0,211259265
276	0,330709	0,202719886	0,208632388	0,212691577	0,215644691
277	0,326215	0,20657696	0,212803673	0,217084963	0,220202996
278	0,321709	0,210572642	0,217132091	0,2216491	0,22494244
279	0,317193	0,214712711	0,221624666	0,226391968	0,229871758

Продолжение таблицы 13

280	0,31267	0,219003218	0,226288784	0,231321986	0,235000185
281	0,308139	0,223450504	0,231132219	0,236448045	0,240337494
282	0,303604	0,228061208	0,236163155	0,24177953	0,245894029
283	0,299065	0,232842286	0,241390206	0,247326357	0,251680743
284	0,294524	0,237801022	0,246822443	0,253099003	0,257709238
285	0,289983	0,242945049	0,252469419	0,259108542	0,263991807
286	0,285444	0,248282358	0,258341196	0,26536668	0,270541482
287	0,280908	0,253821319	0,264448372	0,271885798	0,277372084
288	0,276377	0,259570699	0,270802114	0,278678989	0,284498272
289	0,271852	0,265539674	0,277414187	0,28576011	0,291935605
290	0,267336	0,271737853	0,284296988	0,293143822	0,299700597
291	0,26283	0,278175289	0,291463579	0,300845646	0,307810786
292	0,258336	0,284862507	0,298927725	0,308882013	0,316284803
293	0,253856	0,29181051	0,306703933	0,317270322	0,325142445
294	0,249391	0,29903081	0,314807485	0,326029	0,334404752
295	0,244943	0,306535435	0,323254487	0,335177565	0,344094099
296	0,240514	0,314336955	0,332061903	0,344736692	0,354234278
297	0,236106	0,322448494	0,341247604	0,354728285	0,364850601
298	0,231721	0,330883749	0,350830409	0,36517555	0,375969997
299	0,22736	0,339657004	0,360830132	0,376103072	0,387621126
300	0,223025	0,348783144	0,371267626	0,387536896	0,399834493
301	0,218718	0,358277666	0,382164831	0,399504613	0,412642571
302	0,214441	0,368156691	0,393544819	0,412035447	0,426079931
303	0,210196	0,378436964	0,405431839	0,425160342	0,440183379
304	0,205984	0,389135863	0,417851359	0,438912063	0,454992101
305	0,201808	0,400271396	0,430830113	0,453325281	0,470547816
306	0,197668	0,411862189	0,444396135	0,468436677	0,486894931
307	0,193568	0,42392748	0,458578793	0,484285037	0,50408071
308	0,189508	0,436487093	0,473408823	0,500911344	0,52215544
309	0,18549	0,449561412	0,488918345	0,518358875	0,541172611
310	0,181517	0,463171339	0,505140882	0,53667329	0,561189087
311	0,17759	0,477338247	0,522111355	0,555902713	0,582265293
312	0,17371	0,492083916	0,53986608	0,576097806	0,60446539
313	0,16988	0,507430451	0,558442733	0,597311831	0,627857448
314	0,166101	0,52340019	0,577880305	0,619600695	0,652513616
315	0,162374	0,540015584	0,598219031	0,643022972	0,678510272
316	0,158703	0,557299067	0,619500291	0,667639902	0,705928163
317	0,155087	0,575272885	0,641766475	0,693515353	0,734852508
318	0,151529	0,593958913	0,665060814	0,720715742	0,765373078
319	0,148031	0,613378431	0,689427167	0,74930991	0,79758422
320	0,144594	0,633551869	0,714909745	0,779368932	0,831584829
321	0,141219	0,654498519	0,741552792	0,810965853	0,867478243
322	0,137908	0,676236202	0,769400186	0,84417534	0,905372041
323	0,134664	0,69878089	0,798494965	0,879073231	0,94537774
324	0,131486	0,722146287	0,828878768	0,915735963	0,987610334
325	0,128377	0,746343361	0,860591182	0,954239854	1,032187674
326	0,125338	0,771379814	0,893668973	0,994660234	1,079229647
327	0,122371	0,797259517	0,928145211	1,037070382	1,128857106
328	0,119477	0,823981877	0,964048255	1,081540254	1,181190517
329	0,116657	0,851702192	1,001400616	1,128134973	1,236348276
330	0,113913	0,880309881	1,040217663	1,176913065	1,294444637
331	0,111245	0,909883698	1,080650295	1,227924392	1,355587205
332	0,108656	0,940541694	1,122672071	1,281207791	1,419873927



Продолжение таблицы 13

333	0,106146	0,972444774	1,166448694	1,336788369	1,487389532
334	0,103717	1,005800056	1,212213365	1,336788369	1,558201368
335	0,101369	1,040863849	1,26027148	1,394706915	1,632354584
336	0,099105	1,077943957	1,311005062	1,455175913	1,709793347
337	0,096924	1,117401032	1,364876337	1,518519462	1,791158981
338	0,094828	1,159648627	1,422429824	1,585182435	1,877127578
339	0,092818	1,205151612	1,484292293	1,655735927	1,968603058
340	0,090895	1,254422628	1,551169911	1,730881879	2,066721843
341	0,08906	1,308016298	1,623841923	1,811455253	2,172854526
342	0,087314	1,366520981	1,703150305	1,898422269	2,288600419
343	0,085657	1,430547979	1,789984956	1,992873259	2,415771485
344	0,084091	1,500718196	1,885264175	2,096008771	2,556362669
345	0,082616	1,5776464	1,989910428	2,209117805	2,712506232
346	0,081232	1,661923332	2,104821635	2,333547378	2,886408667
347	0,079941	1,754096015	2,230838446	2,470663091	3,080269861
348	0,078743	1,854646692	2,368708223	2,621800915	3,296185455
349	0,077639	1,963970862	2,519046617	2,788210981	3,536034629
350	0,076629	2,082354965	2,682297832	2,970994747	3,801356696
351	0,075714	2,20995428	2,858694828	3,171037413	4,093221054
352	0,074894	2,346771702	3,048220933	3,388937954	4,412096118
353	0,07417	2,492638105	3,250574482	3,62493958	4,757723964
354	0,073541	2,647195112	3,465138302	3,87886385	5,129008506
355	0,073008	2,80988114	3,690955999	4,150052043	5,523925903
356	0,072572	2,979921677	3,926717022	4,437317671	5,939466375
357	0,072233	3,156324701	4,170752411	4,738914144	6,371616285
358	0,071991	3,337882157	4,421042904	5,052521445	6,815388098
359	0,071845	3,523178221	4,675240623	5,375255183	7,264903424
360	0,071797	3,710604908	4,930705003	5,703700524	7,713530884
361	0,071845	3,898385267	5,184552856	6,033972222	8,154076317
362	0,071991	4,084604097	5,433721646	6,361800408	8,579018256
363	0,072233	4,26724567	5,675044191	6,68264002	8,980777174
364	0,072572	4,444237586	5,905332158	6,991799974	9,352003426
365	0,073008	4,613499469	6,121465051	7,284586548	9,685866378
366	0,073541	4,772994829	6,32048085	7,55645416	9,976326472
367	0,07417	4,920784176	6,49966417	7,803155901	10,21837282
368	0,074894	5,055077233	6,656627814	8,020885968	10,40821145
369	0,075714	5,174282036	6,78938381	8,206406452	10,54339299
370	0,076629	5,277048773	6,896400547	8,357151851	10,62287336
371	0,077639	5,362306347	6,976643348	8,471306065	10,64700576
372	0,078743	5,429290001	7,02959668	8,547848297	10,61746747
373	0,079941	5,477558713	7,055267215	8,586566212	10,53712873
374	0,081232	5,507001569	7,054167974	8,588036623	10,4098751
375	0,082616	5,517832895	7,027284761	8,553575831	10,24039638
376	0,084091	5,510576458	6,976027008	8,485163335	10,0339567
377	0,085657	5,486039636	6,902165885	8,385343972	9,796160477
378	0,087314	5,445278934	6,807763077	8,257114413	9,532727451
379	0,08906	5,389558649	6,695093958	8,103800497	9,249288504
380	0,090895	5,320304781	6,566568974	7,928931931	8,951211075
381	0,092818	5,23905647	6,424656913	7,736120531	8,643460102
382	0,094828	5,147417228	6,271813353	7,528947531	8,3304973
383	0,096924	5,047008152	6,110417056	7,310864428	8,016218639
384	0,099105	4,939425026	5,942716395	7,085110681	7,703927383
385	0,101369	4,826200877	5,770787129	6,85465024	7,396338032

Продолжение таблицы 13

386	0,103717	4,708775109	5,596502086	6,622127571	7,095605239
387	0,106146	4,588469856	5,421512579	6,389842603	6,803371139
388	0,108656	4,466473754	5,247240721	6,159743022	6,52082454
389	0,111245	4,343832835	5,074881329	5,933431465	6,248765998
390	0,113913	4,221447947	4,905411711	5,712184714	5,987673691
391	0,116657	4,100077745	4,739607493	5,496981704	5,7377662
392	0,119477	3,980346182	4,578062567	5,288537206	5,51700086
393	0,122371	3,862753304	4,421211396	5,087338324	5,306198861
394	0,125338	3,747688203	4,269352097	4,893681322	5,105026463
395	0,128377	3,635443054	4,122669016	4,707706865	4,913133208
396	0,131486	3,526227335	3,981253849	4,384639922	4,730158329
397	0,134664	3,428060613	3,845124652	4,233253	4,555736072
398	0,137908	3,332900538	3,714242398	4,088329882	4,389500037
399	0,141219	3,240720571	3,588524969	3,949637206	4,231086706
400	0,144594	3,151484089	3,467858664	3,816938806	4,080138239
401	0,148031	3,065145948	3,352107436	3,689998093	3,936304669
402	0,151529	2,981653882	3,241120132	3,568580008	3,799245585
403	0,155087	2,900949772	3,134736066	3,452452617	3,668631379
404	0,158703	2,822970765	3,107789874	3,341388375	3,544144132
405	0,162374	2,74765028	3,0157844	3,235165133	3,425478212
406	0,166101	2,674918883	2,927423731	3,133566903	3,312340617
407	0,16988	2,604705067	2,842569487	3,036384427	3,204451129
408	0,17371	2,536935925	2,761085512	2,943415587	3,101542304
409	0,17759	2,471537739	2,682838407	2,85446567	3,00335934
410	0,181517	2,408436484	2,60769794	2,769347524	2,909659839
411	0,18549	2,347558261	2,535537368	2,687881616	2,820213506
412	0,189508	2,28882967	2,466233686	2,609896014	2,734801776
413	0,193568	2,232178115	2,399667793	2,53522631	2,653217413
414	0,197668	2,177532068	2,335724609	2,463715488	2,575264073
415	0,201808	2,124821282	2,274293147	2,39521376	2,500755851
416	0,205984	2,073976965	2,215266532	2,329578364	2,429516824
417	0,210196	2,024931919	2,158541996	2,266673353	2,361380583
418	0,214441	1,977620651	2,10402084	2,206369351	2,296189774
419	0,218718	1,931979455	2,051608381	2,148543314	2,233795649
420	0,223025	1,887946469	2,001213865	2,093078275	2,174057614
421	0,22736	1,845461719	1,952750385	2,039863092	2,11684281
422	0,231721	1,804467137	1,906134773	1,988792194	2,062025691
423	0,236106	1,764906575	1,861287488	1,939765323	2,009487626
424	0,240514	1,726725796	1,818132504	1,892687296	1,959116517
425	0,244943	1,689872464	1,776597184	1,847467756	1,910806434
426	0,249391	1,654296119	1,736612158	1,804020936	1,864457268
427	0,253856	1,619948149	1,6981112	1,762265438	1,819974394
428	0,258336	1,586781753	1,661031098	1,722124005	1,777268365
429	0,26283	1,554751901	1,625311539	1,683523314	1,73625461
430	0,267336	1,523815293	1,590894976	1,646393771	1,696853151
431	0,271852	1,493930308	1,55772652	1,610669319	1,658988343
432	0,276377	1,465056959	1,525753815	1,576287252	1,622588615
433	0,280908	1,437156842	1,494926928	1,543188035	1,58758624
434	0,285444	1,410193086	1,465198237	1,511315141	1,553917112
435	0,289983	1,384130298	1,436522326	1,480614887	1,521520531
436	0,294524	1,358934515	1,408855884	1,451036284	1,490339009
437	0,299065	1,334573154	1,382157601	1,422530892	1,460318084
438	0,303604	1,311014954	1,356388079	1,395052684	1,431406147

Продолжение таблицы 13

439	0,308139	1,288229937	1,331509738	1,368557917	1,403554271
440	0,31267	1,266189349	1,307486726	1,343005008	1,376716067
441	0,317193	1,244865617	1,284284843	1,31835442	1,35084753
442	0,321709	1,224232302	1,261871455	1,294568551	1,325906907
443	0,326215	1,204264052	1,240215421	1,271611633	1,301854568
444	0,330709	1,184936558	1,219287018	1,249449631	1,278652886
445	0,335191	1,166226511	1,199057876	1,228050152	1,256266126
446	0,339659	1,148111563	1,179500907	1,207382358	1,234660335
447	0,344111	1,130570284	1,160590249	1,187416885	1,213803243
448	0,348545	1,113582123	1,1423012	1,168125762	1,193664174
449	0,352961	1,097127373	1,124610164	1,14948234	1,174213952
450	0,357358	1,081187136	1,1074946	1,131461224	1,155424822
451	0,361733	1,065743284	1,090932966	1,114038202	1,137270371
452	0,366085	1,050778431	1,074904674	1,09719019	1,119725455
453	0,370413	1,036275898	1,059390042	1,080895169	1,10276613
454	0,374717	1,022219684	1,044370252	1,065132135	1,086369589
455	0,378994	1,008594438	1,029827307	1,049881039	1,070514099
456	0,383243	0,995385429	1,015743993	1,035122747	1,055178945
457	0,387464	0,982578519	1,002103838	1,020838987	1,040344376
458	0,391654	0,970160139	0,988891082	1,00701231	1,025991553
459	0,395814	0,958117266	0,976090641	0,993626044	1,012102504
460	0,399941	0,946437396	0,963688072	0,980664259	0,998660078
461	0,404035	0,935108523	0,951669548	0,96811173	0,985647901
462	0,408095	0,92411912	0,940021825	0,955953898	0,973050338
463	0,41212	0,913458114	0,928732216	0,944176843	0,960852455
464	0,416108	0,903114873	0,917788567	0,932767248	0,949039983
465	0,42006	0,89307918	0,907179231	0,921712373	0,937599285
466	0,423973	0,883341222	0,896893042	0,91100023	0,926517325
467	0,427847	0,873891568	0,886919298	0,900618528	0,915781636
468	0,431681	0,864721155	0,877247736	0,890556712	0,905380295
469	0,435475	0,855821274	0,867868514	0,880803873	0,895301896
470	0,439227	0,847183552	0,858772192	0,87134976	0,885535521
471	0,442937	0,83879994	0,849949712	0,86218455	0,876070722
472	0,446604	0,830662699	0,841392383	0,853298832	0,866897495
473	0,450228	0,82276439	0,833091866	0,844683584	0,858006259
474	0,453807	0,815097855	0,825040155	0,836330158	0,849387839
475	0,457341	0,807656213	0,817229565	0,828230261	0,841033443
476	0,460829	0,800432844	0,809652716	0,82037594	0,832934647
477	0,464271	0,79342138	0,802302522	0,812759566	0,825083376
478	0,467666	0,786615694	0,795172178	0,805373822	0,817471891
479	0,471013	0,780009892	0,788255147	0,798211684	0,810092771
480	0,474313	0,773598303	0,781545149	0,791266415	0,802938899
481	0,477564	0,76737547	0,77503615	0,784531546	0,796003451
482	0,480766	0,76133614	0,768722354	0,778000869	0,789279878
483	0,483919	0,75547526	0,762598189	0,771668424	0,782761899
484	0,487021	0,749787964	0,756658301	0,765528486	0,776443488
485	0,490074	0,744269572	0,750897545	0,759575562	0,77031886
486	0,493075	0,738915577	0,745310975	0,753804374	0,764382466
487	0,496026	0,733721643	0,739893836	0,748209853	0,758628976
488	0,498925	0,728683594	0,734641558	0,742787132	0,753053277
489	0,501772	0,723797412	0,729549749	0,737531534	0,747650459
490	0,504567	0,719059231	0,724614184	0,732438569	0,74241581
500	0,529589	0,679064052	0,683032125	0,689583741	0,698407063
510	0,549156	0,579064052	0,583032125	0,589583741	0,598407063

## Выводы по 2-му разделу бакалаврской работы

Тепловой расчет показал значительное влияние степени сжатия на мощностные и экономические характеристики работы двигателя. Получено, что для эффективного использования переменной степени сжатия необходимо повысить эффективность работы на низких степенях сжатия. Также необходимо контролировать условия воспламенения и горения при работе на степенях сжатия 12 и 14 для недопущения появления нарушения нормального процесса сгорания в виде детонации. Для этого следует контролировать максимальную температуру в процессе сгорания, как вариант — это применение систем анализа ионного тока проводимости в зоне свечи зажигания, где анализ плазмы за фронтом пламени покажет температурное состояние и своевременно контроля за процессом сгорания без детонации.

### 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 39,5 мм, а длина шатуна 147,5 мм) проводился по известным методикам приведенным в [1,2], при частоте вращения коленчатого вала  $5200 \text{ мин}^{-1}$ .

Результаты расчета перемещения, скорости и ускорения поршня приведены на рисунках 9, 10 и 11.

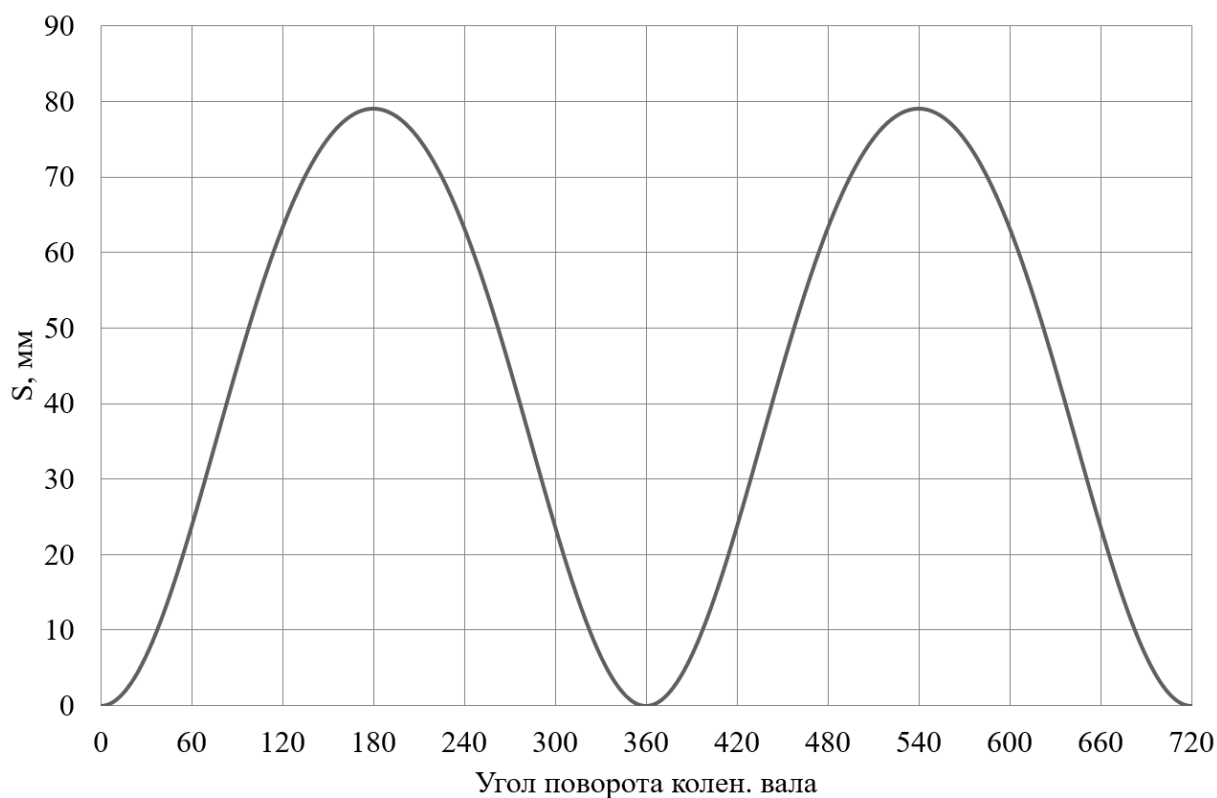


Рисунок 9 – Диаграмма изменения хода поршня

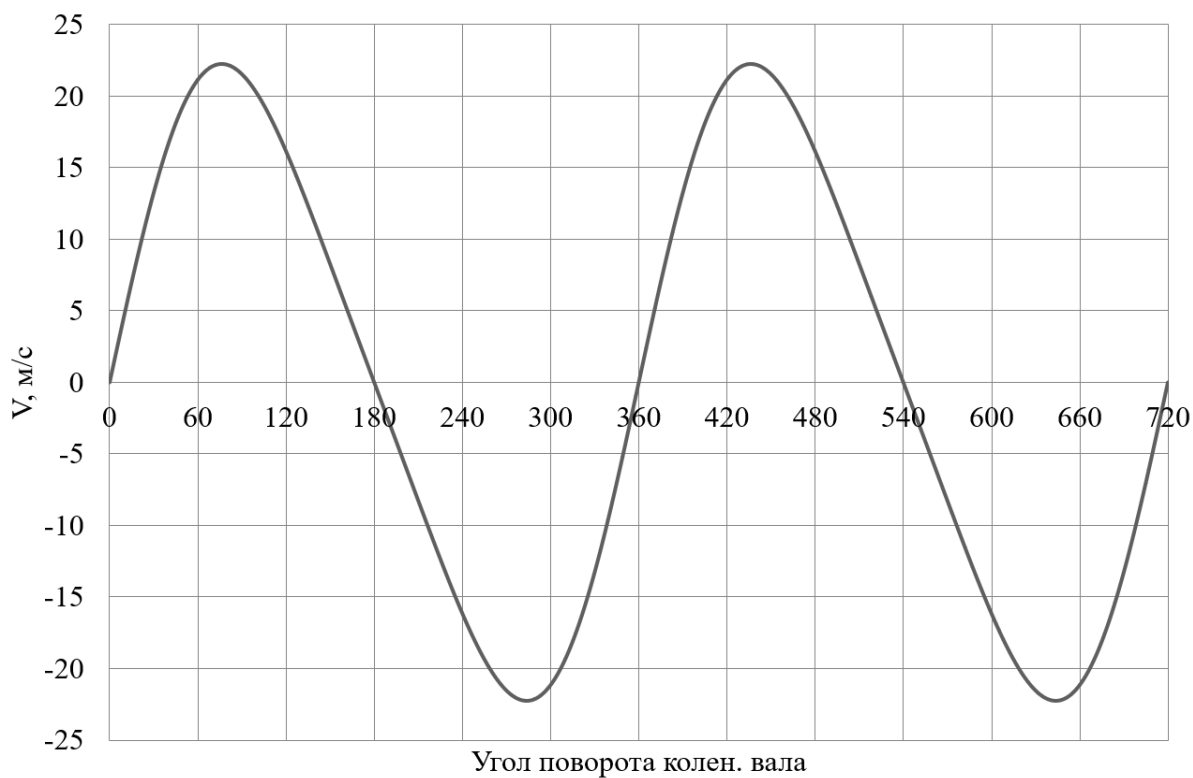


Рисунок 10 – Диаграмма изменения скорости поршня

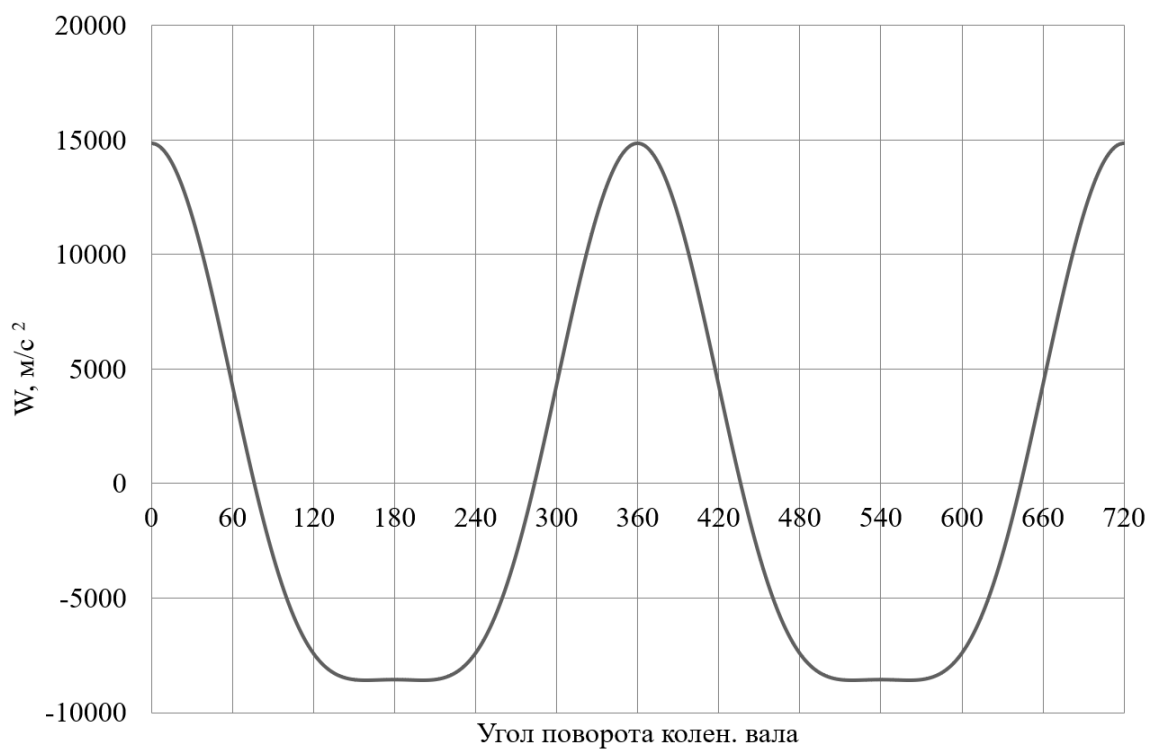


Рисунок 11 – Диаграмма изменения ускорения поршня

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

## 3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя

### 3.2.1 Расчет основных сил и моментов действующих в КШМ

Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма проектируемого двигателя проводился по известным методикам приведенным в [1,2], при частоте вращения коленчатого вала  $5200 \text{ мин}^{-1}$ , для условий работы двигателя при степени сжатия 8,10, 12 и 14.

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

Таблица 14 – Приведение масс кривошипно-шатунного механизма

Параметр	Величина
Площадь поршня, $\text{м}^2$	0,006362
Удельная масса поршня, $\text{кг}/\text{м}^2$	80
Масса поршневой группы, кг	0,50894
Удельная масса шатуна, $\text{кг}/\text{м}^2$	130
Масса шатуна, кг	0,82702
Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца, кг	0,227
Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа, кг	0,59959
Удельная масса одного колена вала, $\text{кг}/\text{м}^2$	125
Масса неуравновешенных частей одного колена вала, кг	0,7952
Массы, совершающие возвратно-поступательное движение	0,736
Массы, совершающие вращательное движение	1,39481
Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна, Н	-7022,91
Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа, Н	-9314,2
Центробежная сила инерции вращающихся масс, Н	-16337

Результаты расчета приведены в виде графиков. На рисунке 12 приведены силы инерции возвратно-поступательного движения.

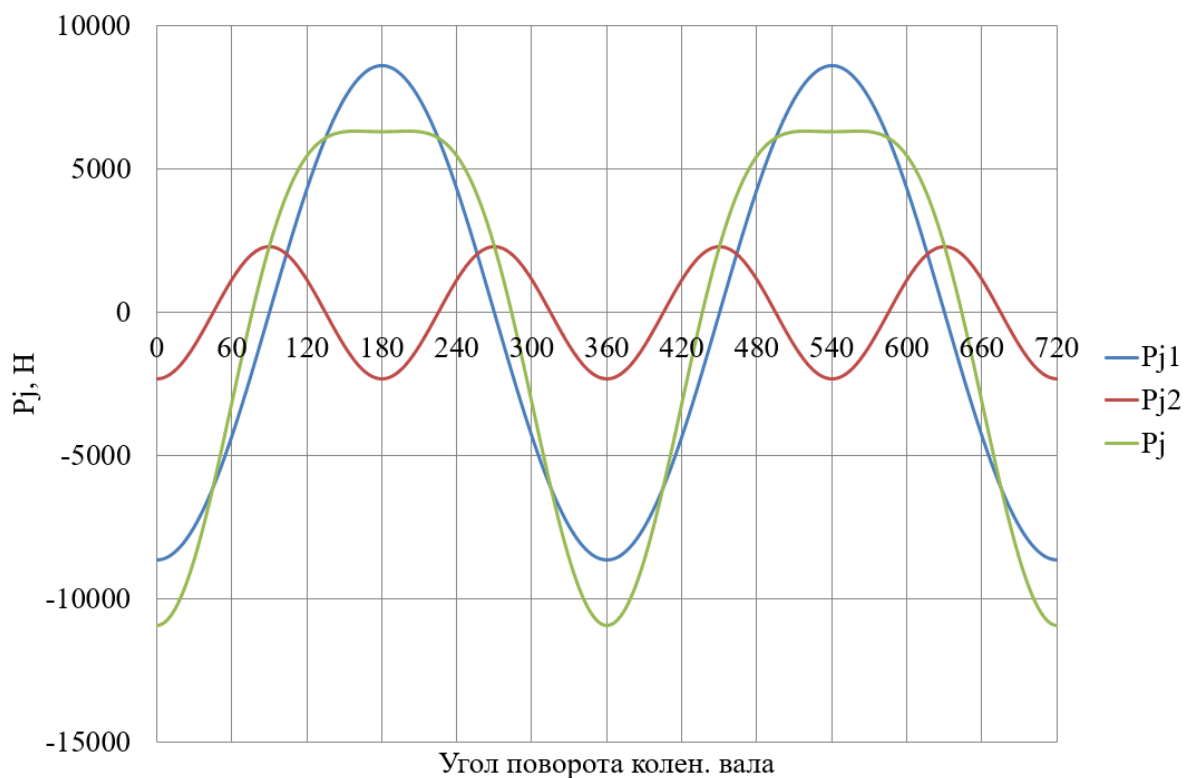


Рисунок 12 – Силы инерции возвратно-поступательного движения поршня и шатуна

На рисунках 13 и 14 приведено сравнение суммарных сил, действующих на поршневой палец двигателя при работе на степени сжатия 8, 10, 12 и 14. Видим, что с увеличением степени сжатия суммарные силы возрастают.

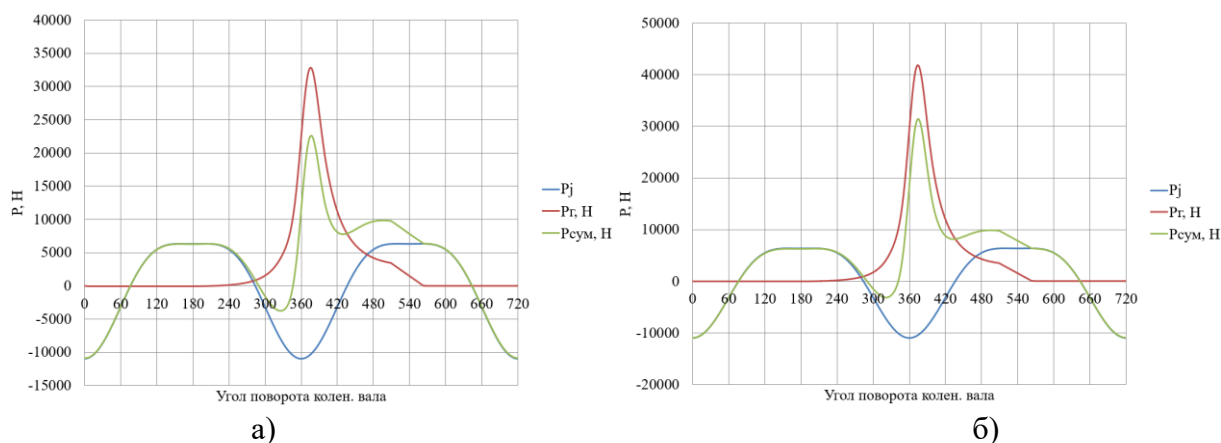


Рисунок 13 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец двигателя при степени сжатия 8 (а) и степени сжатия 10 (б)



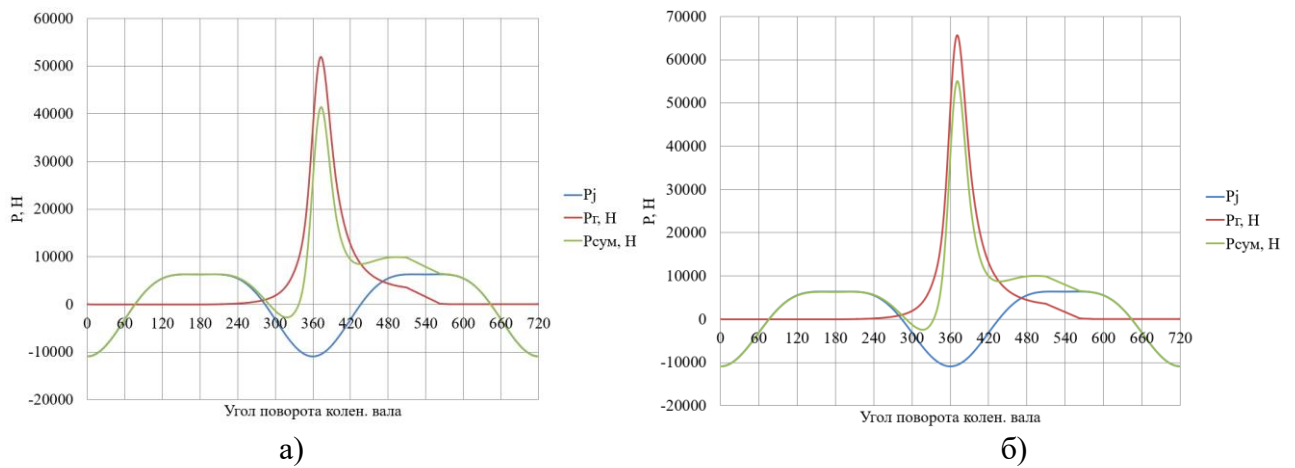


Рисунок 14 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец двигателя при степени сжатия 12 (а) и степени сжатия 14 (б)

На рисунках 15 и 16 приведено сравнение сил, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки при работе на степени сжатия 8, 10, 12 и 14. Видим, что с увеличением степени сжатия приводит к значительному увеличению изгибающих коленчатый вал сил, примерно 8000 Н на каждые 2 единицы увеличения степени сжатия. Что при увеличении степени сжатия с 8 до 14 приводит к удвоению изгибающих нагрузок.

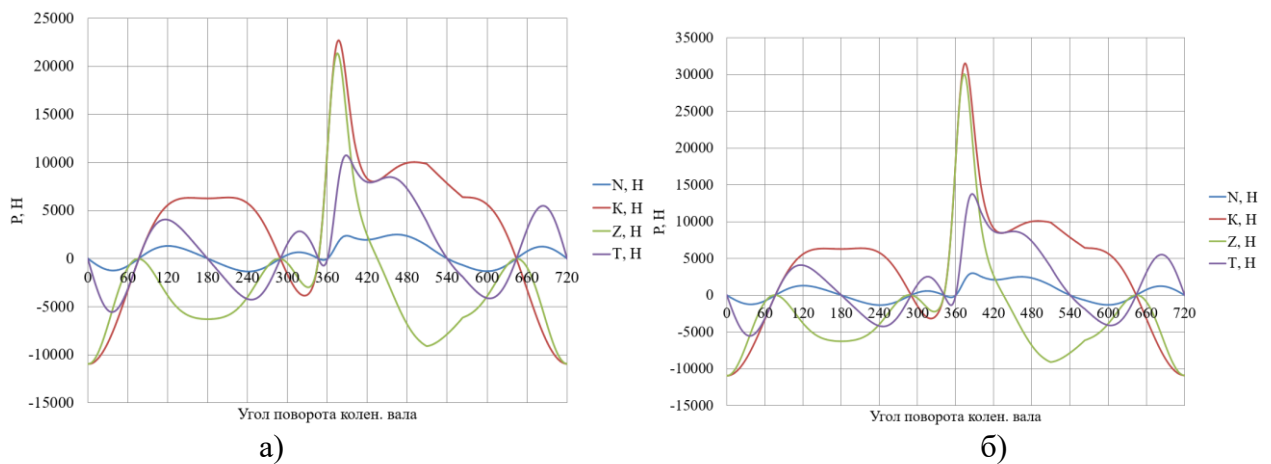


Рисунок 15 – Силы, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки двигателя при степени сжатия 8 (а) и степени сжатия 10 (б)

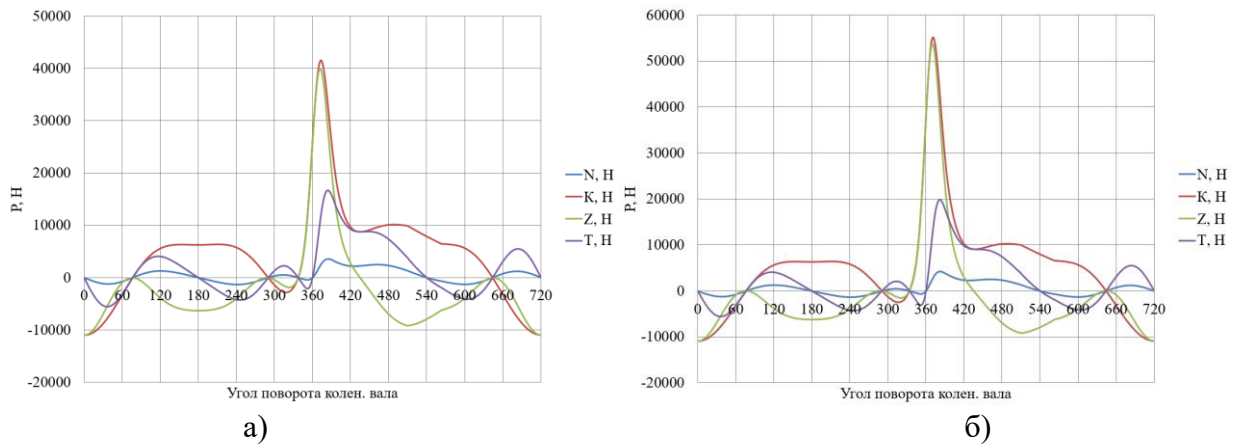


Рисунок 16 – Силы, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки двигателя при степени сжатия 12 (а) и степени сжатия 14 (б)

На рисунках 17 и 18 приведено сравнение крутящего момента двигателя при работе на степени сжатия 8, 10, 12 и 14.

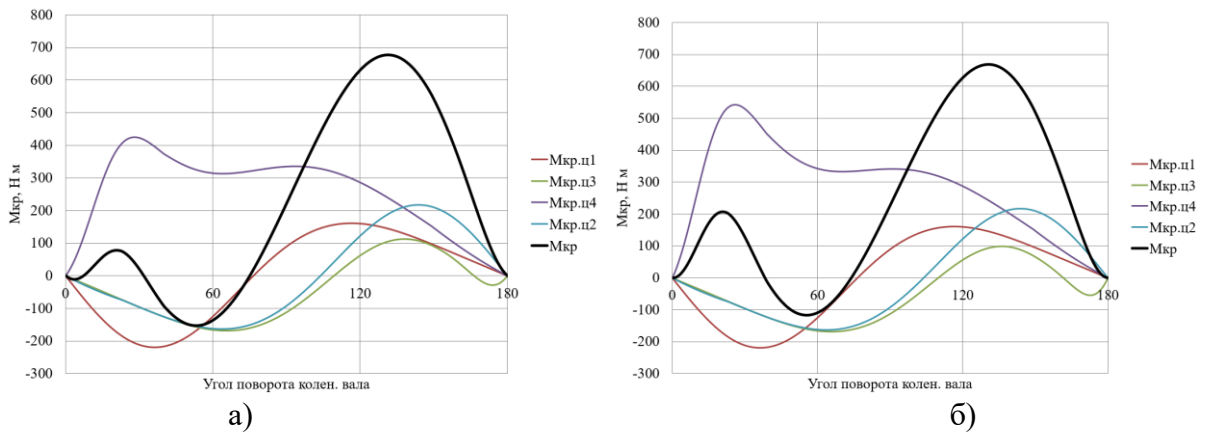


Рисунок 17 – График крутящего момента при степени сжатия 8 (а) и степени сжатия 10 (б)

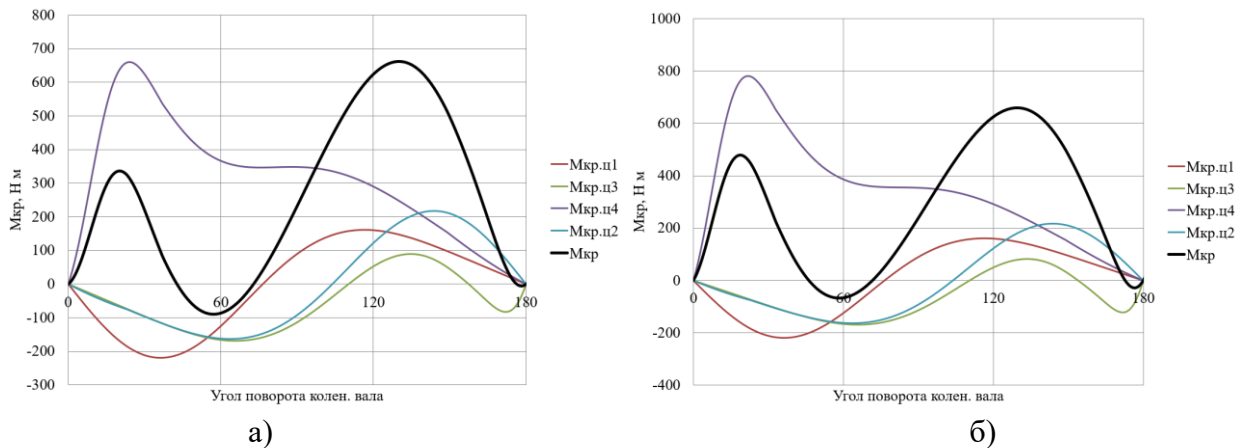


Рисунок 18 – График крутящего момента при степени сжатия 12 (а) и степени сжатия 14 (б)

Видим, что с увеличением степени сжатия также происходит рост крутящего момента двигателя. Причем пиковые значения практически не увеличиваются, а происходит повышение средних значений крутящего момента, что положительно сказывается на равномерности работы двигателя.

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 рисунках 19 и 20 приведено сравнение суммарной силы, действующую на шатунную шейку в прямоугольных координатах при работе на степени сжатия 8, 10, 12 и 14. Видим, что с увеличением степени сжатия резко возрастают нагрузки в зоне пикового давления 350 – 380 градусов ПКВ. Рост нагрузки составляет 9000 Н на каждое увеличение на 2 единицы степени сжатия, что составляет 50% нагрузки при работе на степени сжатия 8.

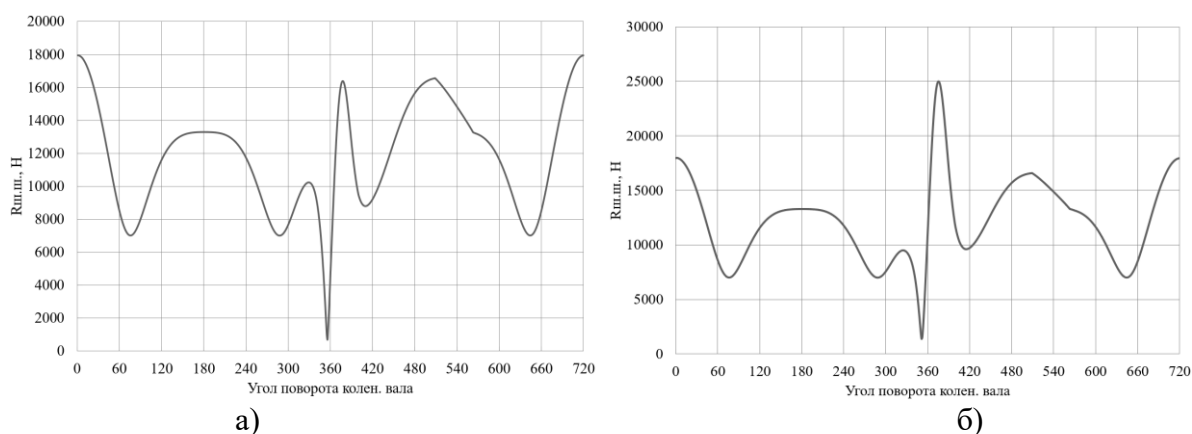


Рисунок 19 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку при степени сжатия 8 (а) и степени сжатия 10 (б)

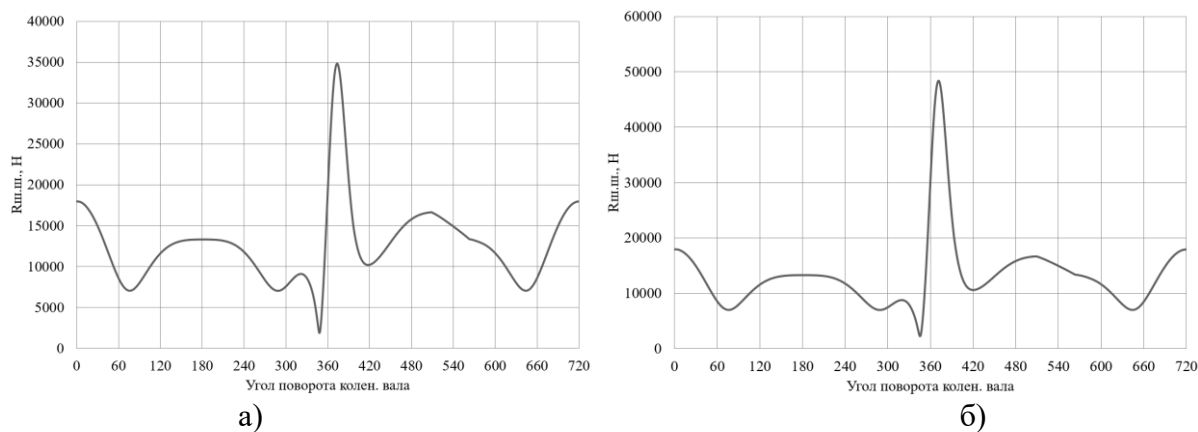


Рисунок 20 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку при степени сжатия 12 (а) и степени сжатия 14 (б)

На рисунках 21 и 22 приведено сравнение суммарной силы, действующую на шатунную шейку в полярных координатах при работе на степени сжатия 8, 10, 12 и 14. Видим, что с увеличением степени сжатия, происходит рост нагрузки на одном лишь участке шатунной шейки.

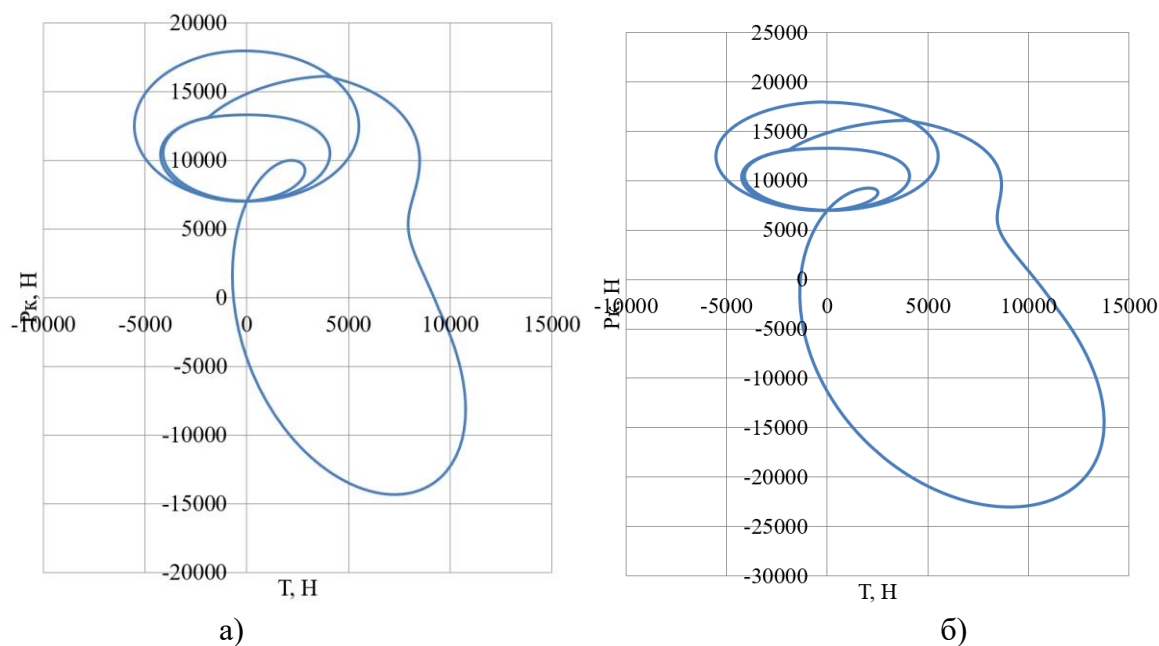


Рисунок 21 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку в полярных координатах при степени сжатия 8 (а) и степени сжатия 10 (б)

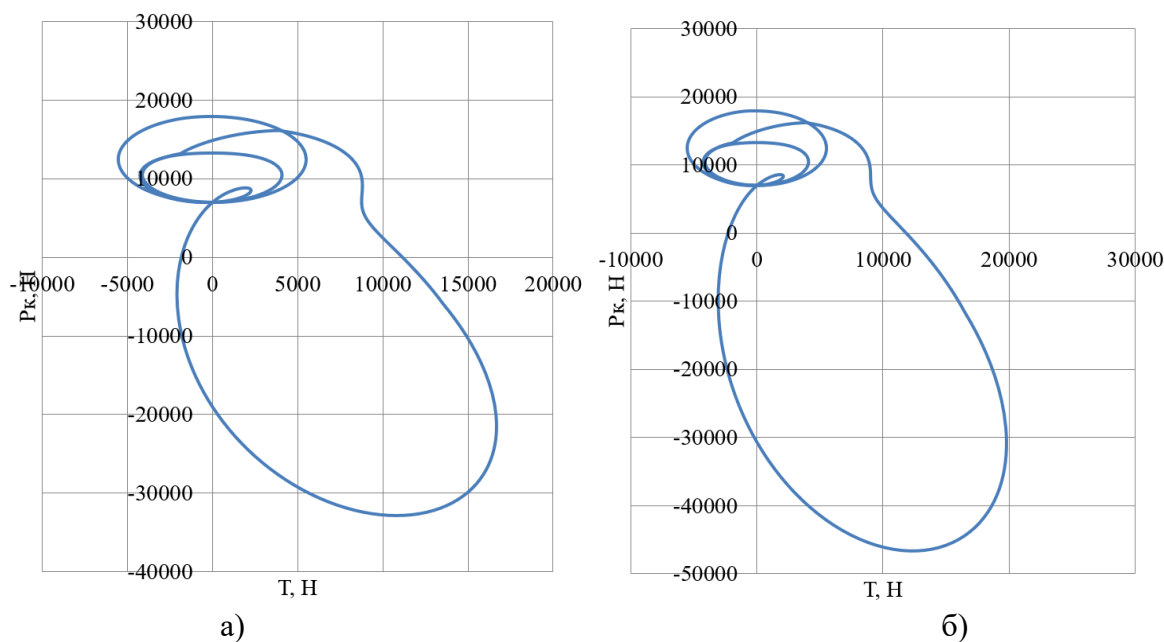


Рисунок 22 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку в полярных координатах при степени сжатия 12 (а) и степени сжатия 14 (б)

На рисунках 23 и 24 приведено сравнение суммарных сил, действующих на коренные шейки в прямоугольных координатах при работе на степени сжатия 8, 10, 12 и 14. Видим, что с увеличением степени сжатия, также растут нагрузки в зонах действия максимального давления. Видно, что имеются зоны низких нагрузок в независимости от степени сжатия, в этой зоне и рекомендуется расположить ось масляного канала.

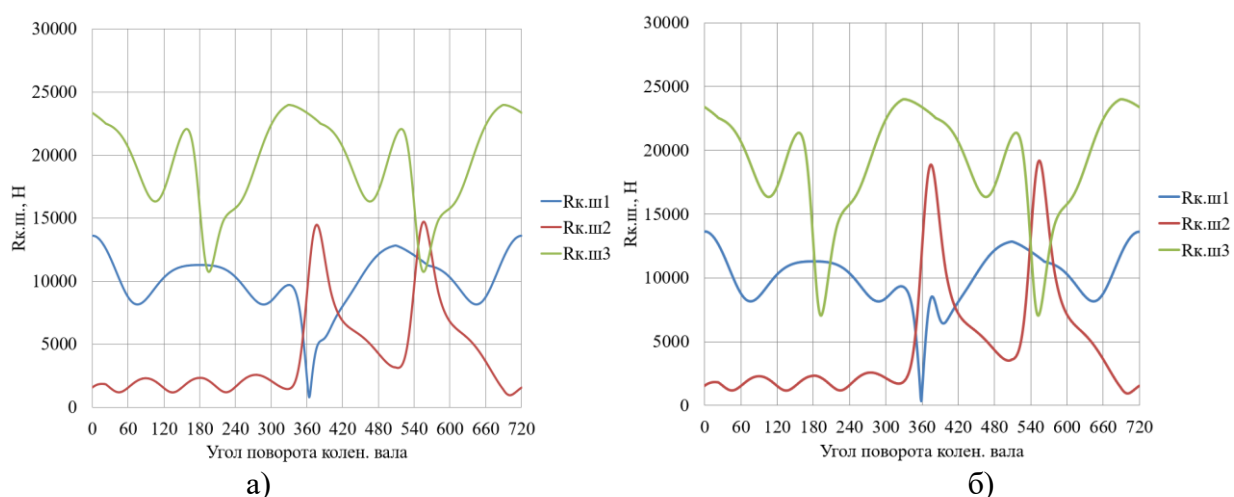


Рисунок 23 – Суммарные силы, действующие на коренные шейки в прямоугольных координатах: (а) при степени сжатия 8; (б) степени сжатия 10

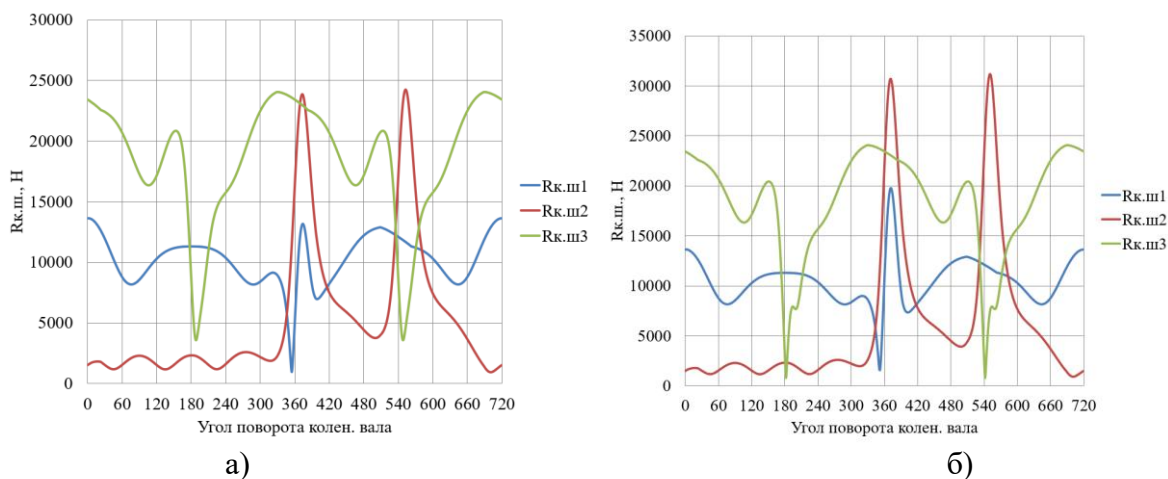


Рисунок 24 – Суммарные силы, действующие на коренные шейки в прямоугольных координатах при степени сжатия 12 (а) и 14 (б)

На рисунках 25 и 26 приведено сравнение суммарных сил, действующих на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при работе на степени сжатия 8, 10, 12 и 14. Видим, что с увеличением степени сжатия, 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 в независимости от степени сжатия, в этой зоне и рекомендуется расположить ось масляного канала.

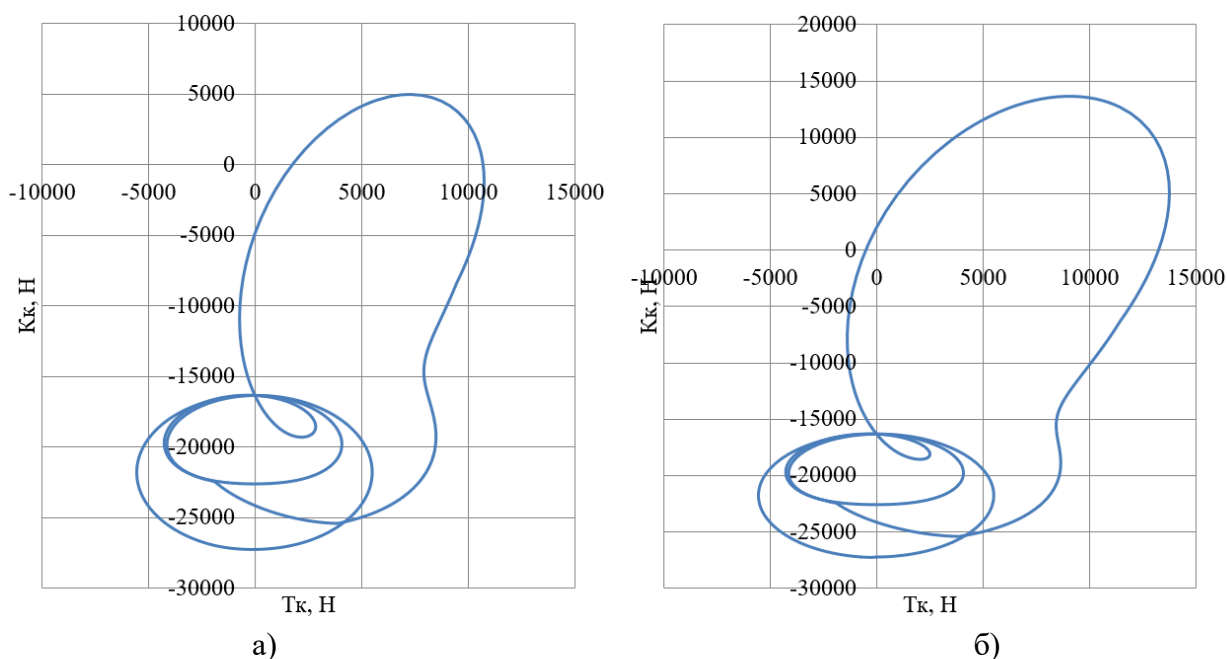


Рисунок 25 – Суммарные силы, действующие на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при степени сжатия 8 (а) и степени сжатия 10 (б)

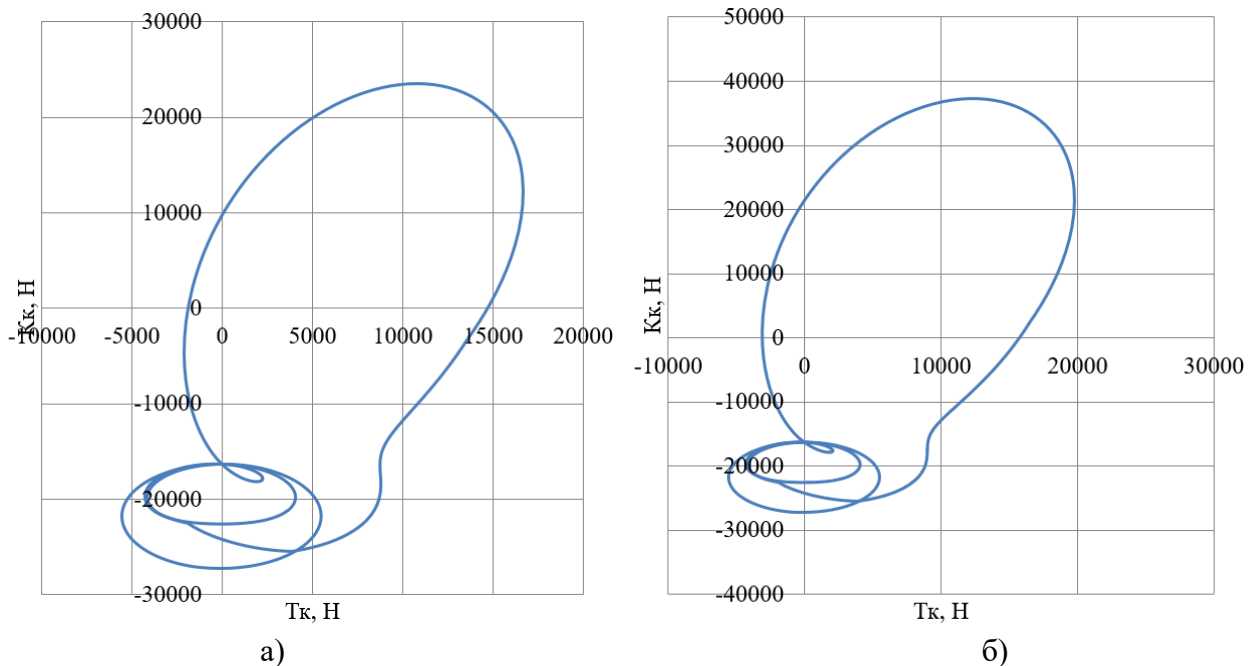


Рисунок 26 – Суммарные силы, действующие на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при степени сжатия 12 (а) и степени сжатия 14 (б)

#### Выводы по 3-му разделу

Как мы видим повышение степени сжатия не приводит к катастрофическому увеличению 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 степени сжатия на рабочий процесс ДВС

### 4.1 Влияния степени сжатия на максимальную температуру и давление цикла

Сравнивая величины максимального давления и максимальной температуры в цилиндре двигателя (рисунок 27), следует отметить повышение максимальной температуры цикла более 3000 К для степеней сжатия 12 и 14, а также значения максимального давления в цилиндре двигателя в районе 9 МПа для степени сжатия 12, что соответствует давлению при малом наддуве и в районе 11 МПа для степени сжатия 14, что соответствует давлению при среднем наддуве.

Проведем сравнение индикаторных диаграмм в P-V координатах для исследуемых степеней сжатия (рисунок 28 – 32). Из представленных рисунков видно, что максимальное давление увеличивается до частоты вращения 3400 мин<sup>-1</sup>, затем снижается вследствие увеличения продолжительности сгорания в градусах ПКВ.

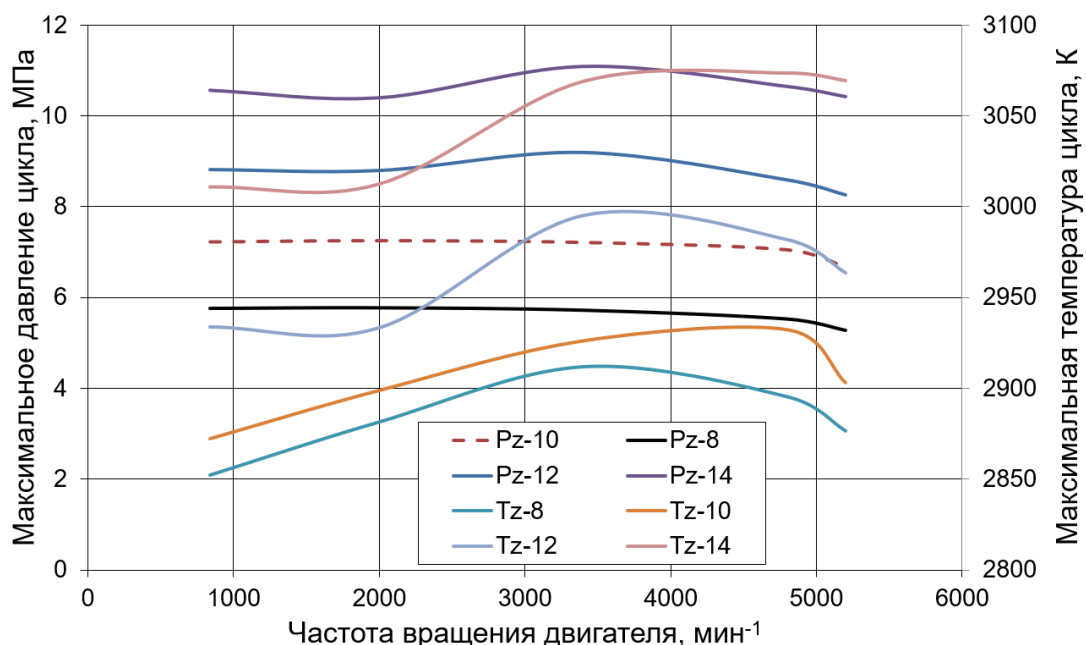


Рисунок 27 – Сравнение величины максимального давления и максимальной температуры в цилиндре двигателя при изменении степени сжатия с 8 до 14 с шагом 2 единицы



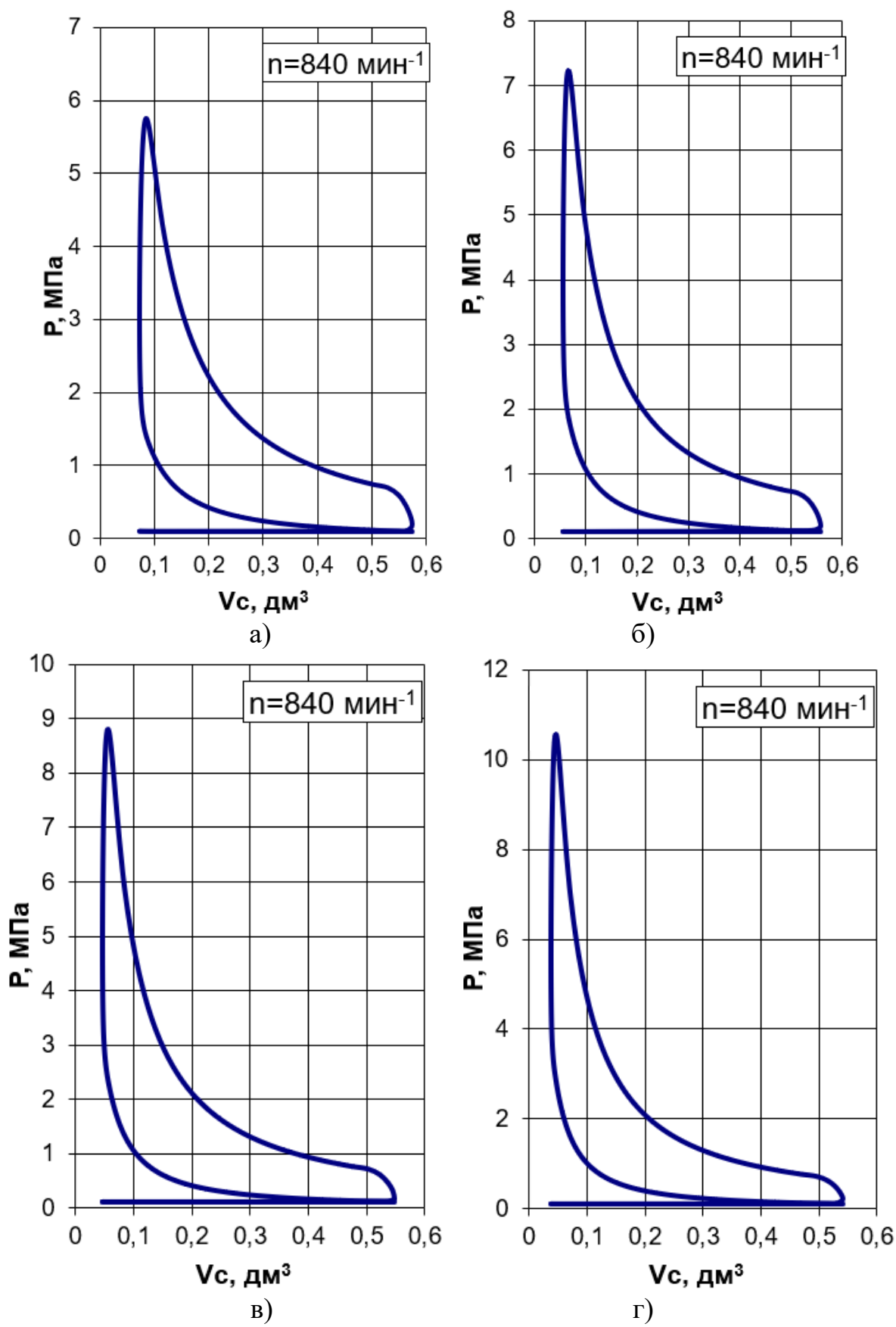


Рисунок 28 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима  $840 \text{ мин}^{-1}$  при различной степени сжатия: (а) 8; (б) 10; (в) 12 и (г) 14

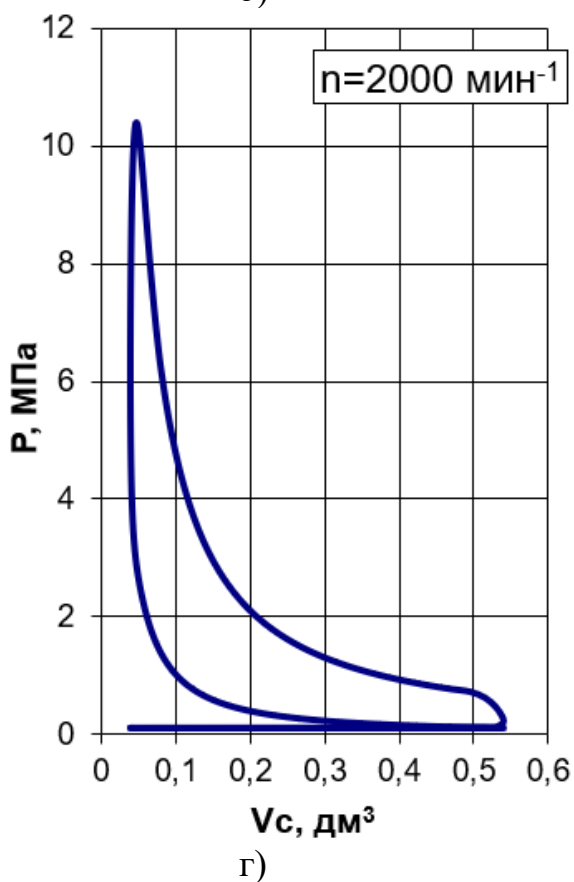
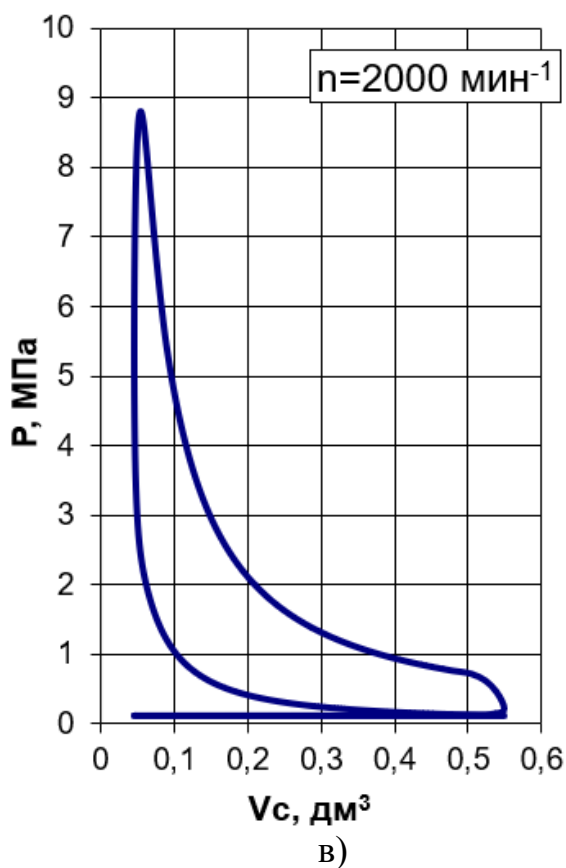
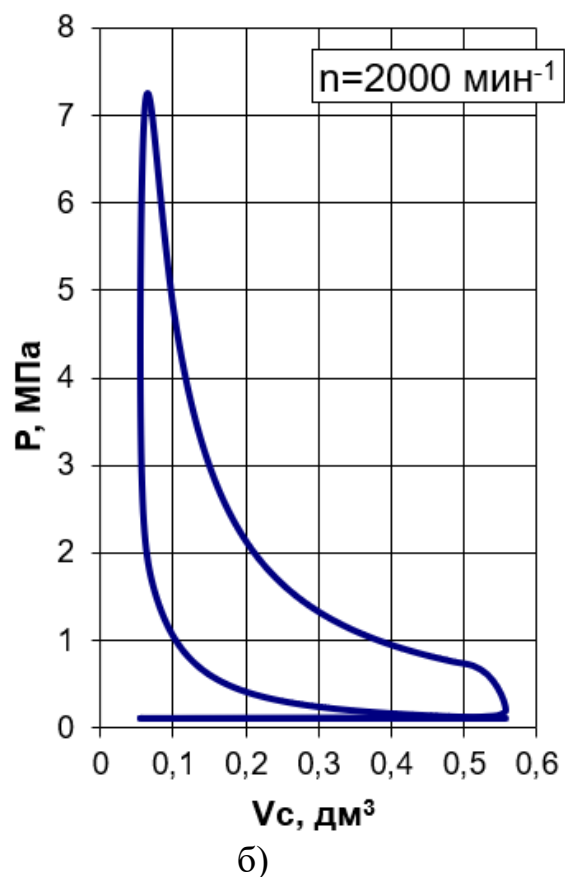
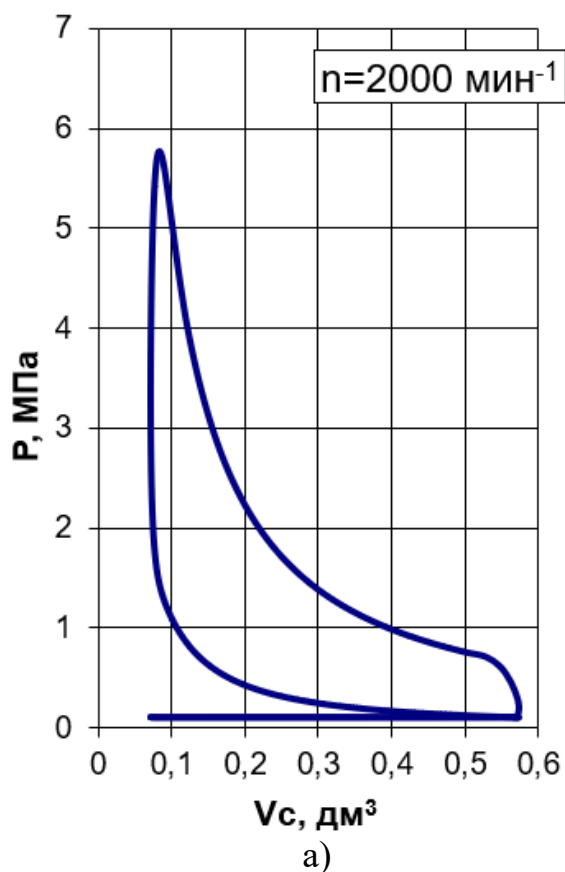
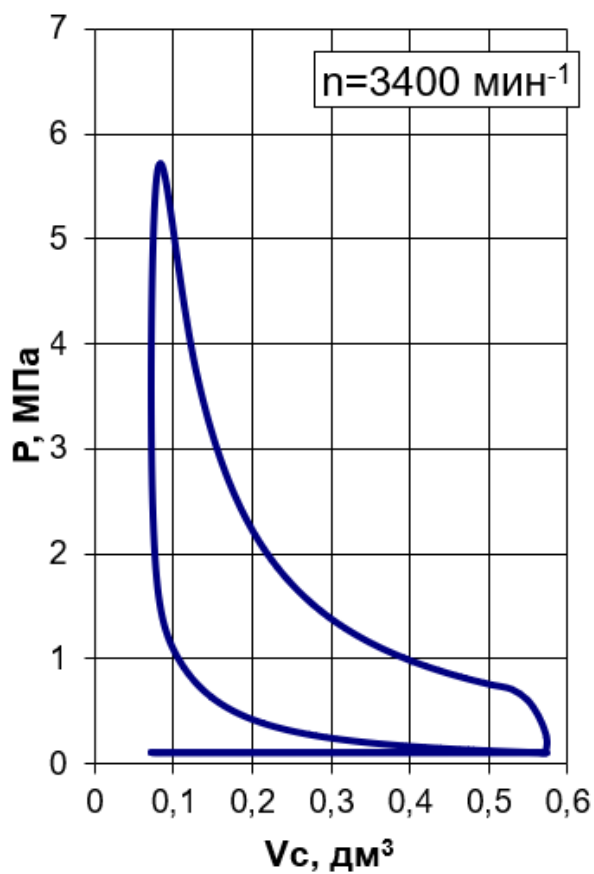
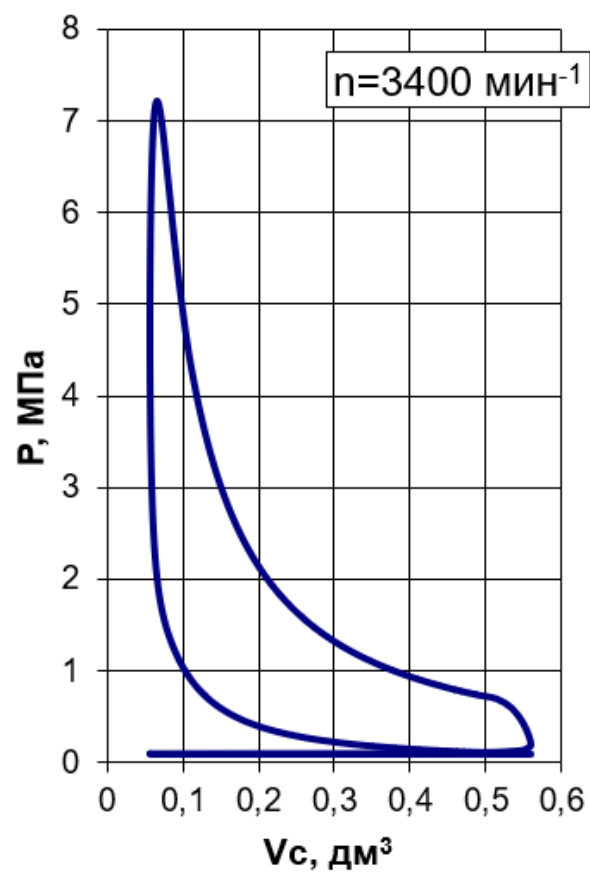


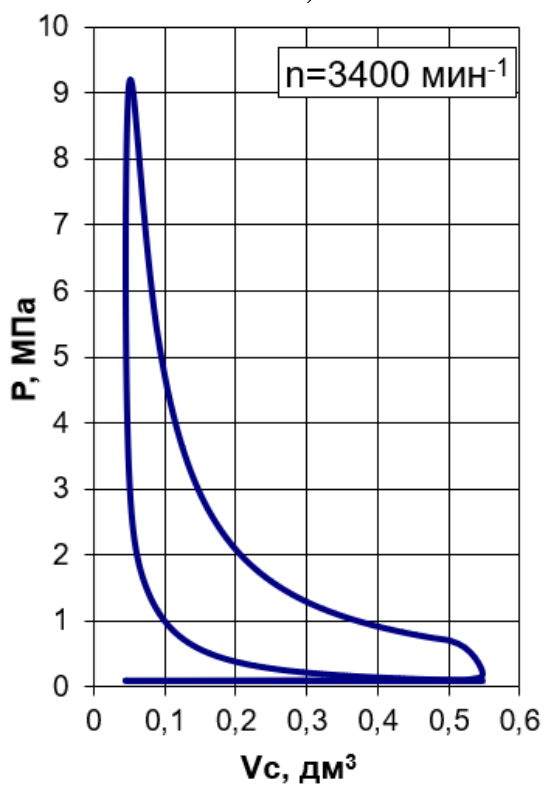
Рисунок 29 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима  $900 \text{ мин}^{-1}$  при различной степени сжатия: (а) 8; (б) 10; (в) 12 и (г) 14



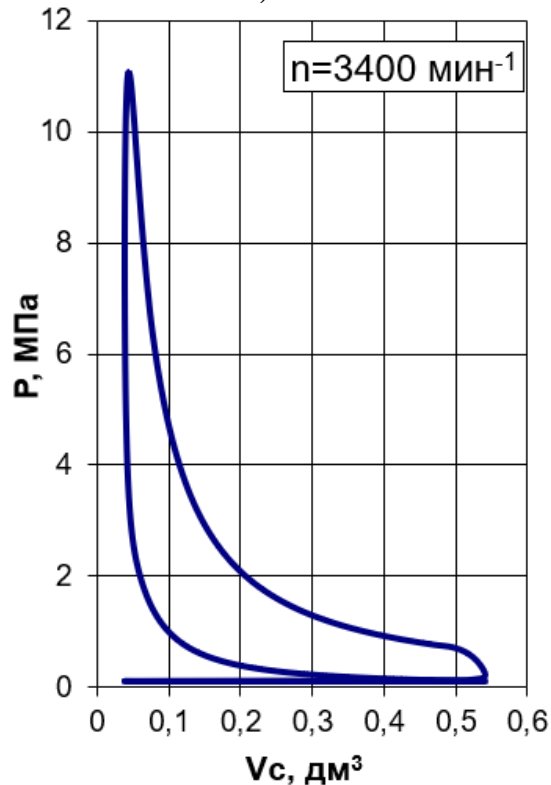
а)



б)



в)



г)

Рисунок 30 – Индикаторные диаграммы в  $P$ - $V$  координатах для скоростного режима  $1200 \text{ мин}^{-1}$  при различной степени сжатия: (а) 8; (б) 10; (в) 12 и (г) 14

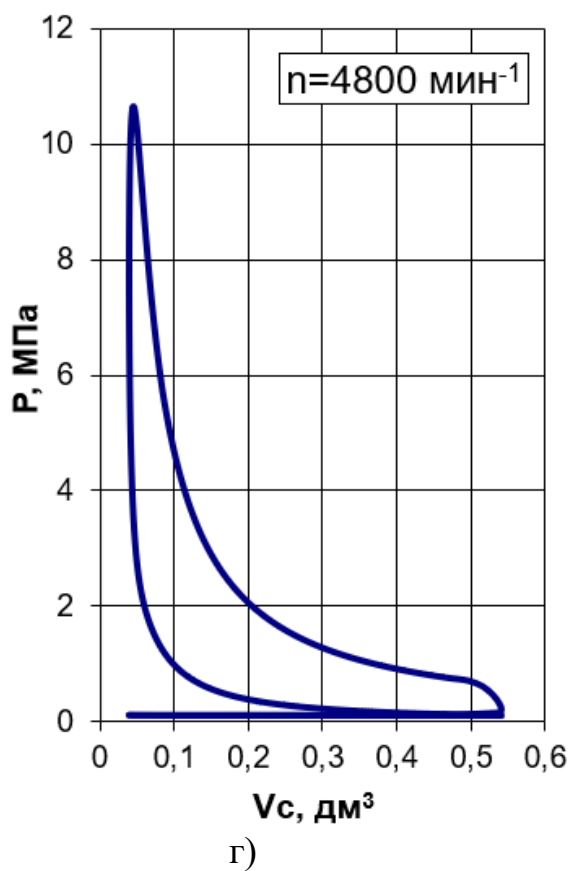
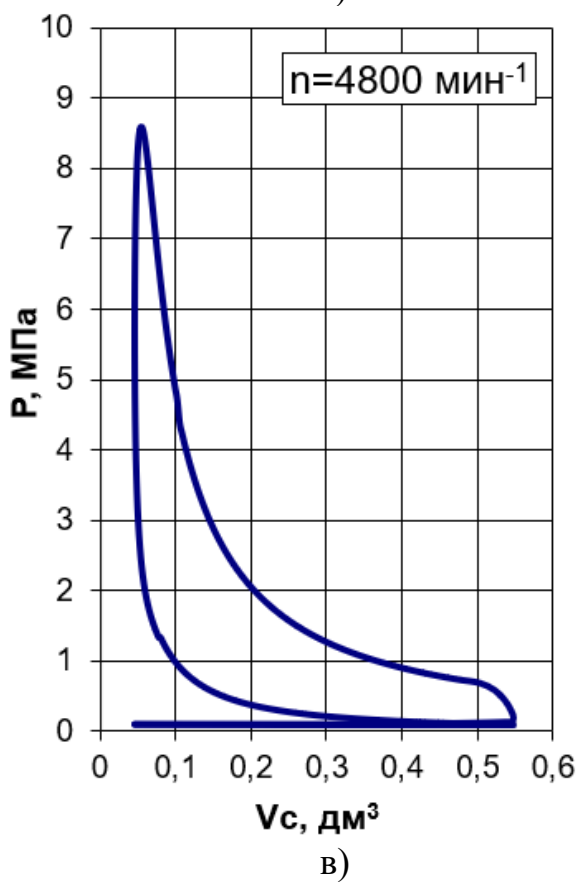
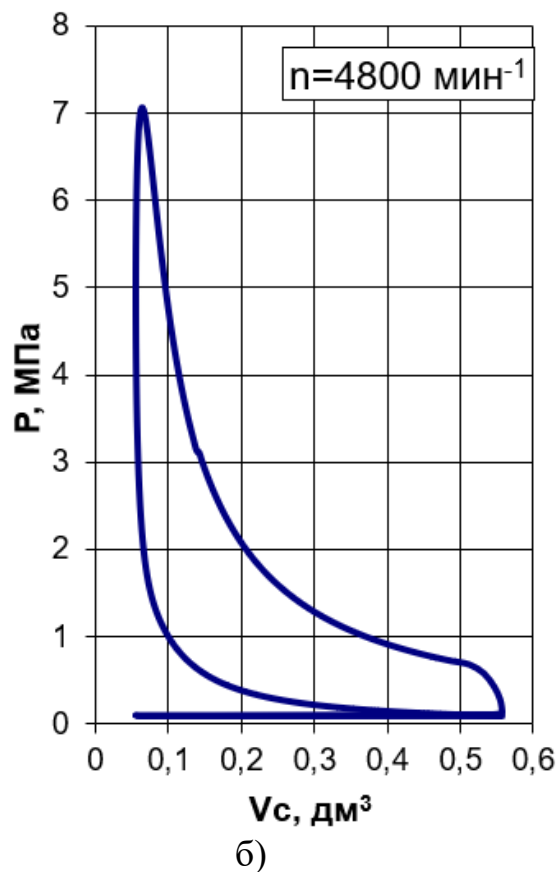
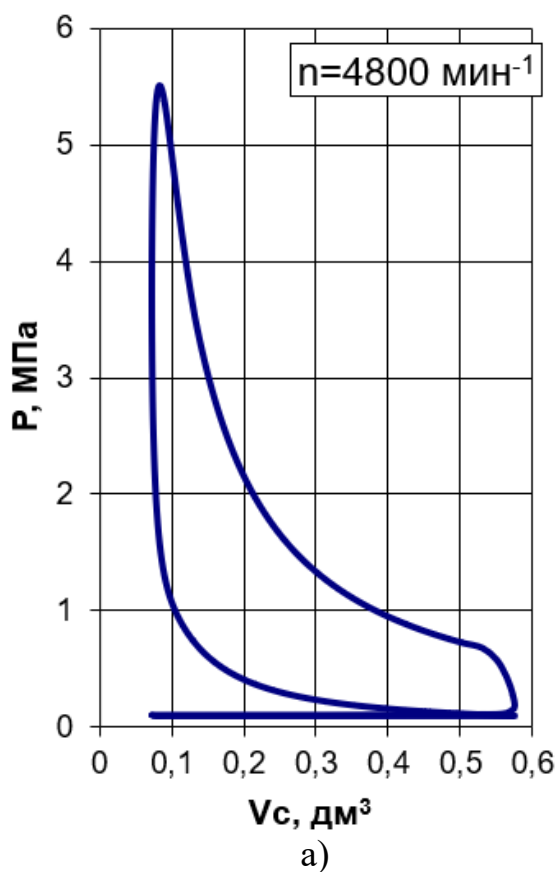
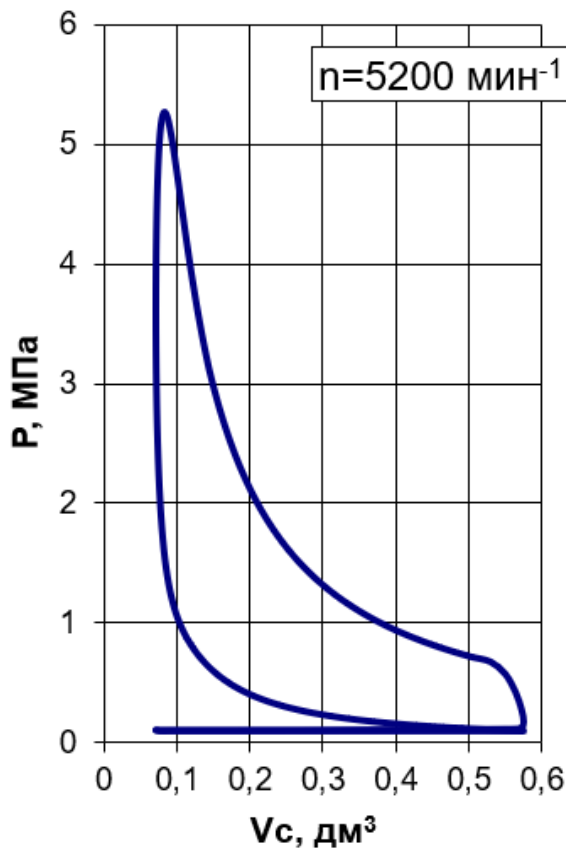
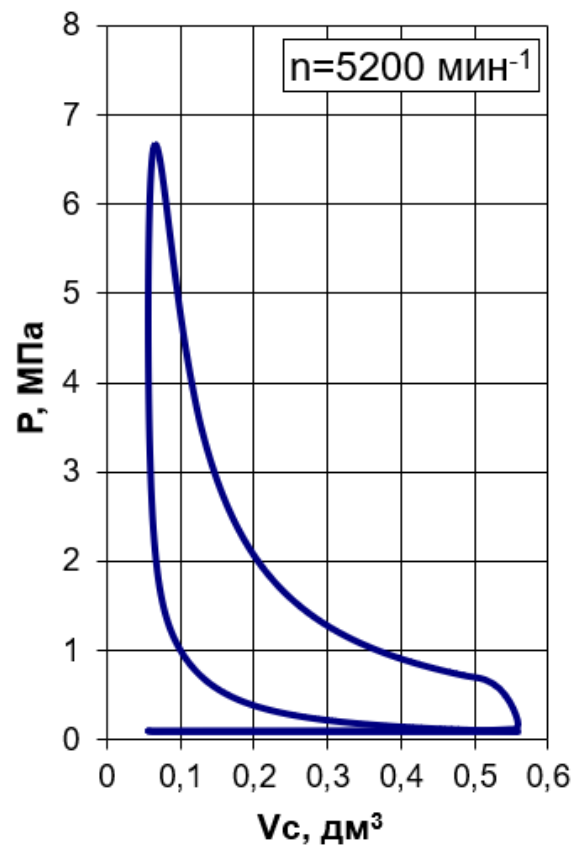


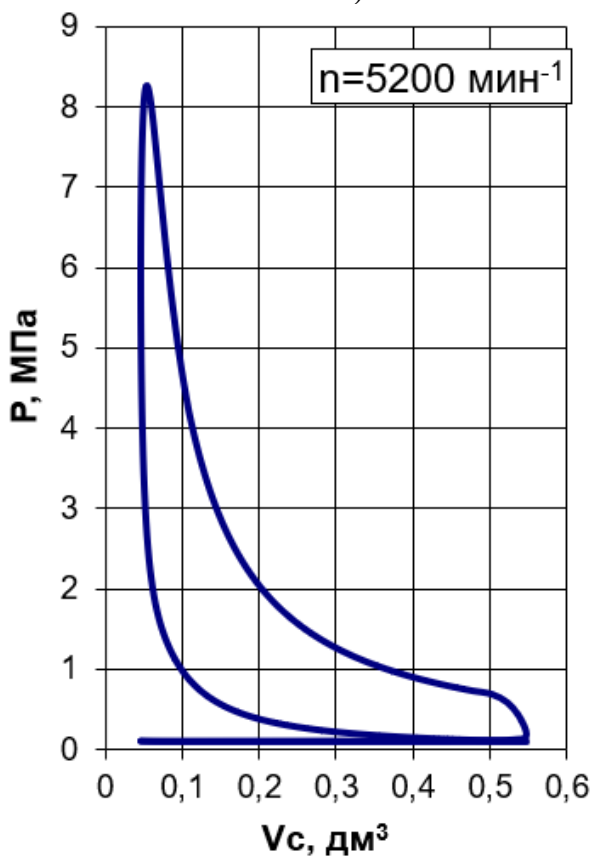
Рисунок 31 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима  $1600 \text{ мин}^{-1}$  при различной степени сжатия: (а) 8; (б) 10; (в) 12 и (г) 14



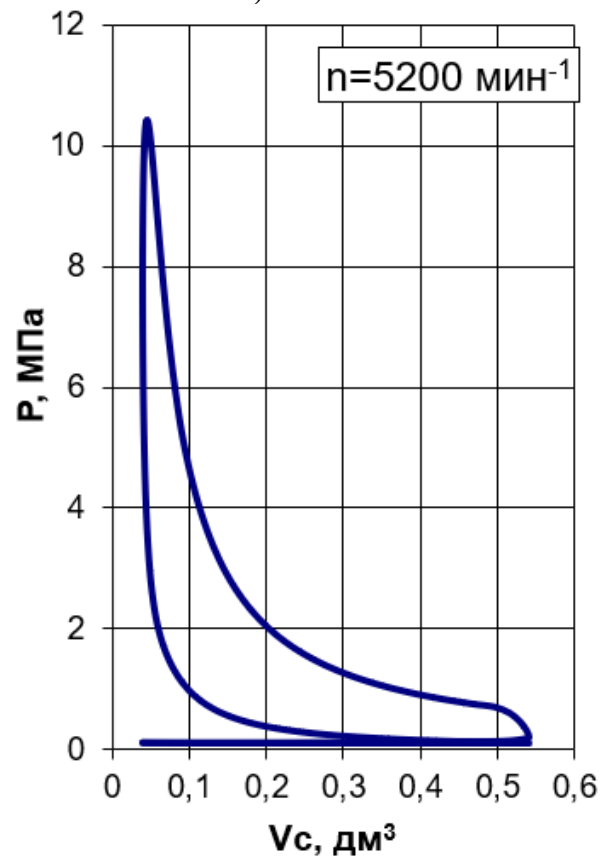
а)



б)



в)



г)

Рисунок 32 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима  $2000 \text{ мин}^{-1}$  при различной степени сжатия: (а) 8; (б) 10; (в) 12 и (г) 14

Для оценки токсичности проведем сравнение изменения температуры в процессе сгорания (рисунки 33 – 37).

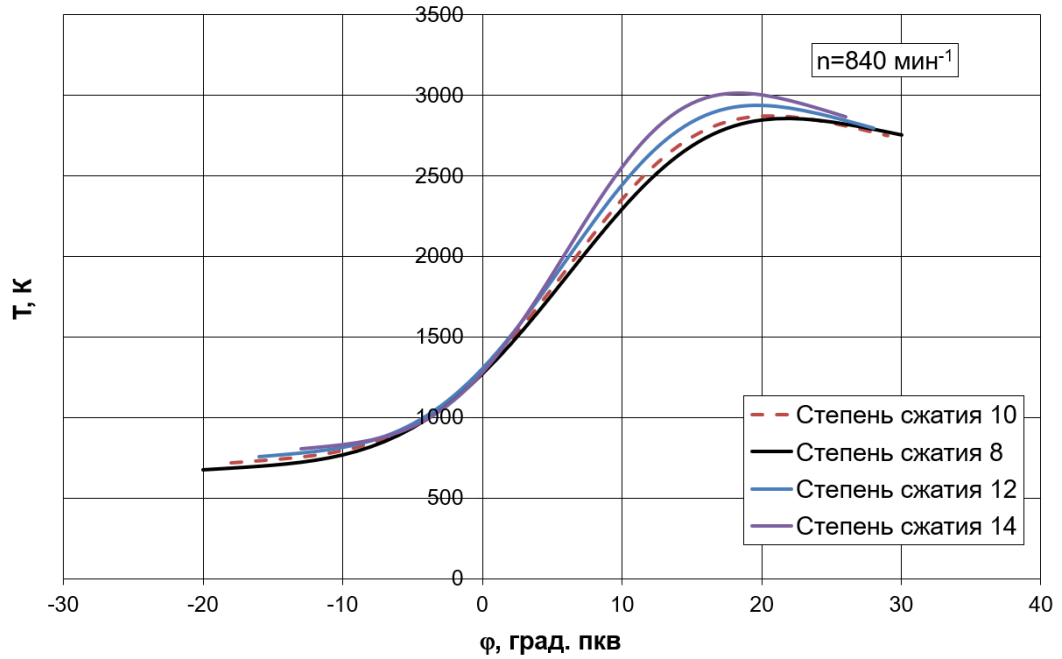


Рисунок 33 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 840 мин<sup>-1</sup>

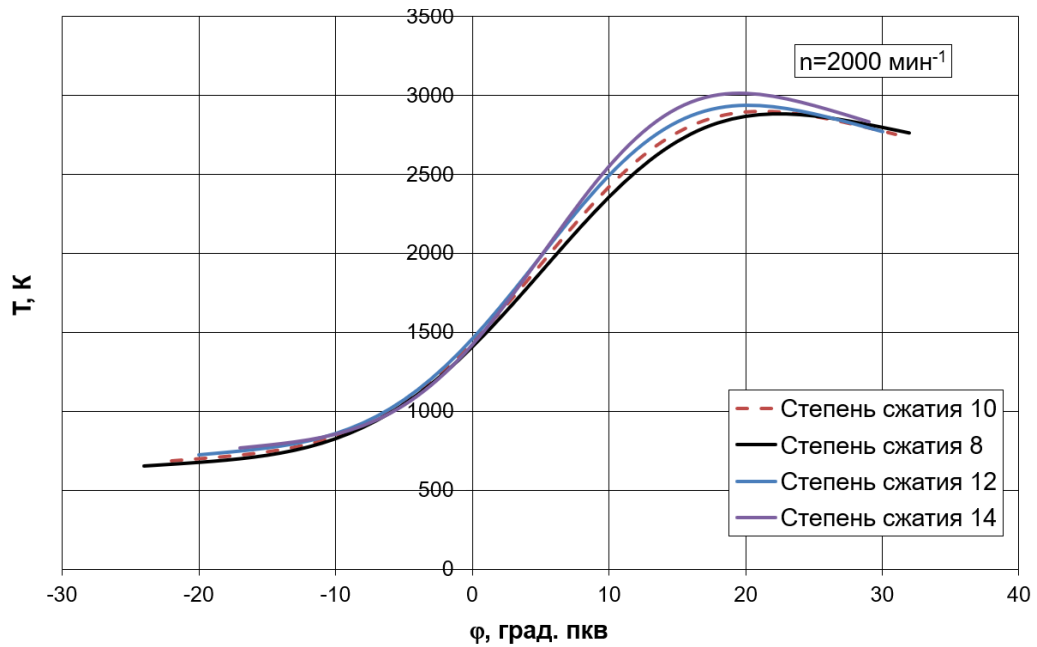


Рисунок 34 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 2000 мин<sup>-1</sup>

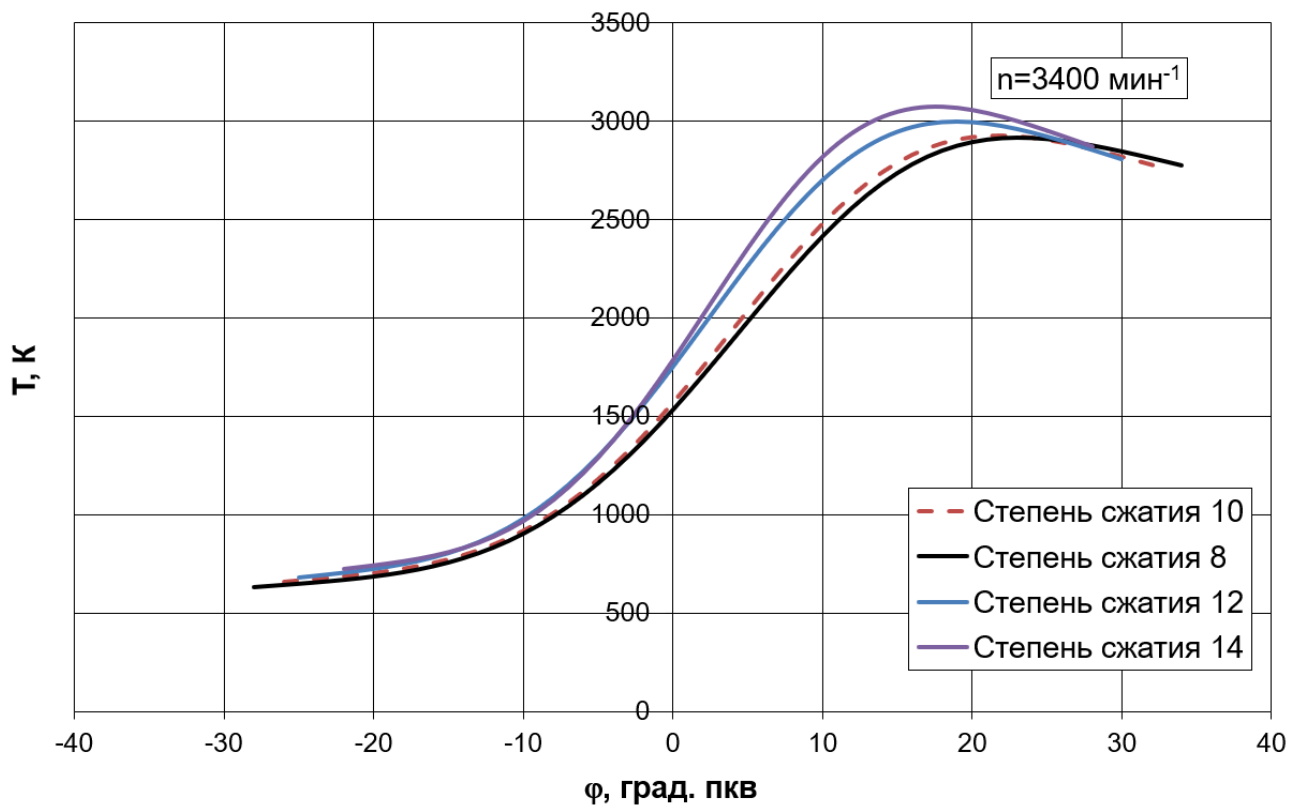


Рисунок 35 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима  $3400 \text{ мин}^{-1}$

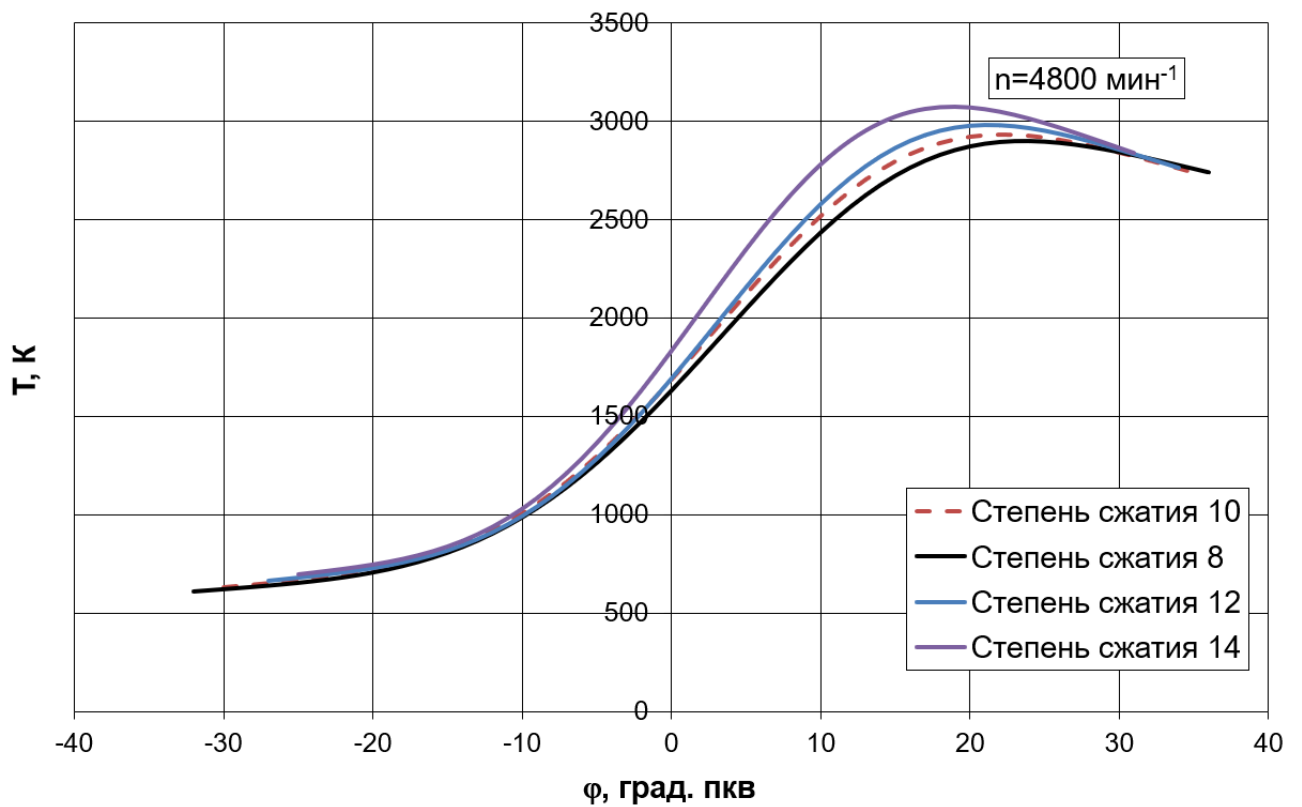


Рисунок 36 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима  $4800 \text{ мин}^{-1}$

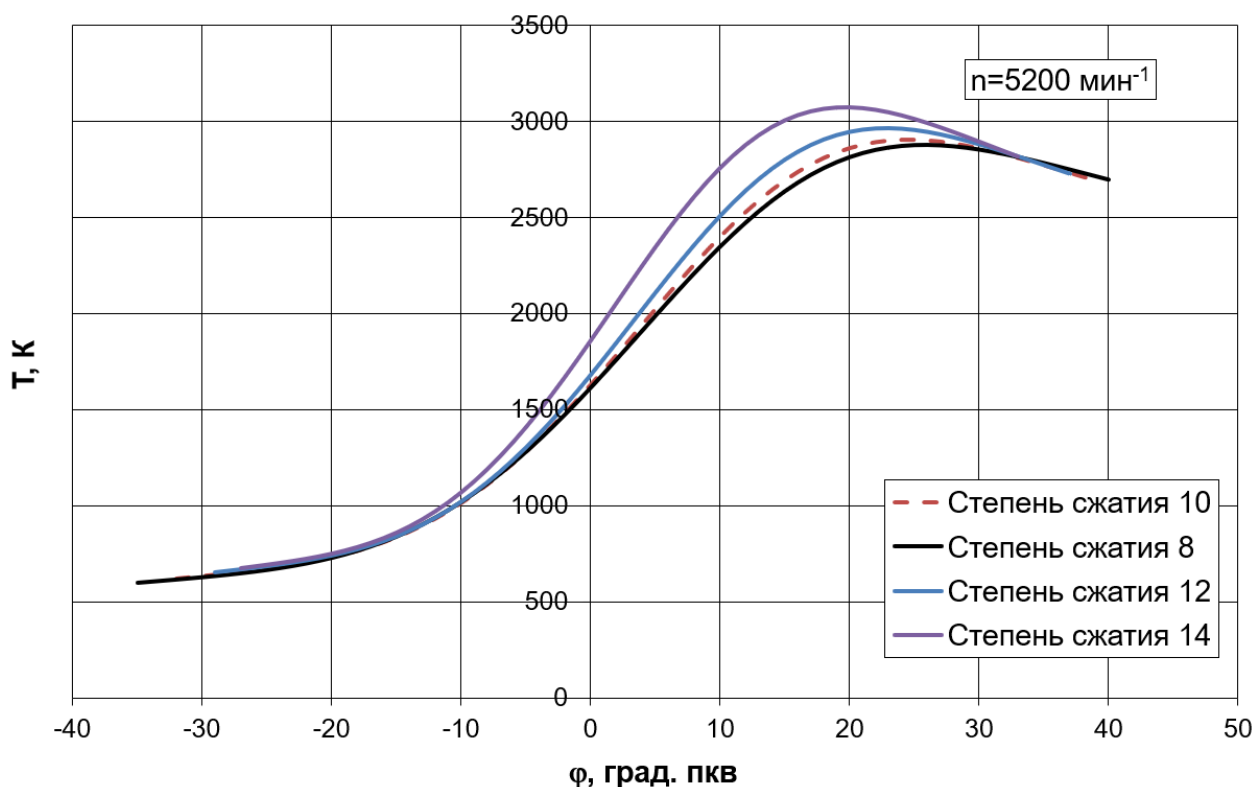


Рисунок 37 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима  $5200 \text{ мин}^{-1}$

Проводя анализ средней температуры в цилиндре двигателя во время сгорания по рисункам 33 – 37, можно отметить, необходимость уменьшения угла опережения зажигания для степеней сжатия 12 и 14 для перевода процесса сгорания в зону расширения с меньшими температурами. Иначе мы получаем повышенные значения по выбросам оксидов азота и риск возникновения детонационного сгорания. Оценивая влияние данных результатов, следует сказать, что повышение давления и температуры в процессе сгорания за счет повышения степени сжатия приводит к повышению полноты сгорания, и, следовательно, к снижению выбросов продуктов неполного сгорания, таких как углеводороды и монооксид углерода. С ростом частоты вращения увеличиваются границы детонации и повышение степени сжатия на высоких оборотах позволяет увеличивать мощностные показатели, практически как при применении систем наддува.



## 4.2 Влияния степени сжатия на эффективные показатели цикла

Проводить анализ эффективных показателей работы двигателя правильнее всего по графическому изображению внешней скоростной характеристики (рисунки 38 – 41). Для степени сжатия 8 (рисунок 38), наблюдаем снижение крутящего момента при увеличении частоты вращения. Также увеличиваются значения удельного эффективного расхода топлива, причем мы видим, что после частоты вращения  $3400 \text{ мин}^{-1}$  происходит резкое снижение эффективности процесса сгорания, это говорит о необходимости использовать низкую степень сжатия на малых и средних оборотах.

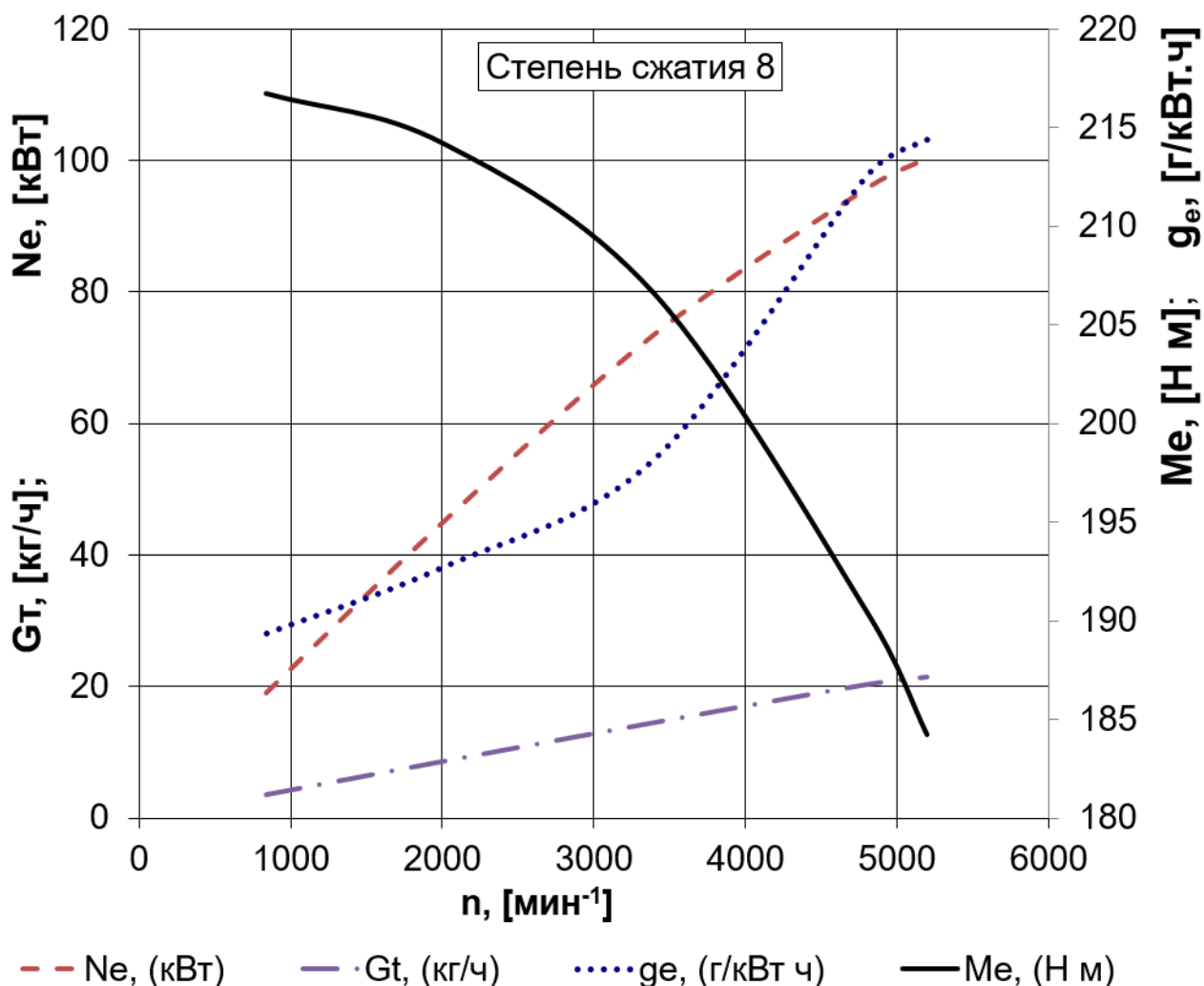


Рисунок 38 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с искровым зажиганием при работе на степени сжатия 8

Для степени сжатия 10 (рисунок 39), видим снижение влияния частоты вращения на эффективные характеристики работы, при этом получаем в среднем 10% увеличение мощностных показателей при сохранении того-же расхода топлива.

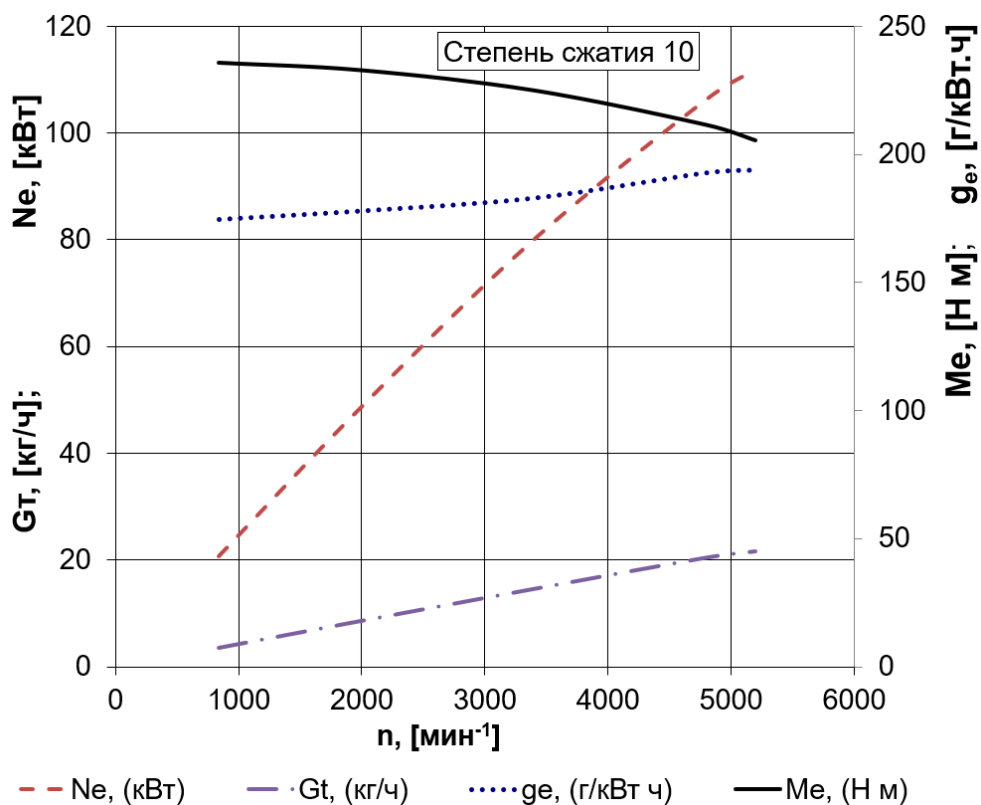


Рисунок 39 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с искровым зажиганием при работе на степени сжатия 10

Для степени сжатия 12 и 14 (рисунок 40 и 41), видим значительное улучшение 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.

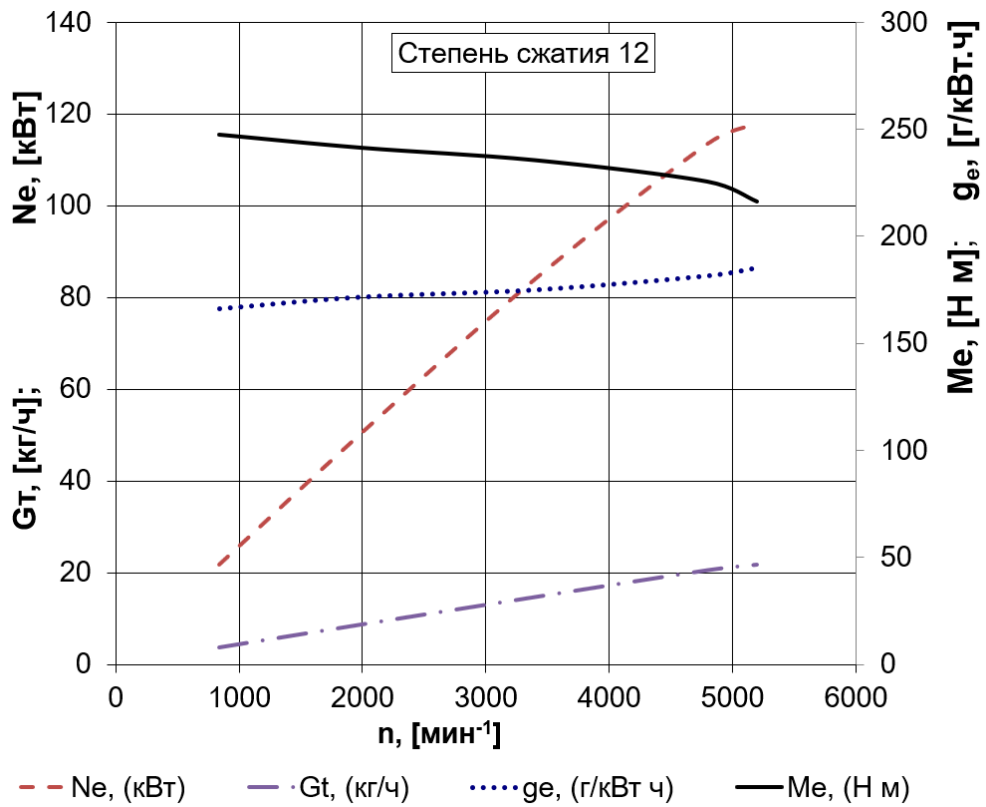


Рисунок 40 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с искровым зажиганием при работе на степени сжатия 12

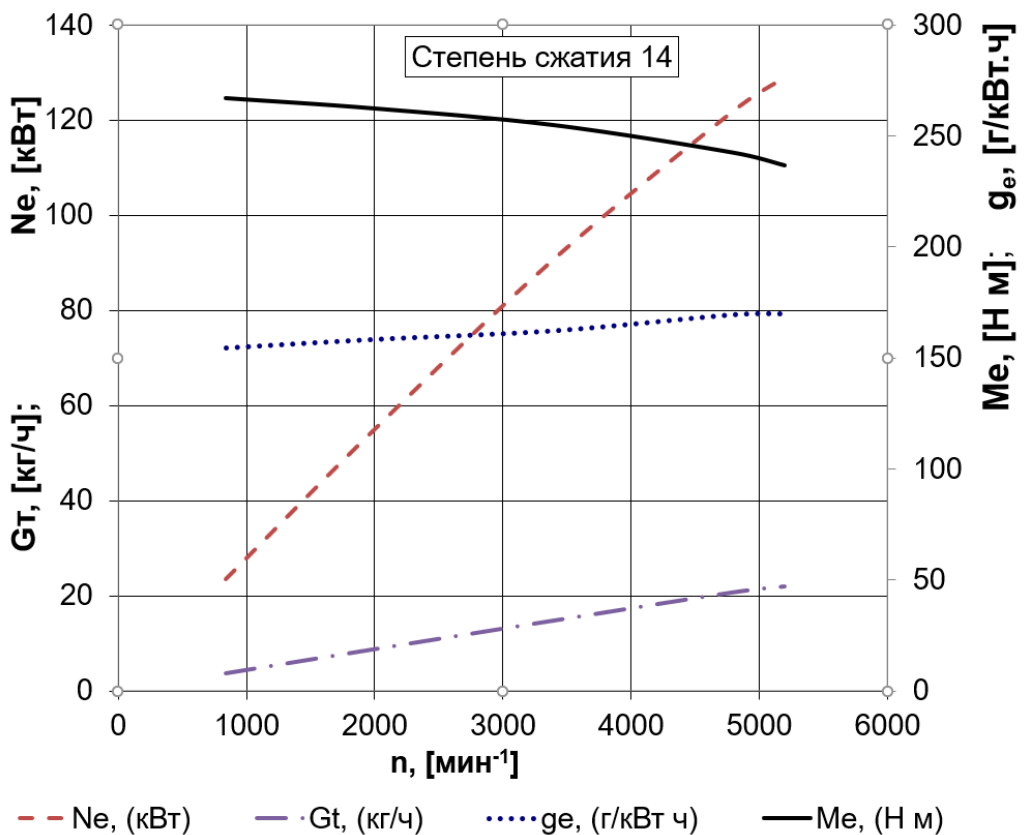


Рисунок 41 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с искровым зажиганием при работе на степени сжатия 14

Наглядно распределение тепловых потерь хорошо иллюстрируют графики внешнего теплового баланса (рисунки 42 и 43). Из графиков отчетливо видно снижение доли тепловых потерь в систему охлаждения и с отработавшими газами с ростом степени сжатия. Это связано с увеличением степени последующего расширения и, следовательно, большим теплоиспользованием полученной при сгорании энергии. Также большие температуры соответствуют меньшему объему камеры сгорания, что сказывается на снижении теплового потока в рубашку охлаждения, тем самым снижая общий уровень тепловых потерь на охлаждение двигателя.

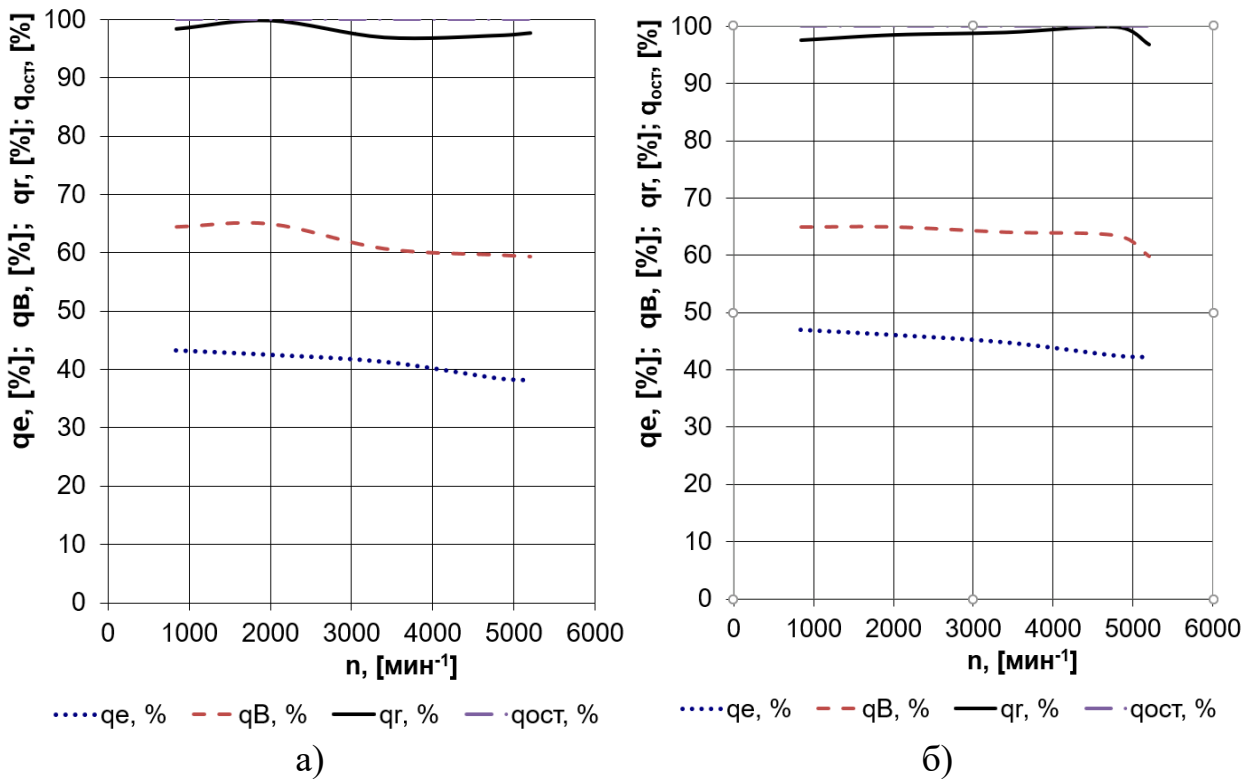


Рисунок 42 – Внешний тепловой баланс: (а) при работе на степени сжатия 8 и (б) при работе на степени сжатия 10

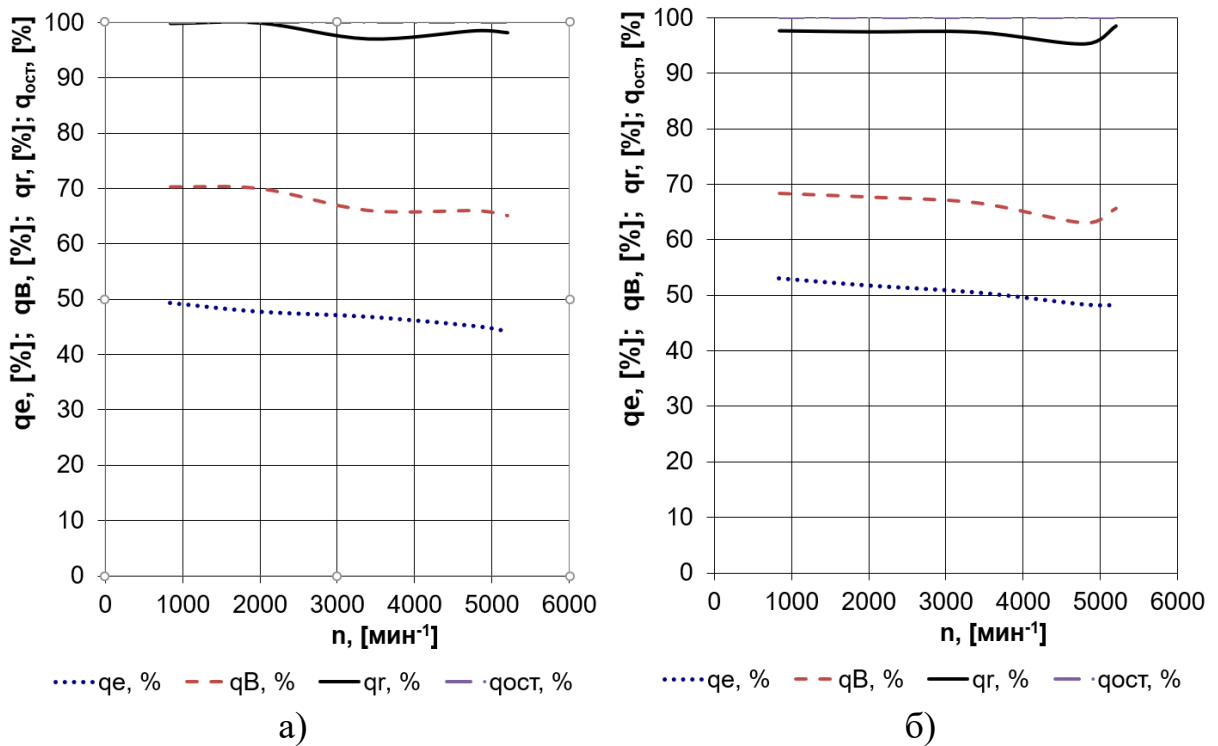


Рисунок 43 – Внешний тепловой баланс: (а) при работе на степени сжатия 12 и (б) при работе на степени сжатия 14

#### Выводы по 4-му разделу

Проведенный анализ показал, что для эффективной работы двигателя с изменяемой степенью сжатия необходимо осуществлять повышение степени сжатия с ростом частоты вращения и при увеличении нагрузки. Получено, что с увеличением степени сжатия происходит рост термического КПД примерно на 2% на каждую единицу увеличения степени сжатия. И увеличение степени сжатия на 6 единиц позволяет повысить КПД на 10%, а мощностные показатели работы почти на 20%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе проведен анализ влияния степени сжатия на рабочий процесс перспективного ДВС с изменяемой степенью сжатия.

Получены основные выводы по работе:

1. Повышение максимальной температуры цикла более 3000 К для степеней сжатия 12 и 14, а также значения максимального давления в цилиндре двигателя в районе 9 МПа для степени сжатия 12, что соответствует давлению при малом наддуве и в районе 11 МПа для степени сжатия 14, что соответствует давлению при среднем наддуве.
2. Повышение давления и температуры в процессе сгорания за счет повышения степени сжатия приводит к повышению полноты сгорания, и, следовательно, к снижению выбросов продуктов неполного сгорания, таких как углеводороды и монооксид углерода. С ростом частоты вращения увеличиваются границы детонации и повышение степени сжатия на высоких оборотах позволяет увеличивать мощностные показатели, практически как при применении систем наддува.
3. При повышении степени сжатия происходит значительное улучшение 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.
4. Проведенный анализ показал, снижение доли тепловых потерь в систему охлаждения и с отработавшими газами с ростом степени сжатия.

### Выводы по 1-му разделу

Проведенный обзор современного состояния двигателей с переменной степенью сжатия показал постоянный интерес к данному направлению развития среди ведущих мировых инжиниринговых центров. В результате было достигнуто надлежащее отображение технологии и рассмотрена расширенная классификация двигателей VCR. Эта классификация была объяснена с помощью репрезентативных примеров, которые были представлены как в схематическом, так и в структурном представлении.

На основании проведенного обзора был выбран для дальнейшего моделирования двигатель SAAB SVC, как единственная модель, выпускаемая серийно.

### Выводы по 2-му разделу

Тепловой расчет показал значительное влияние степени сжатия на мощностные и экономические характеристики работы двигателя. Получено, что для эффективного использования переменной степени сжатия необходимо повысить эффективность работы на низких степенях сжатия. Также необходимо контролировать условия воспламенения и горения при работе на степенях сжатия 12 и 14 для недопущения появления нарушения нормального процесса сгорания в виде детонации. Для этого следует контролировать максимальную температуру в процессе сгорания, как вариант — это применение систем анализа ионного тока проводимости в зоне свечи зажигания, где анализ плазмы за фронтом пламени покажет температурное состояние и своевременно контроля за процессом сгорания без детонации.

### Выводы по 3-му разделу

Как мы видим повышение степени сжатия не приводит к катастрофическому увеличению 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.

#### Выводы по 4-му разделу

Проведенный анализ показал, что для эффективной работы двигателя с изменяемой степенью сжатия необходимо осуществлять повышение степени сжатия с ростом частоты вращения и при увеличении нагрузки. Получено, что с увеличением степени сжатия происходит рост термического ПКД примерно на 2% на каждую единицу увеличения степени сжатия. И увеличение степени сжатия на 6 единиц позволяет повысить КПД на 10%, а мощностные показатели работы почти на 20%.



## 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-litrovyy-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. Ameri M., Kiaahmadi F., Khanaki M. Comparative analysis of the performance of a dual-fuel internal combustion engine for CNG and gasoline fuels. - Journal of Power Technologies, year 2012, pp. 214–226.
10. Baumeister, T. Mark's Standard Handbook for M. Engineer / T Baumeister // McGraw- Hill Inc., New York, 1966.

11. Beran, R. Entwicklung des H17/24G - Demerstenkoreanischen Gasmotor / R. Beran, T. Baufeld, H. Philipp, J. T. Kim, J. S. Kim // in: 11. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors. Graz. 2007
12. 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
13. 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
14. Clarke, J. M. Thermodynamic Cycle Requirements for Very High Rotational Efficiencies / J. M. Clarke // J. Mech. Eng. Sci. 1974
15. Fuller, D.D. Theory and Practice of Lubrication for Engineers / D.D. Fuller // John Wiley & Sons Inc., New York, 1966
16. 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]
17. Haywood, R.W. A Critical Review of Theorems of Thermodynamics Availability // R.W. Haywood / J. Mech. Eng. Sci. vol.16 MIT Press, 1970.
18. 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
19. Knop, V. Modeling of combustion and nitrogen oxide formation in hydrogen-fuelled internal combustion engines within a 3D CFD code / V. Knop, A. Benkenida, S. Jay, O. Colin // International Journal of Hydrogen Energy -2008.

20. 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
21. MCE-5 VCRI: Pushing back the fuel consumption reduction limits, MCE-5 Development 2010 [Internet]. Available from: [www.vcri.eu](http://www.vcri.eu) [Accessed: 5 October 2018]
22. 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
23. Polasek, M. Application of advanced simulation methods and their combination with experiments to modeling of hydrogen fueled engine emission potentials / M. Polasek, J. Macek, M. Takats, O. Vitek // SAE. - 2002. - №2002-01-0373.
24. 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
25. Renegar, D.C. The Quasiturbine / D.C. Renegar // USA Patent No:6629065 September 12th 2003
26. Rory, R. D. The Ball Piston Engine: A New Concept in High Efficient Power Machines / R. D. Rory // Convergence Eng. Corporation.
27. 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
28. Stephen, R. T. An Introduction to Combustion / R.T. Stephen // McGraw-Hill Series in Mech. Eng. 1996.
29. SVC Variable Compression Engine, Linköping University, Sweden 2014 [Internet]. Available from: [www.vehicular.isy.liu.se](http://www.vehicular.isy.liu.se) [Accessed: 5 October 2018]

30. 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
31. Verhelst, S. A critical review of experimental research on hydrogen fueled SI engines / S. Verhelst, R. Sierens, S. Verstraeten // SAE. - 2006. - №2006-01-0430.
32. 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
33. Woś P, Jakubowski M. Variable Compression Ratio Engine. Patent No. 217826. Warsaw: The Patent Office of the Republic of Poland; 29 August 2014
34. Zurbriggen f. Diesel-minimal combustion control of a natural gas-diesel engine. - Institute for dynamic systems and control, year 2016, pp. 302–311.