

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 Бензиновый двигатель для легкового автомобиля с регулируемым турбонаддувом

Студент

М.А. Гуломалиев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, В.В. Смоленский

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

Тольятти 2022

АННОТАЦИЯ

Дипломная работа посвящена вопросу применения турбоагнетателей на малолитражный двигатель легкового бензинового автомобиля с целью показать перспективность направления развития двигателестроения как даунсайзинг. В работе подробно изучается вопрос применения турбонаддува в двигателях со значительным перепадом давления при работе на нагрузочных режимах работы.

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

В бакалаврской работе представлены результаты проектирования двигателя с искровым зажиганием с турбонаддувом, при использовании различной степени наддува. Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка состоит из аннотации, введения, 4 разделов, заключения с основными результатами и выводами, содержит 36 рисунков, 13 таблиц, списка использованных источников (29 источников). Основной текст изложен на 76 страницах.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Состояние вопроса, направление исследования	5
1.1 История развития турбонаддува и даунсайзинга.....	5
1.2 Технологии, связанные с одноступенчатыми турбокомпрессорами	13
1.3 Технологии многоступенчатого бустинга.....	20
2 Тепловой расчет проектируемого двигателя	26
3 Кинематический и динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя	53
3.1 Кинематический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя.....	53
3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя	55
4 Анализ степени повышения давления при наддуве на рабочий процесс ДВС с турбонаддувом	64
4.1 Влияния степени повышения давления при наддуве на максимальную температуру и давление цикла	64
4.2 Влияния степени повышения давления при наддуве на эффективные показатели цикла	68
Заключение	72
Список используемых источников	74

ВВЕДЕНИЕ

Автомобили с двигателями внутреннего сгорания находятся под чрезвычайно высоким давлением выбросов. В настоящее время нормы выбросов транспортных средств стали намного строже, и Европейская комиссия объявила, что к 2020 году целевой показатель выбросов CO₂ для легковых автомобилей составляет 95 г/км, а для легковых автомобилей – 145 г/км, что должно быть дополнительно снижено на 15% и 30% в 2025 и 2030 годах. Было доказано, что уменьшение размеров является одной из наиболее эффективных технологий для улучшения экономии топлива двигателя, поскольку оно дает двигателю возможность уменьшить тепловые потери и потери на трение, но не потерю мощности [7,8].

Уменьшая рабочий объем двигателя, но увеличивая его удельную мощность, двигатель может иметь более высокое среднее эффективное давление торможения. Турбокомпрессоры широко распространены, поскольку они могут помочь уменьшить размер двигателя с естественным наддувом, просто используя энергию выхлопных газов без внешних затрат. Однако из-за растущей потребности в более высокой удельной мощности, управляемости и снижении выбросов обычные двигатели с турбонаддувом изо всех сил пытаются обеспечить достаточную разницу. Учитывая быстрое развитие и ожидания гибридных и электрических транспортных средств, усовершенствованная система электрического наддува является одним из наиболее эффективных решений, позволяющих двигателям с турбонаддувом преодолевать эти трудности [9].

1 Состояние вопроса, направление исследования

1.1 История развития турбонаддува и даунсайзинга

Автомобильный транспорт вносит большой вклад в загрязнение воздуха, и в настоящее время нормы выбросов транспортных средств намного строже. В Европе Европейская комиссия объявила, что целевой показатель выбросов легковых автомобилей и фургонов должен быть снижен со 130 г/км CO₂ до 95 г/км CO₂. Производители нашли много способов уменьшить выбросы в процессе экспериментальных испытаний, поэтому разрыв в выбросах между испытанием и реальным вождением становится все больше и больше. В результате в 2007 году было объявлено о проекте Всемирной согласованной процедуры испытаний легковых автомобилей (WLTC), а первый этап был предложен в 2014 году. Этот регламент впервые использовался для испытаний на одобрение типа в 2017 году. После 2020 года новые автомобили могут проходить испытания в WLTC только на лабораторном этапе (рисунок 1) [9].

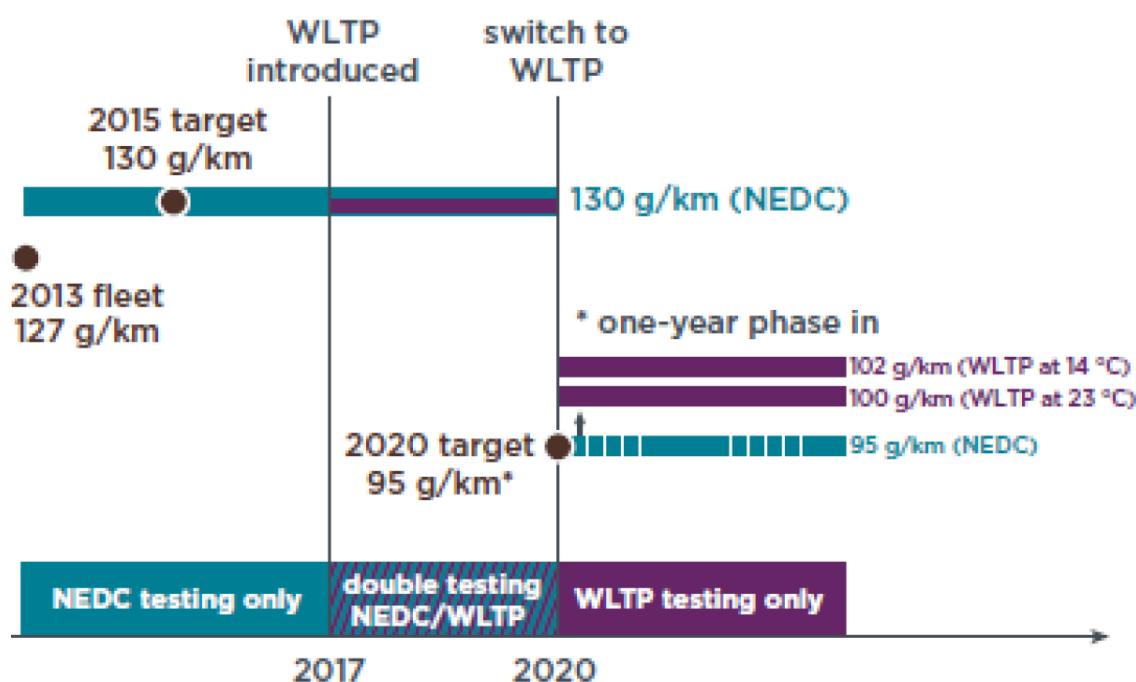


Рисунок 1 – Разработка правил выбросов транспортных средств

По сравнению с протоколом испытаний NEDC есть четыре основных отличия [10]:

- Определение дорожной нагрузки.
- Методика лабораторных испытаний.
- Постобработка результатов тестирования.
- Декларация результатов CO₂.

Поскольку цикл WLTC более надежен, чем NEDC, было задействовано больше типов дорожных ситуаций. Это изменение приводит к общему увеличению выбросов NO_x, PM и PN и снижению выбросов несгоревших углеводородов (THC) и CO, но может помочь сократить разрыв в выбросах между реальным вождением и испытаниями. Тем не менее, WLTC по-прежнему является фиксированным методом испытаний, и производители могут использовать разницу между реальными выбросами и лабораторными испытаниями. Другой протокол испытаний, называемый тестом на выбросы при реальном вождении (RDE), основан на выбросах при реальном вождении. В нем будут использоваться автомобили с бортовыми переносными системами измерения выбросов (PEMS). Данные о выбросах будут измеряться во время вождения в реальных дорожных условиях, на которые влияет множество различных реальных факторов и поведения водителей, а результаты будут сравниваться с WLTC [11].

Гораздо более строгое законодательство по выбросам и повышение экологической осведомленности людей срочно приводят к требованию повышения экономии топлива двигателя. За последние несколько десятилетий было открыто много различных технологий для улучшения топливной экономичности двигателя. Например, непосредственный впрыск бензина (GDI, гомогенное и послойное сгорание обедненной смеси) — метод, при котором бензин под высоким давлением впрыскивается непосредственно в камеру сгорания через общую магистраль. Отличается от обычного впрыска топлива тем, что последний впрыскивает топливо во впускной тракт или порт цилиндра.

GDI помогает контролировать процесс сгорания, а жидкое топливо под высоким давлением испаряется в цилиндре. Этот процесс отводит тепло как от впускного воздуха, так и от цилиндра, что увеличивает объемный КПД.

Рециркуляция отработавших газов (EGR) — еще один способ снизить расход топлива и сократить выбросы. За счет смешивания частичного выхлопа с всасываемым воздухом снижается уровень кислорода, что снижает температуру в цилиндрах и снижает выбросы. Система с регулируемым клапанном механизмом, изменяет подъем, продолжительность и синхронизацию каждого впускного клапана для улучшения расхода топлива и снижения выбросов. Все эти технологии широко используются в последние несколько лет, они улучшают характеристики двигателя внутреннего сгорания и снижают выбросы. В настоящее время двигатели транспортных средств проектируются с более высокой удельной мощностью, что может еще больше повысить эффективность двигателя и снизить расход топлива. Уменьшение размеров двигателя является одним из наиболее масштабных способов повышения средней удельной мощности торможения двигателем. За счет уменьшения размера двигателя и связанных с ним компонентов будут уменьшены трение двигателя, тепловые потери и потери дроссельной заслонки (только для бензиновых двигателей). Текущие исследования показывают, что транспортное средство с сильно уменьшенным двигателем может сократить выбросы CO₂ не более чем на 35 % и добиться экономии топлива на 35 %. На рисунке 2 показаны расход топлива и крутящий момент автомобилей с турбонаддувом и без наддува в различных условиях: от движения по городу с частыми остановками и троганиями с места до движения по трассе. Двигатель 1,5 л с турбонаддувом имеет несколько больший выходной крутящий момент, но меньший расход топлива по сравнению с атмосферным двигателем 2,4 л [12].

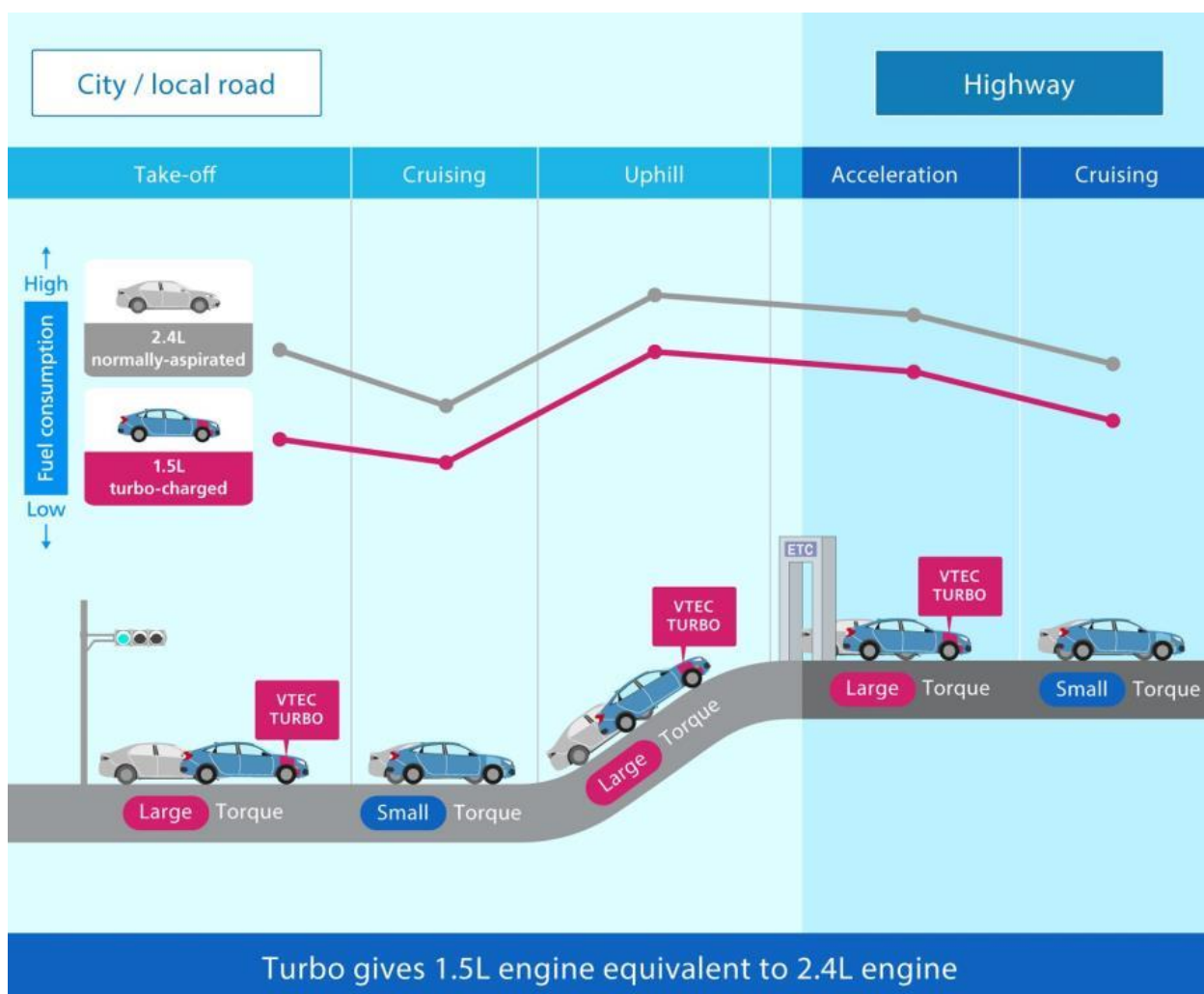


Рисунок 2 – Топливная экономичность автомобилей с турбонаддувом в различных условиях

Однако инженерам необходимо учитывать не только экономию топлива, но и характеристику мощности двигателя. Одноступенчатый двигатель с турбокомпрессором изо всех сил пытается достичь цели как по пиковой мощности, так и по крутящему моменту на низких оборотах.

Бензиновый двигатель сильно уменьшенного размера будет иметь повышенный риск детонации, переходные характеристики также приносятся в жертву из-за уменьшения размера двигателя. Для удовлетворения проектных требований в различных областях требуется более сложная система наддува. Задействованы многоступенчатая система, рециркуляция отработавших газов, система охлаждения, нет простой методологии проектирования воздушного тракта двигателя. На рисунке 3 показан пример

модуля управления для двухступенчатой развязанной системы электрического наддува, различные клапаны, двигатели необходимо отрегулировать для достижения одинаковой выходной мощности двигателя, учитывая переходные характеристики и баланс мощности, все еще существуют проблемы для управления и оптимизации контроль каждого компонента [13].

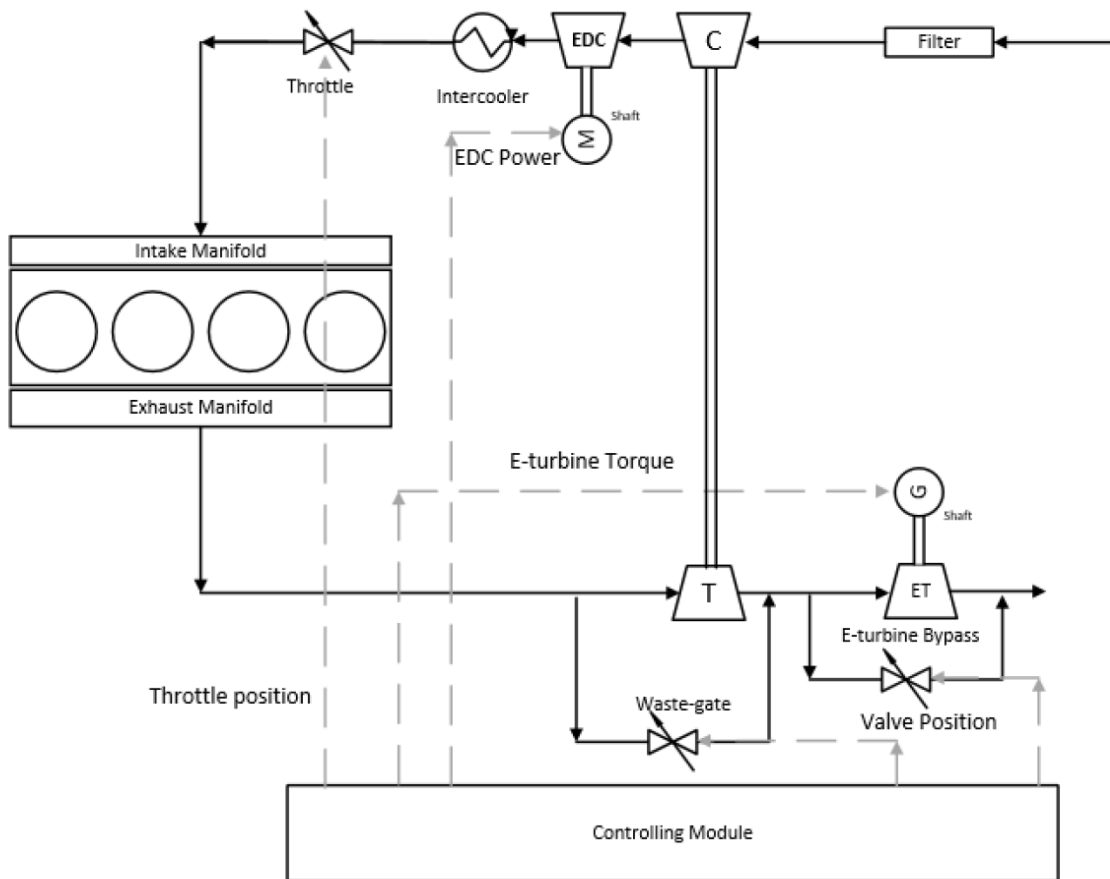


Рисунок 3 – Пример схемы воздушного тракта двигателя

Исследование согласования одноступенчатых турбоагнетателей довольно простое и уже исследовалось и определялось другими исследователями в прошлом. Цель согласования состоит в том, чтобы выбрать наиболее подходящий компрессор и турбину для целевых характеристик выходной мощности двигателя. Как правило, основной процесс выбора одноступенчатого турбокомпрессора [14]:

- Определение массового расхода воздуха на входе, необходимого двигателю, который связан с объемным КПД двигателя, расходом продувки, рабочим объемом, давлением наддува и плотностью воздуха.
- Определите целевой наддув, который требуется двигателю при эталонной частоте вращения двигателя, выберите компрессор на основе перепада давления, скорректированного массового расхода и скорости, которые должны обеспечивать полную рабочую линию двигателя (диапазон скорости и нагрузки), наложенную на карту компрессора, оставьте достаточный запас для помпажа и зоны низкой эффективности(захлебывания).
- Рассчитав мощность, необходимую для компрессора, выбрать турбину, мощность которой достаточна для его привода с преодолением потерь в подшипниковой системе с учетом теплового КПД турбины.

Однако, когда в процесс турбосогласования вовлечены родственные технологии, например, двухступенчатая система наддува, необходимо учитывать больше параметров и степеней свободы. Трудности теперь изменились с того, как увеличить удельную мощность системы, на то, как достичь целевого выхода и сделать эффективность всей системы, реакцию как можно лучше. Для двухступенчатой системы основная задача состоит в том, чтобы решить распределение степени повышения давления для каждой ступени, поскольку степень изменения давления и температуры на ступени низкого давления в начале неизвестны, следует принять допущение относительно степени повышения давления для каждой ступени. компрессор в системе для достижения окончательного наддува. Поскольку современная система двигателя становится более сложной, EGR, VGT, система доочистки и др. задействованы в тракте выхлопного воздуха двигателя, как сбалансировать все эти компоненты становится серьезной проблемой [15].

В прошлом веке было исследовано несколько технологий наддува, и система турбонагнетателя может увеличить среднее эффективное давление на тормозе (BMEP) двигателя и снизить выбросы транспортных средств.

По сравнению с нагнетателем и естественными устремлениями ему не требуется дополнительная мощность для достижения цели наддува, что может снизить удельный расход топлива при торможении. Поскольку были применены протоколы испытаний WLTC и RDE, производители теперь выбирают турбокомпрессоры в первую очередь при разработке новейших двигателей внутреннего сгорания [16].

Тем не менее, нехватка турбокомпрессоров также требует тщательного решения. Помимо плохой работы в области низких скоростей, упомянутой выше, противодействие двигателя будет увеличено из-за турбины в выхлопной трубе; большее противодействие приведет к более значительным потерям в насосе двигателя, которые произошли во время процесса продувки цилиндра. Кроме того, когда двигатель работает с высокой нагрузкой и высокой скоростью, перепускной клапан будет открыт, чтобы перепускать часть выхлопных газов, чтобы турбина работала в соответствующем диапазоне. На этом этапе часть энергии при высокой скорости и высокой температуре выхлопа тратится впустую [17].

Технологию электрического наддува можно рассматривать как важный метод оптимизации системы турбокомпрессора. Этот вид системы имеет много различных типов, но решающим фактором является то, что электрические устройства участвуют в увеличении свободы системы турбокомпрессора или других свойств. Использование двигателя или генератора, установленного на валу, позволяет уменьшить турбозадержку и увеличить экономию топлива. Panting раскрывает преимущества системы с электроприводом [18].

- Турбина и компрессор могут быть переработаны и оптимизированы для повышения эффективности в установившемся режиме.
- Структура, близкая к турбокомпаундированию, может использовать больше энергии выхлопных газов.

- Электрическая часть может помочь создать большее давление наддува в условиях низких оборотов двигателя, что поможет повысить эффективность и мощность.
- Здесь больше не нужен перепускной клапан, поскольку турбиной можно управлять для достижения заданной скорости.

Тем не менее, по сравнению с механическим турбокомпрессором, надежность технологии электрического наддува должна быть проверена, поскольку электродвигатель должен работать на очень высокой скорости, основные вопросы, которые необходимо решить, это размещение элементов малом объеме корпуса, надежность и охлаждение. Проблема согласования также является еще одной трудностью для многоступенчатой гибридной системы, поскольку электрический турбонагнетатель обычно играет роль как в увеличении переходных характеристик, так и в увеличении крутящего момента на низких скоростях, будет компромисс между затратами на электроэнергию электрического турбонаддува, помпажом двухступенчатого компрессора и регулировка между VGT турбины и целью электрического турбонаддува [19].

Кроме того, энергия выхлопных газов будет преобразовываться между турбиной и компрессором в несколько раз больше, что снизит КПД турбокомпрессора, поэтому возникает компромисс между сбором энергии и оптимизацией характеристик.

Система электрического наддува в настоящее время привлекла внимание исследователей и инженеров, как разработка и ожидание гибридных технологий от людей.

У производителей есть возможность обновить 48-вольтовую систему, чтобы заменить текущую 12-вольтовую электрическую систему на легковых автомобилях, это дает возможность автомобилям использовать более сложную электрическую систему, например, электрический турбокомпрессор, электрические устройства доочистки, системы трансмиссии с двойным сцеплением и так далее, а также лучше использовать

энергию, полученную от тормозной системы автомобиля или системы турбонаддува. Потребности в сокращении выбросов в ближайшем будущем (с 2020 по 2035 год) не только создают серьезные проблемы, но и дают возможность исследователям, занимающимся этими типами гибридных систем, разрабатывать более эффективные и экологически безопасные системы двигателей для транспортных средств [20].

1.2 Технологии, связанные с одноступенчатыми турбокомпрессорами

Уменьшение размера двигателя предлагает проверенный способ повышения эффективности за счет увеличения удельной выходной мощности и обеспечивает чистое снижение потерь на трение до 25 %. Эффективное уменьшение габаритов достигается за счет использования турбонагнетателей, которые рециркулируют впустую энергию выхлопных газов. По мере того, как уменьшение размера двигателя становится все более агрессивным, требования к системе наддува становятся выше, так что традиционные технологии турбокомпрессора с трудом удовлетворяют требования к расходу и переходным характеристикам. Компромисс конструкции турбины турбокомпрессора заключается в балансе между небольшой турбиной, которая обеспечивает крутящий момент на низкой скорости и переходную характеристику, и большей турбиной, которая обеспечивает пиковую мощность. За последние несколько десятилетий был разработан ряд технологий для дальнейшего улучшения характеристик двигателя и экономии топлива [21].

1.2.1 Перепускной клапан турбины и перепускной клапан компрессора

Производители открывают множество различных методологий для преодоления проблем согласования и переходных характеристик. Для расширения рабочего диапазона турбокомпрессора введены перепускной

клапан компрессора и перепускной клапан турбины (рисунок 4). Когда двигатель работает на низкой скорости и в условиях низкой нагрузки, давление наддува больше не требуется, но теперь низкоскоростной компрессор будет сопротивляться поглощению воздуха двигателем. Введен перепускной клапан, позволяющий воздуху проходить через впускной коллектор, минуя компрессор; таким образом, турбокомпрессор перестает работать в этой области низкой нагрузки, но не оказывает отрицательного влияния на характеристики двигателя. Перепускной клапан используется для перепуска части высокотемпературных выхлопных газов, когда двигатель работает на высоких оборотах и в условиях высокой нагрузки. Он может ограничить давление наддува турбокомпрессора и избежать превышения скорости. Между тем, избыточная энергия выхлопа на этом этапе тратится впустую [22].

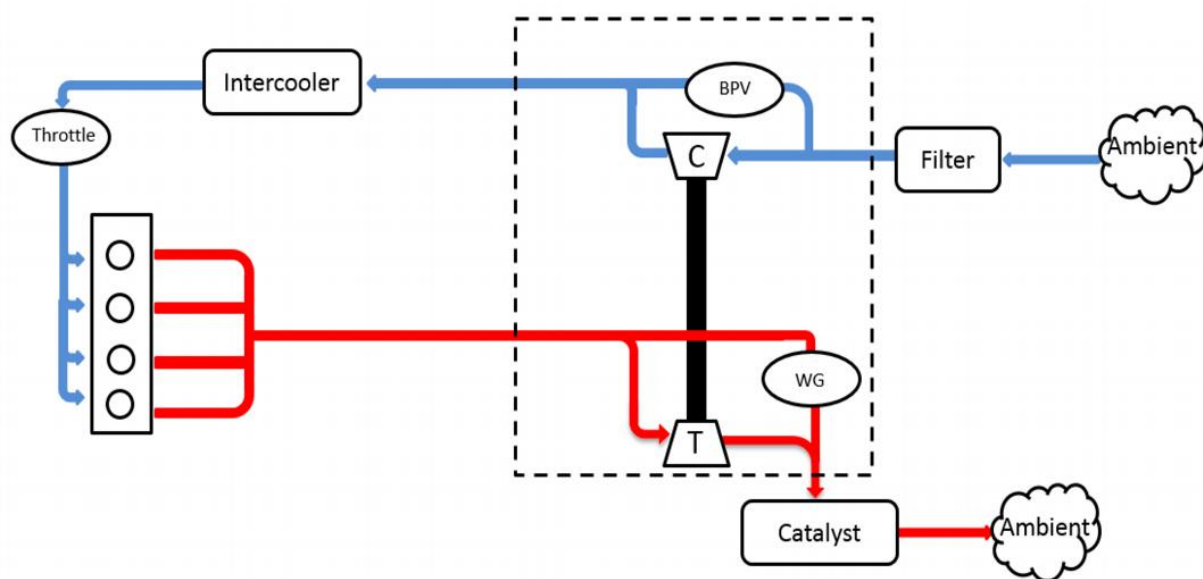


Рисунок 4 – Структура турбокомпрессора.

1.2.2 Турбокомпрессор на шарикоподшипниках

Турбокомпрессор работает в высокоскоростном и температурном режиме, частота вращения вала ротора в небольших турбокомпрессорах может превышать 200 тыс. об/мин. Высокая температура выхлопных газов также увеличивает температуру турбокомпрессора, поэтому характеристики

подшипниковой системы, поддерживающей турбовал, очень важны. В большинстве турбокомпрессоров используются подшипники с плавающим кольцом, поддерживаемые упорным подшипником в осевом направлении. Эта система подшипников очень надежна, имеет низкую стоимость и высокую надежность. Однако эта система неэффективна (рассеиваемая мощность от 2 до 10% зависит от скорости и размера), это происходит в условиях высокой скорости и температуры из-за механических потерь и тепловых потерь, которые он производит. В последние годы была исследована система шарикоподшипников, отличающаяся от традиционной подшипниковой системы, в ней использовался картридж с двумя радиально-упорными шарикоподшипниками, а также осевая и радиальная нагрузка можно поддерживать. Было продемонстрировано, что система шарикоподшипников имеет более низкое трение, чем подшипники с плавающими кольцами. Более низкое трение поможет уменьшить инерционное отставание системы.

Мияшита и др. разработали турбокомпрессор на шарикоподшипниках, результат показывает, что механический КПД шарикоподшипника достигает почти 99% в максимуме, он был увеличен на 20% в диапазоне низкого массового расхода и на 5% в диапазоне высокого массового расхода. диапазон по сравнению с плавающим металлическим подшипником, но эта система в значительной степени зависит от свойств смазки. Келлер и др. смоделировали работу турбокомпрессора на шарикоподшипниках при анализе переходных характеристик. Было подтверждено, что шарикоподшипник дает от 80% до 90% преимущества в снижении переходной амплитуды. Однако эта система намного дороже и сложнее, чем подшипники с плавающим кольцом, корпус подшипника должен быть тщательно спроектирован, его долговечность, как правило, хуже, кроме того, шарикоподшипники менее эффективны в области высоких скоростей и производят много шума [23].

1.2.3 Турбина турбокомпрессора со смешанным потоком

В настоящее время турбины турбокомпрессора в основном имеют радиальную конструкцию, поток выхлопных газов проходит через турбину от осевого направления к радиальному направлению под направлением конической лопатки турбины с нулевым углом. Такая конструкция может поддерживать радиальные секции лопастей для стабильной центробежной нагрузки в лопастях исключительно на растяжение, а также может генерировать наибольшую мощность в условиях высокой нагрузки. Однако для низкоскоростного, но высоконагруженного дизельного двигателя, что означает, что выхлопные газы имеют низкую температуру, но высокую плотность, турбонагнетатель требуется для обеспечения достаточного наддува, это может быть достигнуто только путем применения турбонагнетателя с малой общей геометрией и высокой скоростью вращения, который имеет крайне низкий КПД. Турбина со смешанным потоком может помочь обеспечить больший наддув в этих условиях из-за ее более высокой эффективности в случаях низкого отношения скоростей (рабочие точки пиковой эффективности обычно лежат в области более низких скоростей).

Однако турбина со смешанным потоком снизит мощность турбины, но увеличит осевую нагрузку, а также будет сложнее применить к ее конструкции технологии, связанные с турбонаддувом, например, конструкцию турбины с изменяемой геометрией. На рисунке 5 показаны различия между радиальной турбиной и турбиной со смешанным потоком [24].

1.2.4 Турбокомпрессор с изменяемой геометрией

Конструкция турбокомпрессора с изменяемой геометрией — еще один эффективный способ улучшить характеристики турбокомпрессора. Соотношение сторон турбонагнетателя является важным фактором, влияющим на способность наддува и переходную характеристику.

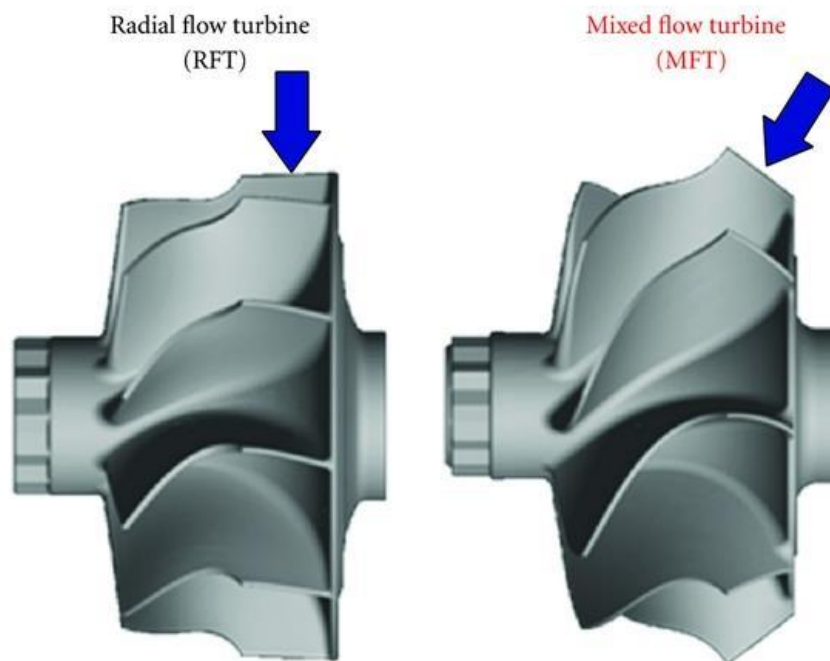


Рисунок 5 – Радиальная турбина и турбина со смешанным потоком

Турбина VGT (рисунок 6) может изменять угол наклона регулируемых лопастей в машинном отделении, чтобы регулировать поток выхлопных газов относительно лопастей турбины. По сравнению с турбокомпрессором с перепускным клапаном, он имеет много преимуществ. Регулируя угол лопасти для достижения подходящих характеристик турбонагнетателя, можно создавать более высокий пиковый крутящий момент при низких оборотах двигателя; это также улучшает общую выходную мощность двигателя без увеличения насосных потерь, когда транспортное средство движется в условиях высоких оборотов двигателя.

На рисунке 7 показана зависимость степени расширения от массового расхода турбин с фиксированной или изменяемой геометрией. Очевидно, что турбина VGT имеет гораздо более широкий спектр применения и лучшую производительность. Серия исследований показала, что VGT может помочь улучшить переходную характеристику при низких оборотах двигателя. Однако производительность VGT в основном зависит от типа турбокомпрессора, к которому он подключен, и переходную характеристику

решить невозможно. Сложная конструкция значительно увеличивала стоимость и сложность изготовления, а также снижала надежность такого рода систем [25].

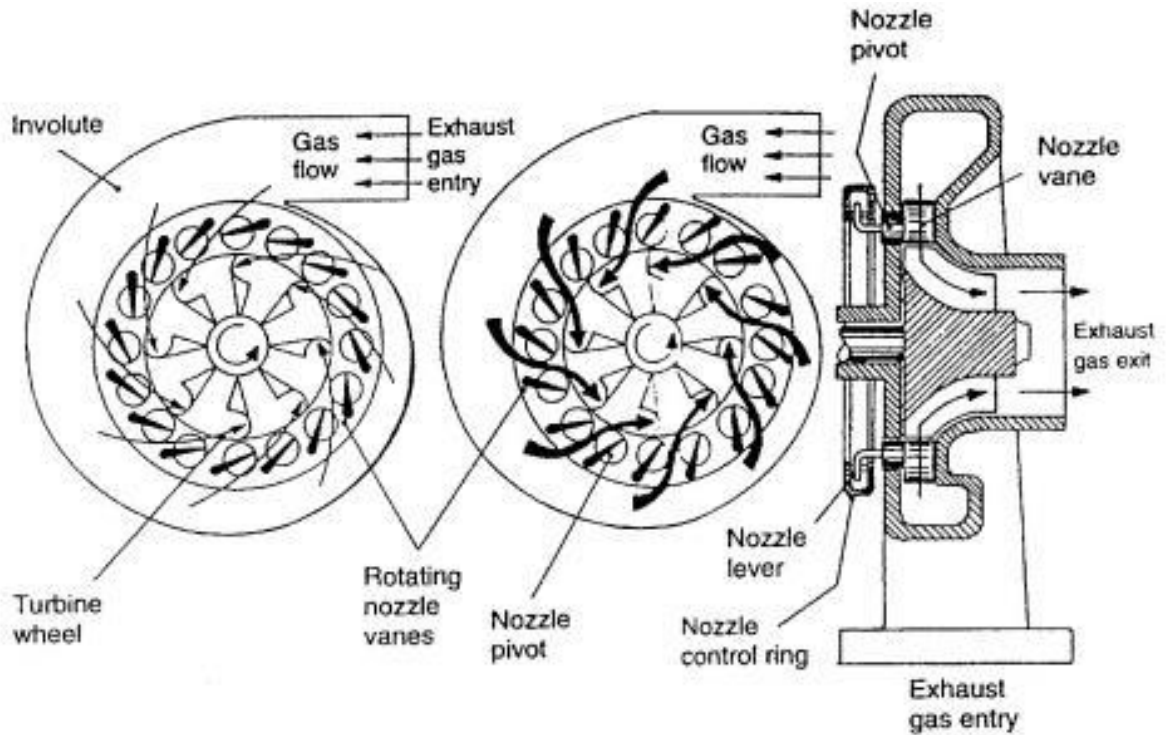


Рисунок 6 – Турбина VGT

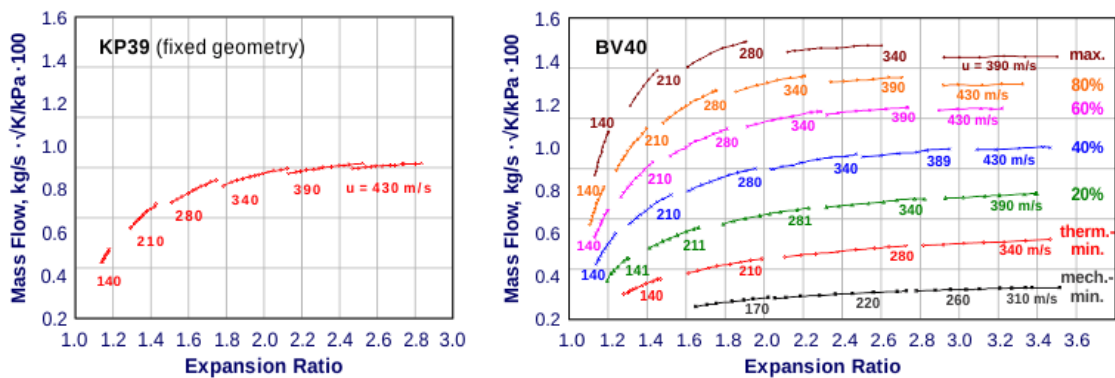


Рисунок 7 – Зависимость степени расширения от массового расхода турбин с фиксированной или изменяемой геометрией

1.2.5 Турбо-компаундирование

Турбоагнетатель определяется как турбокомпрессор (связанный или разъединенный), который имеет некоторую связь и передачу мощности с

двигателем. Существует четыре различных конструкции системы турбокомпаундирования, как показано на рисунке 8.

На рисунке 8(a) двигатель соединен с турбоагнетателем валом с системой трансмиссии. Это может помочь турбоагнетателю, когда наддув недостаточен в области низких скоростей и крутящего момента, что также улучшит переходную характеристику; однако проблема согласования передаточного отношения здесь очень сложна, особенно в отношении условий нагрузки. Бесступенчатая трансмиссия (CVT) может решить эту проблему, поскольку она позволяет турбоагнетателю вращаться независимо от частоты вращения двигателя. Этот тип системы турбонаддува используется для уменьшения объема бензинового двигателя V6 объемом 3,2 л до 4-цилиндрового двигателя TC объемом 2 л компанией VanDyne и др. Он был назван супер-турбокомпрессором, который имеет худший BSFC при полной нагрузке, но лучший BSFC при частичной нагрузке. Их результат показывает, что эта система обеспечивает экономию топлива на 17% в цикле NEDC по сравнению с оригинальным двигателем с турбонаддувом [26].

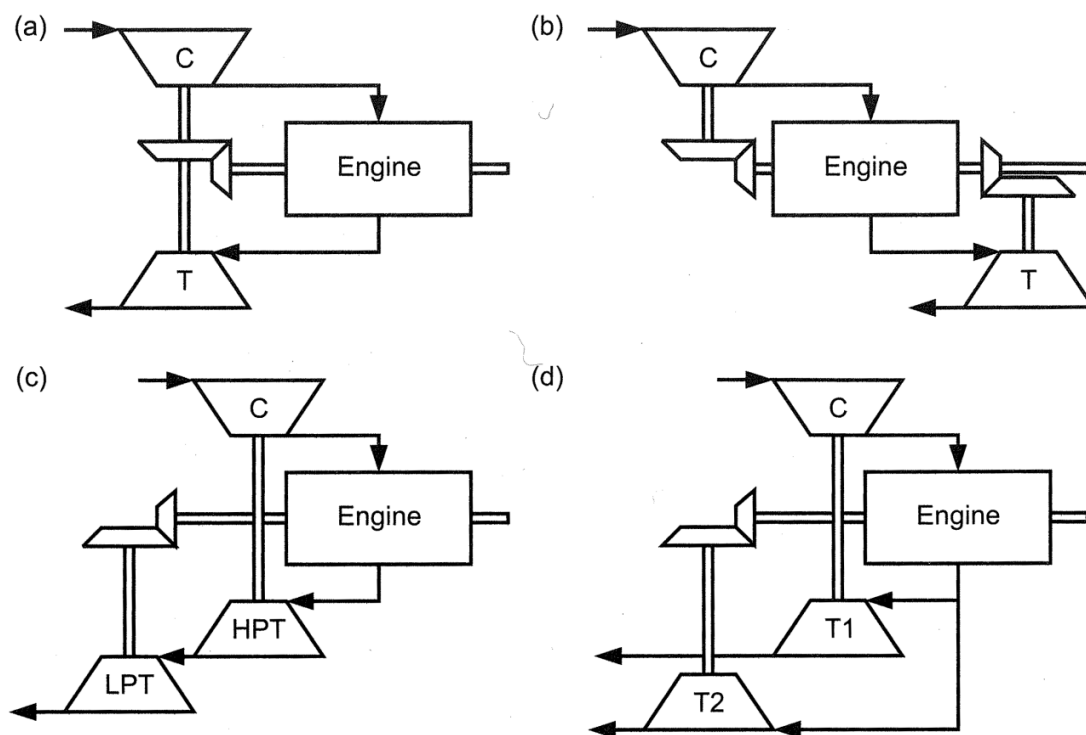


Рисунок 8 – Четыре вида схемы турбокомпаундирования

На рисунке 8б показано, что компрессор и турбина подключены к двигателю по отдельности. Эта система сталкивается с той же проблемой, что и турбокомпаунд на рисунке 8а; однако он ввел в систему более высокую степень свободы, так что компрессор и турбина могут вращаться с разной скоростью. Уоллес и др. провели несколько итераций этой системы с использованием двухтактного и четырехтактного дизельного двигателя большой мощности. Результат показал, что он предлагает преимущества с точки зрения переходной характеристики и экономии топлива, но эта конструкция все еще находится на стадии исследований из-за ее сложной конструкции.

Рисунки 8с и 8д представляют собой конструкцию турбокомпрессора с силовой турбиной. Эти два типа систем более полезны в большегрузных транспортных средствах. Бейнс и Уоллес и Кокс в своем исследовании пришли к выводу, что этот тип системы турбокомпаундирования может применяться только к двигателям, которые всегда работают с очень высоким уровнем наддува и ВМЕР, и не подходит для легковых автомобилей, работающих в основном с частичной нагрузкой. В результате исследования было показано, что система двигателя с турбокомпрессором имеет лучший удельный эффективный расход топлива (BSFC) и эффективность в условиях полной нагрузки, но при низких нагрузках двигатель должен управлять турбиной с потерями, что снижает эффективность турбокомпрессора [27].

1.3 Технологии многоступенчатого бустинга

Низкотемпературное сжигание считается передовой технологией, поскольку оно имеет более высокую эффективность и меньше загрязняет окружающую среду. Чтобы решить проблему ухудшения выбросов NOx, используется EGR; однако это приведет к проблеме выброса сажи. Повышение давления наддува и снижение температуры на впуске может помочь уменьшить выбросы. Одноступенчатые турбонагнетатели с высокой

степенью сжатия могут обеспечить всасываемый воздух высокой плотности, но это приведет к ограниченному диапазону массового расхода и высокой турбоскорости для большей части рабочей области. Чтобы решить эту проблему без потери переходных характеристик, можно использовать двухступенчатые системы турбонагнетателя. Двойные турбины могут иметь лучшую переходную характеристику, максимальный крутящий момент и более высокую эффективность по сравнению с одноступенчатыми турбонагнетателями. Он также расширил рабочую область системы наддува, например, на рисунке 9 показана рабочая область двухступенчатой системы турбокомпрессора и то, как она расширяет рабочую область.

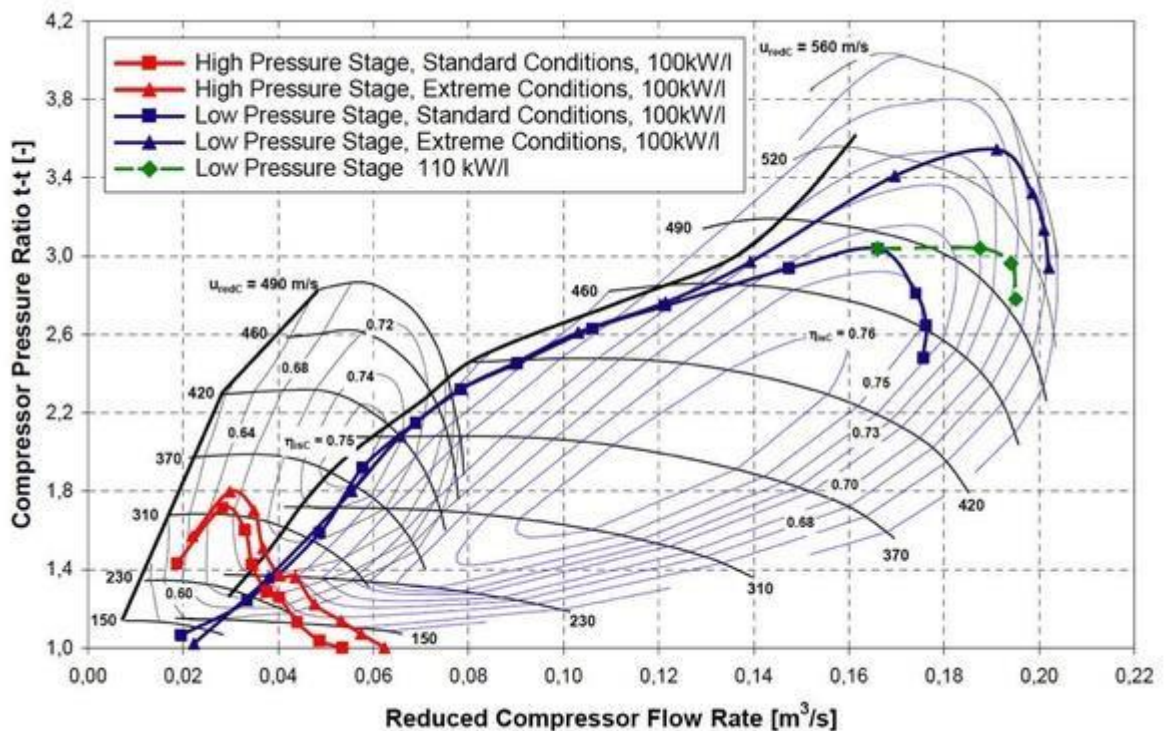


Рисунок 9 – Рабочая область последовательно соединенного двухступенчатого турбокомпрессора.

Двухступенчатые турбокомпрессоры часто имеют два способа подключения: параллельное и последовательное подключение. Каждый из них имеет разные функции. Параллельный твин-турбо всегда имеет одни и те же два типа турбонагнетателя, которые используются для замены больших турбонагнетателей в двигателях большого объема. Два турбокомпрессора

установлены параллельно. Они соединены с выпускными коллекторами двигателя и разделяют выхлоп от двигателя. Подаваемый ими сжатый воздух будет объединяться в стандартном впускном коллекторе, а затем направляться в цилиндр. Параллельные системы с двойным турбонаддувом используют два небольших турбоагнетателя для выполнения той же задачи, что и один большой турбоагнетатель. Таким образом, турбо-задержка может быть значительно уменьшена. Это увеличивает степень сжатия и массовый расход, которые могут быть применены к системе наддува, но дополнительно увеличивает противодействие турбоагнетателя и снижает эффективность турбоагнетателя [28].

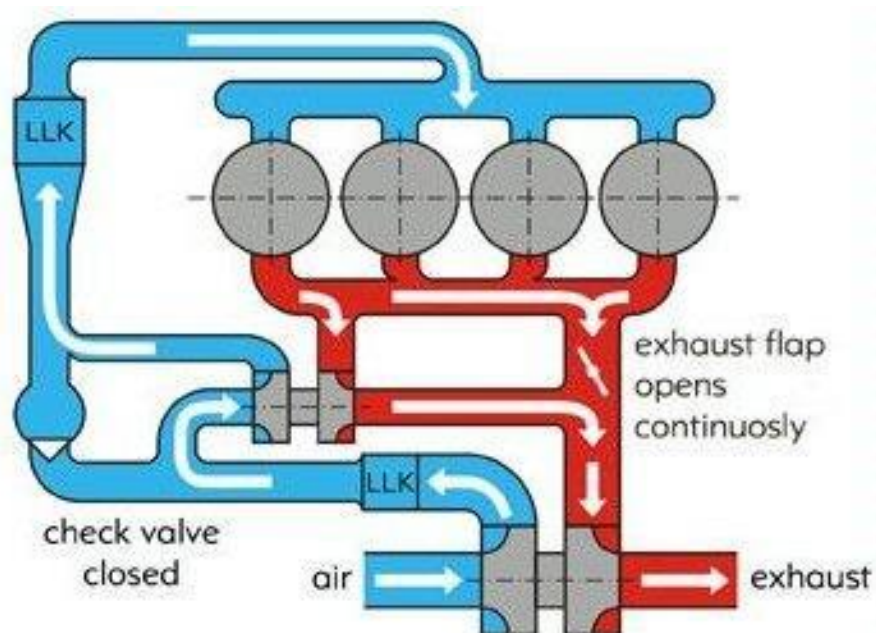


Рисунок 10 – Последовательный двухступенчатый турбокомпрессор

На рисунке 10 показана типичная структура последовательной двухступенчатой системы двигателя с турбонаддувом. Он имеет переключательный клапан и переключательный клапан. Турбокомпрессор высокого давления часто меньше, чем турбокомпрессор низкого давления. Регулируя путь впуска воздуха между двумя компрессорами, такую систему наддува можно применять к широкому спектру оригинальных карт для их оптимизации. Когда двигатель работает на низкой скорости, большая турбина обходит

клапан, и цель наддува может быть достигнута меньшей турбиной высокого давления, которая создает меньшую турбояму. По мере увеличения оборотов двигателя турбокомпрессоры высокого давления больше не могут создавать достаточное давление наддува, чтобы в действие приводилась большая турбина. Два турбонагнетателя работают вместе. Путь воздушного потока будет регулироваться для управления массовым расходом, проходящим через эти две турбины, в зависимости от частоты вращения двигателя и требований к нагрузке. Когда обороты двигателя достаточно высоки, маленькая турбина обходится, и эта большая турбина будет работать одна для высокого давления наддува. Таким образом, последовательный турбокомпрессор может обеспечить хорошую производительность как на низких, так и на высоких оборотах двигателя. Однако есть исследования, показывающие, что эта система недостаточно хороша, для этой системы нужны дополнительные турбокомпрессоры и промежуточные охладители, которые значительно увеличат стоимость и производственные трудности.

В большинстве рабочих точек энергия выхлопных газов распределяется между двумя турбинами, что негативно влияет на переходные характеристики. Чжан [29] изучил серийно установленный твин-турбо на 2,2-литровом дизельном двигателе как в моделировании, так и в экспериментах. Результаты показывают, что скорость переходного процесса при повышении крутящего момента на 50% выше, чем у нового турбокомпрессора при 1000 об/мин, а также имеет дополнительные преимущества в снижении выбросов, но методология управления сложна для разработки между двумя турбокомпрессорами. Солнье [26] смоделировал переходную характеристику двухступенчатого дизельного двигателя с турбонаддувом объемом 1,5 л, используя различные варианты согласования турбонагнетателя. Однако результаты показывают, что по сравнению с 2,0-литровым одноступенчатым дизельным двигателем с турбонаддувом этот двигатель имеет худшую переходную характеристику в области низких оборотов и нагрузки даже при оптимально подобранных турбонагнетателях. Причина в том, что

двухступенчатые турбокомпрессоры не могут удовлетворить требованиям ни по высокой скорости, ни по низкой переходной характеристике, поэтому исследователи посоветовали использовать электрический турбокомпрессор или компрессор, который имеет лучшую переходную характеристику.

По сравнению с традиционными турбокомпрессорами как VGT, так и многоступенчатые турбокомпрессоры могут уменьшить турбозадержку и расширить область высокой производительности турбокомпрессора. Однако они имеют сложную механическую конструкцию, что снижает надежность системы наддува и значительно увеличивает трудоемкость и стоимость изготовления. Основное преимущество VGT заключается в том, что он устраняет дилемму между переходными характеристиками и номинальной энергоэффективностью за счет изменения эффективной площади турбины. Он «экстраполирует» карту турбокомпрессора во время работы. Однако этот метод имеет ограниченное применение. Турбокомпрессоры VGT имеют большой размер, они должны соответствовать требованиям к крутящему моменту на высоких скоростях и иметь большую инерцию. Кроме того, в условиях низкой скорости и низкой нагрузки VGT могут уменьшить переходную характеристику, но не очень сильно из-за отсутствия газа. VGT также трудно применять на бензиновом двигателе, потому что выхлоп бензинового двигателя имеет более высокую температуру, что затрудняет для промышленности поиск подходящего материала для изготовления устройства. Двойные турбокомпрессоры — еще один способ найти компромисс между переходной характеристикой и эффективностью мощности; однако они намного дороже, чем другие технологии.

Кроме того, проблемы согласования и управления очень важны в этом приложении. Без идеальной схемы согласования и управления двойные турбины могут работать хуже, чем новые турбокомпрессоры, а различные модули управления могут конфликтовать друг с другом или с основным контроллером ECU из-за нестабильной работы и чрезмерного количества контроллеров. Все эти системы с турбонаддувом по-прежнему в конечном

итоге ограничены доступной энергией выхлопных газов из-за их конструкции, основанной только на турбонагнетателе, что приведет к увеличению проблем переходных характеристик в приложениях с высоким наддувом. Однако в настоящее время нормы выбросов намного строже, и для сокращения выбросов требуется, чтобы двигатели внутреннего сгорания были значительно уменьшены. Более того, требования клиентов никогда не снижаются. Ни управляемость, ни безопасность никогда не могут быть принесены в жертву и даже должны быть улучшены. Технологии электрического повышения мощности были внедрены в эту область из-за быстрого развития электродвигателей и аккумуляторов за последние несколько десятилетий, и электрификация автомобильной техники стала неумолимой тенденцией.

Выводы по первому разделу

Проведенный обзор современного состояния двигателей с турбонаддувом показал значительные возможности улучшения характеристик двигателя за счет использования современных технологий регулирования и согласования работы турбокомпрессора и двигателя.

Одним из перспективных направлений развития турбонаддува является применение бустерной системы с небольшим электрическим нагнетателем, что позволяет компенсировать потери производительности на малых частотах вращения и резком разгоне. Также активно развивается направление даунсайзинг – показывающее возможности применения малолитражных двигателей с турбонаддувом в городских автомобилях, где мощностные показатели требуются только на стадии разгона.

2 Тепловой расчет проектируемого двигателя

По результатам обзора технологий и аналогов выбран прототип малолитражного двигателя Honda CBR600RR с последующей установкой на него регулируемого турбонаддува и имеющий все основания считаться примером даунсайзинга силовой установки для автомобилей малого класса.

Основные параметры двигателя Honda CBR600RR приведены в таблице 1, а общий вид Honda CBR600RR представлен на рисунке 11 [24].



Рисунок 11 – Двигатель Honda CBR600RR выбранного как прототип для дальнейшей проработки

Таблица 1 – Технические параметры двигателя Honda CBR600RR выбранного как прототип для дальнейшей проработки

Параметры	Характеристики
Мощность, кВт/ мин ⁻¹	57,4/12000
Кол-во цилиндров, тип ГБЦ	4, DOHC
Диаметр × Ход поршня, мм	67,0 × 42,5
Объем цилиндров, cc	599
Крут. момент, Н м/мин ⁻¹	52/10000
Степень сжатия	12,20
Длина шатуна, мм	109
Порядок работы цилиндров	1-3-4-2
Минимальная частота вращения коленчатого вала при режиме холостого хода, мин ⁻¹	1400

Тепловой расчет производится по методике И.И. Вибе, для двигателя с турбонаддувом и степенью повышения давления 1,4, 1,6 и 1,8, с учетом рекомендаций по расчету основных параметров, предложенных в учебниках [2,5]. Результаты расчета представлены в виде таблиц и графиков.

Так как при изменении скоростного режима при работе на внешней скоростной характеристике максимальный коэффициент избытка воздуха ограничен 1 в связи с требованиями к токсичности отработавших газов, то результаты расчета параметров рабочего тела проводятся (таблица 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 _{CO₂} , кмоль CO ₂ /кг топл.	M _{H₂O} , кмоль H ₂ O/кг топл.	M _{N₂} , кмоль N ₂ /кг топл.	M ₂ , кмоль пр.сг./кг топл.	μ 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 ⁻¹	Δp _a , МПа	p _a , МПа	T _г , К	p _г , МПа	γ _г	T _a , К	η _v	V _a , м ³ /кг	ω _{вп} , М/с
Базовый двигатель Honda CBR600RR									
1400	6E-05	0,0999387	1020	0,103697	0,026835	300,8851	0,991597	0,8255	6,18419
3800	0,0005	0,0995481	1040	0,104954	0,026834	305,0589	0,984356	0,8402	16,7857
6000	0,0011	0,0988733	1065	0,107125	0,02702	309,1971	0,974366	0,8574	26,5037
10000	0,0031	0,0968702	1100	0,113569	0,028514	317,3416	0,94773	0,8982	44,1728
12000	0,0045	0,0954931	1130	0,118	0,030071	322,4341	0,908931	0,9258	53,0074
Двигатель с наддувом Пк = 1,4									
840	8E-05	0,1399237	1130	0,146076	0,028589	352,3586	0,951984	0,6905	6,18419
2000	0,0006	0,1394381	1145	0,153562	0,029585	353,5414	0,954432	0,6952	16,7857
3800	0,0014	0,1385993	1170	0,166495	0,031516	355,7873	0,950636	0,7038	26,5037
5400	0,0038	0,1361548	1270	0,204886	0,036574	363,288	0,928701	0,7316	43,9123
6000	0,0056	0,134397	1330	0,23128	0,041242	369,7296	0,887734	0,7543	53,0074
Двигатель с наддувом Пк = 1,6									
840	8E-05	0,1599168	1150	0,167458	0,029526	368,8779	0,951723	0,6325	6,18419
2000	0,0006	0,159387	1185	0,179286	0,030652	370,7726	0,952511	0,6378	16,7857
3800	0,0015	0,1584718	1230	0,19972	0,033128	374,1669	0,945853	0,6474	26,5037
5400	0,0042	0,1557549	1355	0,260378	0,040524	385,1178	0,915085	0,6779	44,1728
6000	0,00611	0,1538871	1430	0,30208	0,046931	394,4158	0,868621	0,7027	53,0074
Двигатель с наддувом Пк = 1,8									
840	9E-05	0,1799101	1185	0,188968	0,029942	384,138	0,951458	0,5854	6,18419
2000	0,0007	0,1793379	1215	0,205956	0,031858	386,5514	0,950559	0,591	16,7857
3800	0,0017	0,1783492	1270	0,235305	0,035176	391,0754	0,940991	0,6012	26,5037
5400	0,0046	0,1754145	1430	0,322425	0,044677	405,9112	0,901603	0,6345	44,1728
6000	0,00660	0,1733969	1540	0,38232	0,052228	418,7207	0,84919	0,6621	53,0074

Результата расчета параметров в конце сжатия и начала воспламенения показаны в таблице 4. Видно 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 ⁻¹	μ	n_l	Угол опережения зажигания, ° ПКВ	V_y , м ³ /кг	P_y , МПа	T_y , К
Базовый двигатель Honda CBR600RR						
840	1,051062	1,3775	20	0,094839	1,966661	680,2609
2000	1,0510621	1,3771	24	0,108443	1,665218	658,6136
3800	1,051053	1,3766	28	0,124823	1,401976	638,2553
5400	1,05098	1,3758	32	0,147588	1,162998	626,023
6000	1,050902	1,37524	35	0,166406	1,013235	614,9479
Двигатель с наддувом $P_k = 1,4$						
840	1,050975	1,3724	18	0,075059	2,938542	804,4392
2000	1,050926	1,3723	22	0,084589	2,508819	774,0001
3800	1,05083	1,3721	26	0,096451	2,118466	745,2249
5400	1,050582	1,3714	30	0,111708	1,790651	729,5457
6000	1,050355	1,370744	32	0,12394	1,596434	721,6389
Двигатель с наддувом $P_k = 1,6$						
840	1,0509286	1,3708	16	0,065238	3,594471	855,2546
2000	1,050873	1,3706	20	0,073278	3,090714	826,0235
3800	1,050751	1,3703	25	0,086087	2,514034	789,3437
5400	1,05039	1,3692	27	0,095751	2,27516	794,5341
6000	1,050082	1,368422	29	0,105452	2,06099	792,6655
Двигатель с наддувом $P_k = 1,8$						
840	1,050908	1,3694	13	0,056199	4,439428	909,9476
2000	1,050813	1,3692	17	0,062557	3,871544	883,3202
3800	1,0506506	1,3687	22	0,073155	3,188706	850,7791
5400	1,05019	1,3674	25	0,08437	2,766024	851,1443
6000	,049829767	1,366164	27	0,093513	2,513108	857,123

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 наддуве.

Таблица 5 – Коэффициенты термодинамического расчета

n , мин ⁻¹	ξ	q_z , Дж/кг	E_2 , МПа	φ_z , град, пкв.	m
Базовый двигатель Honda CBR600RR					
840	0,86	2305,8	68,154942	50	3
2000	0,88	2359,4	68,51699	56	3
3800	0,9	2412,6	68,655254	62	3
5400	0,9	2409,1	65,442859	68	3
6000	0,91	2432,161	64,102055	75	3
Двигатель с наддувом $P_k = 1,4$					
840	0,90	2408,9	85,128272	47	2,9
2000	0,90	2406,6	84,46728	53	2,9
3800	0,90	2402,1	83,272896	59	2,9
5400	0,90	2390,3	79,72437	65	2,9
6000	0,90	2379,627	76,977383	71	2,9
Двигатель с наддувом $P_k = 1,6$					
840	0,90	2406,7	92,850329	44	2,8
2000	0,90	2404,1	91,969195	50	2,8
3800	0,90	2398,3	90,394418	55	2,8
5400	0,90	2381,3	85,704872	61	2,8
6000	0,90	2366,696	82,174879	66	2,8
Двигатель с наддувом $P_k = 1,8$					
840	0,90	2405,7	100,26857	39	2,7
2000	0,90	2401,3	99,141145	46	2,7
3800	0,90	2393,6	97,141745	50	2,7
5400	0,90	2371,8	91,214067	56	2,7
6000	0,90	2354,782	86,779313	60	2,7

Анализ результатов расчета индикаторных показателей рабочего цикла (таблица 6) показал, значительное улучшение мощностных показателей с применением наддува. Также следует отметить рост среднего индикаторного давления при увеличении степени повышения давления.

Таблица 6 – Результаты расчета индикаторных показателей рабочего цикла

n , мин ⁻¹	L_i , кДж	P_i , Мпа	N_i , кВт	η_i	g_i , г/кВт ч
Базовый двигатель Honda CBR600RR					
840	1,2940757	1,707628	11,94066	0,502103	163,2124
2000	1,3190165	1,710015	32,45569	0,506504	161,7944
3800	1,3393134	1,701479	50,98999	0,509142	160,9559
5400	1,3358293	1,619999	80,91369	0,498385	164,43
6000	1,3318887	1,56711	93,92645	0,502694	163,0206
Двигатель с наддувом $P_k = 1,4$					
840	1,3789713	2,175517	15,2124	0,535957	152,9031
2000	1,3645771	2,13816	40,58176	0,525403	155,9746
3800	1,3518858	2,092239	62,7003	0,516172	158,764
5400	1,3306706	1,981314	98,96016	0,500351	163,784
6000	1,3150855	1,899154	113,8279	0,501735	163,3322

Продолжение таблицы 6

Двигатель с наддувом $P_k = 1,6$					
840	1,4068905	2,423106	16,94368	0,547306	149,7324
2000	1,3735739	2,345838	44,52345	0,529415	154,7924
3800	1,3897421	2,338415	70,07771	0,531455	154,1984
5400	1,3625991	2,189359	109,3514	0,514309	159,339
6000	1,3164847	2,040631	122,3074	0,505013	162,272
Двигатель с наддувом $P_k = 1,8$					
840	1,4081373	2,620077	18,321	0,548013	149,5394
2000	1,387171	2,556792	48,52731	0,535282	153,096
3800	1,3982867	2,533423	75,92173	0,535782	152,953
5400	1,3558773	2,327853	116,2687	0,513814	159,4924
6000	1,3462268	2,214806	132,7468	0,519035	157,888

Анализ результатов расчета эффективных показателей рабочего цикла (таблица 7) показал, что все эффекты, которые мы наблюдали у индикаторных показателей при увеличении степени повышения давления, также присутствуют и у эффективных показателей работы двигателя.

Таблица 7 – Результаты расчета эффективных показателей рабочего цикла

n, мин ⁻¹	$V_{п.ср}$, м/с	P_m , Мпа	P_e , Мпа	η_m	η_e	g_e , г/(кВт.ч)	N_e , кВт	M_e , Н.м	G_T , кг/ч
Базовый двигатель Honda CBR600RR									
840	1,9833	0,1124	1,5952	0,93418	0,46905	174,71268	11,1547	76,08523	1,94886
2000	5,3833	0,1525	1,5575	0,91081	0,46133	177,63872	29,5608	74,28556	5,25115
3800	8,5	0,1893	1,5122	0,88874	0,4525	181,10498	45,317	72,1243	8,20714
5400	14,167	0,2562	1,3638	0,84187	0,41958	195,31465	68,119	65,04885	13,3046
6000	17	0,2896	1,2775	0,8152	0,4098	199,97585	76,569	60,93164	15,3119
Двигатель с наддувом $P_k = 1,4$									
840	1,9833	0,1124	2,0631	0,94833	0,50827	161,23358	14,4264	98,4015	2,32602
2000	5,3833	0,1525	1,9856	0,92867	0,48792	167,95549	37,6869	94,70616	6,32972
3800	8,5	0,1893	1,9029	0,90952	0,46947	174,55753	57,0274	90,76185	9,95455
5400	14,167	0,2562	1,7251	0,87071	0,45727	188,10427	86,1655	82,28196	16,2081
6000	17	0,2896	1,6096	0,84751	0,42523	192,71984	96,4704	76,76868	18,5918
Двигатель с наддувом $P_k = 1,6$									
840	1,9833	0,1124	2,3107	0,95361	0,52192	157,01612	16,1577	110,2104	2,53702
2000	5,3833	0,1525	2,1933	0,93498	0,49499	165,55672	41,6286	104,6115	6,89189
3800	8,5	0,1893	2,1491	0,91905	0,48843	167,78061	64,4048	102,5034	10,8059
5400	14,167	0,2562	1,9332	0,88299	0,45413	180,45297	96,5567	92,20482	17,4239
6000	17	0,2896	1,751	0,85808	0,43334	189,10983	104,95	83,51651	19,8471
Двигатель с наддувом $P_k = 1,8$									
840	1,9833	0,1124	2,5077	0,9571	0,5245	156,24229	17,535	119,6051	2,73971
2000	5,3833	0,1525	2,4043	0,94035	0,50335	162,80819	45,6325	114,6731	7,42934
3800	8,5	0,1893	2,3441	0,92528	0,49575	165,3047	70,2488	111,8044	11,6125
5400	14,167	0,2562	2,0717	0,88996	0,45727	179,21381	103,474	98,81037	18,544
6000	17	0,2896	1,9252	0,86924	0,45117	181,63842	115,389	91,82393	20,9591

Анализ результатов расчета теплового баланса (таблица 8) показал, снижение тепловых потерь с в систему охлаждения примерно на 1 – 2 % на при наддуве за счет повышения энергоемкости заряда и наличие инерционности тепловых потоков в стенке камеры сгорания.

Таблица 8 – Результаты расчета теплового баланса

n , мин ⁻¹	Q_0 , Дж/с	Q_e , Дж/с	q_e , %	Q_B , Дж/с	q_B , %	Q_r , Дж/с	q_r , %	$Q_{ост}$, Дж/с	$q_{ост}$, %
Базовый двигатель Honda CBR600RR									
840	23781	11155	46,905	5622,55	23,6428	7052,6977	29,6565	-48,6489	-0,20457
2000	64078	29561	46,133	15468,9	24,1407	19575,963	30,5503	-527,783	-0,82366
3800	100149	45317	45,25	25270,8	25,2332	31720,556	31,6734	-2159,58	-2,15637
5400	162352	68119	41,958	43316,4	26,6806	53993,232	33,257	-3076,95	-1,89524
6000	186846	76569	40,98	49392,7	26,435	64694,671	34,6246	-3810,25	-2,03924
Двигатель с наддувом $P_k = 1,4$									
840	28384	14426	50,827	7689,52	27,0914	9827,7043	34,6246	-12,5425	-12,5425
2000	77239	37687	48,792	21582,2	27,9421	27274,709	35,312	-12,0464	-12,0464
3800	121472	57027	46,947	25270,8	20,8038	44292,114	36,4629	-4,21366	-4,21366
5400	197781	86165	43,566	30451,6	15,3966	81352,749	41,1326	-0,0952	-0,0952
6000	226868	96470	42,523	34596,8	15,2497	99788,698	43,9853	-1,7576	-1,7576
Двигатель с наддувом $P_k = 1,6$									
840	30958	16158	52,192	8992,53	29,0472	10002,801	32,3106	-4194,71	-13,5495
2000	84099	41629	49,499	25492,7	30,3126	28407,661	33,7787	-11429,7	-13,5907
3800	131860	64405	48,843	35581,5	26,9843	47052,538	35,6837	-15178,7	-11,5112
5400	212618	96557	45,413	43316,4	20,3729	87337,868	41,0774	-14592,9	-6,86345
6000	242187	104950	43,334	49392,7	20,3945	107496,15	44,3857	-19652,2	-8,11451
Двигатель с наддувом $P_k = 1,8$									
840	33432	17535	52,45	7689,52	23,0007	11292,805	33,7787	-3085,63	-9,22965
2000	90658	45632	50,335	21582,2	23,8064	31772,311	35,0465	-8329,5	-9,18787
3800	141703	70249	49,575	29986,2	21,1614	52987,287	37,3933	-11519,7	-8,12948
5400	226285	103474	45,727	36318,8	16,05	100438,27	44,3857	-13945,7	-6,16288
6000	255757	115389	45,117	34596,8	13,5272	126179,42	49,3357	-20408,8	-7,97977

Приведем основные термодинамические параметры работы двигателя по результатам теплового расчета в таблице 9, 10, 11 и 12 для частот вращения 1400, 3800, 6000 и 10000 мин⁻¹, соответственно.

Таблица 9 – Основные термодинамические параметры работы двигателя при частоте вращения 1400 мин⁻¹.

Угол ПКВ, град.	Объем цилиндра	P_i , базовый	P_i , с наддувом (30° C)	P_i , с наддувом (40° C)	P_i , с наддувом (50° C)
230	0,140766	0,122528181	0,171424353	0,195866207	0,220282318
231	0,139884	0,123593769	0,172909739	0,197561146	0,222185468
232	0,138986	0,124694302	0,174443787	0,19931159	0,224150916
233	0,138073	0,125830805	0,176027923	0,201119167	0,226180484

Продолжение таблицы 9

234	0,137146	0,12700435	0,177663637	0,202985574	0,228276078
235	0,136203	0,128216056	0,179352483	0,204912583	0,230439682
236	0,135246	0,12946709	0,181096082	0,206902042	0,232673369
237	0,134275	0,13075867	0,182896126	0,208955879	0,234979301
238	0,133289	0,132092066	0,184754381	0,211076106	0,237359734
239	0,132289	0,133468605	0,18667269	0,213264824	0,239817024
240	0,131276	0,134889673	0,188652977	0,215524225	0,242353628
241	0,130248	0,136356715	0,190697251	0,2178566	0,244972113
242	0,129208	0,137871241	0,192807609	0,220264338	0,247675159
243	0,128154	0,139434829	0,194986243	0,222749936	0,250465564
244	0,127087	0,141049128	0,19723544	0,225316001	0,253346253
245	0,126008	0,142715857	0,199557592	0,227965259	0,256320278
246	0,124915	0,144436818	0,201955197	0,230700556	0,259390832
247	0,123811	0,146213889	0,204430866	0,233524867	0,26256125
248	0,122695	0,148049039	0,206987329	0,236441303	0,265835017
249	0,121566	0,149944321	0,209627441	0,239453117	0,26921578
250	0,120427	0,151901888	0,212354187	0,24256371	0,27270735
251	0,119276	0,153923989	0,215170689	0,24577664	0,276313716
252	0,118114	0,156012978	0,218080217	0,24909563	0,280039051
253	0,116941	0,158171319	0,221086189	0,252524577	0,28388772
254	0,115758	0,160401592	0,224192186	0,256067559	0,287864294
255	0,114565	0,162706499	0,227401956	0,259728847	0,291973561
256	0,113362	0,165088868	0,230719427	0,263512913	0,296220531
257	0,112149	0,167551665	0,234148711	0,267424445	0,300610456
258	0,110927	0,170097998	0,23769412	0,271468353	0,305148839
259	0,109697	0,172731122	0,241360173	0,275649784	0,309841446
260	0,108458	0,175454454	0,245151606	0,279974135	0,314694325
261	0,10721	0,178271577	0,24907339	0,284447065	0,319713816
262	0,105955	0,181186248	0,253130737	0,289074513	0,324906573
263	0,104692	0,184202413	0,257329118	0,293862709	0,330279575
264	0,103422	0,187324213	0,261674275	0,298818193	0,335840149
265	0,102146	0,190555995	0,266172238	0,303947833	0,341595988
266	0,100862	0,193902328	0,27082934	0,309258841	0,347555171
267	0,099573	0,197368012	0,275652235	0,314758794	0,353726186
268	0,098278	0,20095809	0,280647914	0,320455654	0,360117951
269	0,096978	0,204677866	0,285823729	0,326357794	0,366739843
270	0,095672	0,208532916	0,29118741	0,332474015	0,373601719
271	0,094363	0,212529109	0,296747087	0,338813575	0,38071395
272	0,093049	0,216672619	0,302511316	0,345386217	0,388087444
273	0,091731	0,220969943	0,308489103	0,352202193	0,395733685
274	0,09041	0,225427927	0,314689928	0,359272298	0,403664758
275	0,089086	0,230053776	0,321123775	0,366607898	0,411893394
276	0,08776	0,234855086	0,327801163	0,37422097	0,420433001
277	0,086431	0,239839858	0,334733176	0,382124133	0,429297709
278	0,085101	0,245016531	0,3419315	0,390330687	0,438502409
279	0,08377	0,250394	0,349408452	0,398854656	0,448062802
280	0,082438	0,25598165	0,357177028	0,407710832	0,457995447
281	0,081106	0,261789384	0,365250936	0,416914819	0,468317812
282	0,079774	0,267827651	0,373644643	0,426483082	0,479048329
283	0,078442	0,274107485	0,382373419	0,436433004	0,490206454
284	0,077112	0,280640537	0,391453388	0,446782934	0,501812728
285	0,075783	0,287439111	0,400901581	0,457552255	0,513888842
286	0,074456	0,294516211	0,410735988	0,468761439	0,526457709

Продолжение таблицы 9

287	0,073132	0,301885576	0,420975616	0,480432118	0,539543539
288	0,071811	0,309561728	0,431640557	0,492587154	0,553171915
289	0,070492	0,317560023	0,442752049	0,505250713	0,567369879
290	0,069178	0,325896697	0,454332547	0,518448346	0,582166021
291	0,067868	0,334588922	0,466405796	0,53220707	0,59759057
292	0,066563	0,343654863	0,478996913	0,546555461	0,613675497
293	0,065264	0,353113737	0,492132466	0,561523743	0,630454618
294	0,06397	0,362985879	0,505840561	0,577143894	0,647963702
295	0,062682	0,373292804	0,520150936	0,59344974	0,666240592
296	0,061401	0,384057282	0,535095057	0,610477075	0,685325324
297	0,060128	0,395303407	0,550706217	0,628263768	0,705260253
298	0,058862	0,40705668	0,567019644	0,646849888	0,726090194
299	0,057604	0,419344083	0,584072609	0,666277825	0,747862555
300	0,056355	0,432194165	0,601904545	0,686592424	0,770627483
301	0,055116	0,445637132	0,620557161	0,707841117	0,79443802
302	0,053886	0,45970493	0,640074566	0,730074066	0,819350249
303	0,052666	0,474431341	0,660503396	0,753344298	0,84542346
304	0,051456	0,489852076	0,681892943	0,777707858	0,872720309
305	0,050258	0,506004867	0,704295277	0,80322395	0,901306979
306	0,049072	0,522929565	0,727765386	0,829955087	0,931253349
307	0,047897	0,540668231	0,752361295	0,857967234	0,962633147
308	0,046735	0,559265226	0,778144193	0,887329948	0,995524114
309	0,045586	0,578767303	0,805178554	0,918116513	1,030008147
310	0,044451	0,599223681	0,833532243	0,950404064	1,066171441
311	0,043329	0,62068612	0,863276613	0,984273695	1,104104606
312	0,042222	0,643208983	0,894486589	1,019810552	1,143902771
313	0,04113	0,666849274	0,927240721	1,057103894	1,185665652
314	0,040053	0,691666665	0,961621216	1,096247129	1,22949759
315	0,038991	0,717723495	0,997713935	1,137337808	1,275507539
316	0,037946	0,745084731	1,035608338	1,180477564	1,323809004
317	0,036918	0,7738179	1,075397387	1,225771994	1,374519904
318	0,035906	0,803992968	1,117177372	1,273330469	1,427762355
319	0,034912	0,835682158	1,161047663	1,323265845	1,483662348
320	0,033936	0,868959709	1,20711037	1,375694076	1,542349317
321	0,032978	0,903901544	1,255469884	1,430733693	1,60395555
322	0,032039	0,940584848	1,306232292	1,488505135	1,668615441
323	0,031119	0,979087531	1,359504631	1,5491299	1,736464545
324	0,030219	1,019487563	1,415393966	1,612729501	1,8076384
325	0,029338	1,061862151	1,474006264	1,679424175	1,882271089
326	0,028478	1,106286757	1,535445019	1,749331328	1,960493501
327	0,027638	1,152833904	1,599809619	1,822563675	2,042431249
328	0,026819	1,201571778	1,66719341	1,899227037	2,128202209
329	0,026022	1,252562572	1,737681415	1,979417753	2,217913625
330	0,025246	1,305860575	1,811347696	2,063219677	2,311658759
331	0,024492	1,361509956	1,888252309	2,150700723	2,409513028
332	0,023761	1,419542254	1,968437838	2,241908921	2,5115296
333	0,023053	1,47997353	2,051925484	2,336867983	2,617734444
334	0,022367	1,542801204	2,138710707	2,435572345	2,728120791
335	0,021705	1,608000056	2,22875842	2,537981716	2,842643058
336	0,021066	1,675520953	2,32199778	2,644015161	2,961210235
337	0,020451	1,745281759	2,418316614	2,753544774	3,083678831
338	0,01986	1,817168116	2,517555576	2,866389044	3,209845474
339	0,019294	1,891026563	2,619502161	2,982306067	3,339439336

Продолжение таблицы 9

340	0,018752	1,9666607	2,723884743	3,100986777	3,472114587
341	0,018235	2,043652653	2,830366856	3,222048459	3,607443171
342	0,017743	2,122334493	2,93854199	3,345028854	3,744908225
343	0,017277	2,203048018	3,046713702	3,469381207	3,883898575
344	0,016836	2,286409041	3,156269152	3,594470696	4,023704761
345	0,016421	2,373331131	3,267686591	3,717909148	4,163517113
346	0,016032	2,46504169	3,381888417	3,84168717	4,302426423
347	0,015669	2,563086075	3,500276041	3,96653807	4,439427749
348	0,015332	2,669315124	3,624749767	4,093862095	4,571618941
349	0,015021	2,785851644	3,757706254	4,225767621	4,701908344
350	0,014737	2,915032331	3,902005751	4,365084265	4,832025765
351	0,01448	3,059323407	4,060901953	4,515335895	4,96495715
352	0,014249	3,221210675	4,23792942	4,680661656	5,104972452
353	0,014046	3,403067486	4,436747027	4,865675352	5,257578887
354	0,013869	3,607006614	4,660940533	5,075258342	5,429374285
355	0,013719	3,834723825	4,913792328	5,314288245	5,627779334
356	0,013597	4,087341772	5,198030672	5,587314038	5,860638311
357	0,013501	4,365262841	5,515573544	5,898195876	6,135694771
358	0,013433	4,668039179	5,86728326	6,249733358	6,45996874
359	0,013392	4,994267714	6,252747725	6,643308078	6,839079603
360	0,013379	5,341517815	6,670103332	7,078565745	7,276569209
361	0,013392	5,706299136	7,115913651	7,553161318	7,773281054
362	0,013433	6,084076862	7,585117397	8,062588923	8,326847121
363	0,013501	6,469340474	8,071058096	8,600117227	8,931329256
364	0,013597	6,855730067	8,565605752	9,15684957	9,577060123
365	0,013719	7,23622094	9,0593768	9,721924819	10,25072811
366	0,013869	7,603362852	9,542052432	10,28286818	10,93574582
367	0,014046	7,949565354	10,00278719	10,82609025	11,61292716
368	0,014249	8,267415466	10,43069024	11,33751795	12,26147016
369	0,01448	8,550009419	10,81535209	11,80332422	12,86020341
370	0,014737	8,791276714	11,14738122	12,2107065	13,38900764
371	0,015021	8,986273126	11,41890937	12,54865108	13,83028081
372	0,015332	9,131419806	11,62402255	12,8086125	14,17028406
373	0,015669	9,224668551	11,75907798	12,98503865	14,40019804
374	0,016032	9,2655786	11,82287552	13,07568283	14,51674007
375	0,016421	9,255297475	11,81666467	13,08166431	14,52224456
376	0,016836	9,196446865	11,74398478	13,00726681	14,42418499
377	0,017277	9,092923283	11,61035343	12,85949569	14,23420315
378	0,017743	8,949631215	11,42283422	12,64744451	13,96679054
379	0,018235	8,772172601	11,18952818	12,38154531	13,63782047
380	0,018752	8,566519919	10,91903976	12,07278893	13,26314242
381	0,019294	8,338700365	10,61996847	11,73200012	12,8574206
382	0,01986	8,094515554	10,30047046	11,36923792	12,43333413
383	0,020451	7,839315439	9,967921539	10,9933665	12,00117563
384	0,021066	7,577837552	9,628697733	10,61181298	11,56880881
385	0,021705	7,314114512	9,288072903	10,23049996	11,14189327
386	0,022367	7,051445209	8,950219462	9,85391983	10,72426285
387	0,023053	6,79241924	8,618288496	9,485305509	10,34899463
388	0,023761	6,538980584	8,294541463	9,12685106	9,985880784
389	0,024492	6,292515472	7,980506382	8,806014744	9,635091598
390	0,025246	6,053950451	7,699715517	8,496515354	9,296689148
391	0,026022	5,84077476	7,429195164	8,198324743	8,970643295
392	0,026819	5,635637659	7,16885455	7,91134377	8,656846276

Продолжение таблицы 9

393	0,027638	5,438424121	6,918549409	7,635414321	8,355125844
394	0,028478	5,248984675	6,678091732	7,370330045	8,065256994
395	0,029338	5,067142204	6,447258378	7,115845842	7,786972334
396	0,030219	4,892697905	6,225798624	6,871686174	7,519971168
397	0,031119	4,725436468	6,013440724	6,637552289	7,263927394
398	0,032039	4,565130527	5,809897561	6,413128456	7,018496311
399	0,032978	4,411544484	5,614871485	6,198087287	6,783320442
400	0,033936	4,264437732	5,428058411	5,992094256	6,558034479
401	0,034912	4,123567377	5,249151264	5,794811498	6,342269427
402	0,035906	3,988690496	5,077842852	5,605900975	6,135656075
403	0,036918	3,859566	4,91382823	5,425027081	5,937827838
404	0,037946	3,735956151	4,756806625	5,251858769	5,748423088
405	0,038991	3,617627772	4,60648298	5,086071254	5,567087015
406	0,040053	3,504353213	4,462569177	4,927347358	5,393473103
407	0,04113	3,395911079	4,324784974	4,775378552	5,227244263
408	0,042222	3,292086791	4,192858707	4,629865726	5,068073687
409	0,043329	3,192672967	4,066527792	4,490519751	4,915645452
410	0,044451	3,097469693	3,945539063	4,357061843	4,769654931
411	0,045586	3,006284665	3,829648961	4,229223786	4,629809029
412	0,046735	2,918933252	3,718623615	4,106748017	4,495826283
413	0,047897	2,835238481	3,612238829	3,98938761	4,367436844
414	0,049072	2,755030959	3,510279983	3,876906175	4,244382369
415	0,050258	2,678148749	3,412541884	3,769077695	4,12641584
416	0,051456	2,60443721	3,318828561	3,665686298	4,013301321
417	0,052666	2,533748803	3,228953026	3,566525995	3,90481367
418	0,053886	2,465942879	3,142737002	3,471400389	3,800738223
419	0,055116	2,400885448	3,060010641	3,380122354	3,700870442
420	0,056355	2,338448939	2,980612213	3,292513704	3,605015555
421	0,057604	2,278511953	2,904387799	3,20840485	3,512988184
422	0,058862	2,220959011	2,831190974	3,127634453	3,424611961
423	0,060128	2,165680304	2,760882491	3,050049075	3,339719153
424	0,061401	2,112571444	2,693329962	2,975502834	3,258150283
425	0,062682	2,061533216	2,628407555	2,903857062	3,179753754
426	0,06397	2,01247134	2,565995684	2,834979971	3,10438549
427	0,065264	1,965296236	2,505980715	2,768746329	3,031908576
428	0,066563	1,919922796	2,448254679	2,705037141	2,962192913
429	0,067868	1,876270163	2,392714993	2,643739345	2,895114889
430	0,069178	1,834261523	2,339264194	2,584745517	2,830557048
431	0,070492	1,793823896	2,287809679	2,527953585	2,768407789
432	0,071811	1,754887945	2,238263462	2,473266565	2,708561068
433	0,073132	1,717387789	2,190541932	2,420592293	2,650916109
434	0,074456	1,681260823	2,144565635	2,369843181	2,595377138
435	0,075783	1,646447548	2,100259053	2,320935977	2,541853124
436	0,077112	1,612891413	2,057550399	2,273791546	2,490257529
437	0,078442	1,580538654	2,016371429	2,228334648	2,440508078
438	0,079774	1,549338155	1,97665725	2,184493739	2,392526534
439	0,081106	1,519241305	1,938346144	2,142200776	2,346238487
440	0,082438	1,490201869	1,901379409	2,101391033	2,301573154
441	0,08377	1,462175858	1,865701192	2,062002929	2,258463188
442	0,085101	1,435121418	1,831258343	2,023977859	2,216844499
443	0,086431	1,408998712	1,798000277	1,987260043	2,176656081
444	0,08776	1,383769819	1,765878831	1,951796374	2,137839854
445	0,089086	1,359398629	1,734848146	1,917536282	2,100340508

Продолжение таблицы 9

446	0,09041	1,335850751	1,70486454	1,884431596	2,06410536
447	0,091731	1,313093423	1,675886401	1,852436427	2,029084218
448	0,093049	1,291095427	1,647874073	1,821507042	1,995229248
449	0,094363	1,26982701	1,620789758	1,791601755	1,962494859
450	0,095672	1,249259805	1,594597419	1,762680823	1,930837578
451	0,096978	1,229366763	1,569262692	1,734706345	1,900215948
452	0,098278	1,210122084	1,544752797	1,707642165	1,870590423
453	0,099573	1,191501151	1,521036456	1,681453788	1,841923269
454	0,100862	1,173480476	1,49808382	1,65610829	1,814178473
455	0,102146	1,156037634	1,475866396	1,631574242	1,787321654
456	0,103422	1,139151216	1,454356977	1,607821634	1,761319985
457	0,104692	1,122800775	1,433529577	1,584821801	1,736142111
458	0,105955	1,106966778	1,413359371	1,56254736	1,711758074
459	0,10721	1,091630563	1,39382264	1,540972145	1,688139251
460	0,108458	1,076774291	1,37489671	1,520071143	1,66525828
461	0,109697	1,06238091	1,356559904	1,499820443	1,643089
462	0,110927	1,048434114	1,338791496	1,480197177	1,621606397
463	0,112149	1,034918306	1,321571659	1,461179474	1,600786541
464	0,113362	1,021818566	1,304881425	1,442746406	1,580606538
465	0,114565	1,009120617	1,288702643	1,424877947	1,56104448
466	0,115758	0,996810793	1,273017939	1,40755493	1,542079394
467	0,116941	0,984876013	1,257810679	1,390759003	1,523691203
468	0,118114	0,97330375	1,243064935	1,37447259	1,50586068
469	0,119276	0,962082005	1,228765452	1,358678861	1,488569407
470	0,120427	0,951199286	1,214897614	1,343361688	1,471799741
471	0,121566	0,94064458	1,201447417	1,32850562	1,455534775
472	0,122695	0,930407333	1,18840144	1,314095846	1,439758306
473	0,123811	0,920477429	1,175746817	1,30011817	1,4244548
474	0,124915	0,910845169	1,163471213	1,286558981	1,409609364
475	0,126008	0,901501252	1,151562799	1,273405225	1,395207716
476	0,127087	0,892436761	1,14001023	1,260644385	1,381236157
477	0,128154	0,883643137	1,128802624	1,248264449	1,367681547
478	0,129208	0,875112174	1,11792954	1,236253896	1,354531278
479	0,130248	0,866835995	1,107380957	1,224601669	1,34177325
480	0,131276	0,85880704	1,097147261	1,213297157	1,329395853
481	0,132289	0,851018056	1,087219222	1,202330173	1,31738794
482	0,133289	0,843462078	1,077587981	1,191690939	1,305738811
483	0,134275	0,836132419	1,06824503	1,181370068	1,294438195
484	0,135246	0,829022661	1,059182203	1,171358545	1,283476225
485	0,136203	0,822126638	1,050391656	1,161647714	1,27284343
486	0,137146	0,81543843	1,041865856	1,152229261	1,262530712
487	0,138073	0,808952352	1,033597569	1,143095201	1,252529332
488	0,138986	0,802662943	1,025579846	1,134237865	1,242830898
489	0,139884	0,796564958	1,017806013	1,125649885	1,233427347
490	0,140766	0,790653357	1,010269657	1,117324184	1,224310934
500	0,14872	0,740812541	0,946725293	1,047121507	1,147438989
510	0,155012	0,640812541	0,846725293	0,947121507	1,047438989

Таблица 10 – Основные термодинамические параметры работы двигателя при частоте вращения 3800 мин⁻¹.

Угол ПКВ, град.	Объем цилиндра	P _i , базовый	P _i , с наддувом (30° C)	P _i , с наддувом (40° C)	P _i , с наддувом (50° C)
230	0,140766	0,122029425	0,170829442	0,195217327	0,219581628
231	0,139884	0,123089824	0,172309674	0,196906651	0,221478726
232	0,138986	0,12418499	0,173838398	0,198651296	0,223437921
233	0,138073	0,125315943	0,175417037	0,200452884	0,225461034
234	0,137146	0,126483748	0,177047074	0,202313109	0,227549961
235	0,136203	0,127689519	0,178730059	0,204233734	0,229706683
236	0,135246	0,128934415	0,180467607	0,206216601	0,231933265
237	0,134275	0,130219648	0,182261404	0,208263634	0,234231862
238	0,133289	0,131546482	0,18411321	0,210376837	0,236604724
239	0,132289	0,132916234	0,186024862	0,212558304	0,239054197
240	0,131276	0,134330284	0,187998277	0,214810221	0,241582733
241	0,130248	0,135790069	0,190035456	0,217134869	0,244192889
242	0,129208	0,13729709	0,192138491	0,21953463	0,246887337
243	0,128154	0,138852916	0,194309564	0,222011993	0,249668866
244	0,127087	0,140459186	0,196550955	0,224569558	0,252540392
245	0,126008	0,142117611	0,198865048	0,227210039	0,255504957
246	0,124915	0,14382998	0,201254332	0,229936274	0,258565744
247	0,123811	0,145598163	0,20372141	0,232751228	0,261726077
248	0,122695	0,147424115	0,206269001	0,235658003	0,264989431
249	0,121566	0,149309881	0,208899951	0,238659839	0,26835944
250	0,120427	0,151257598	0,211617234	0,241760127	0,271839904
251	0,119276	0,153269502	0,214423962	0,244962413	0,275434799
252	0,118114	0,155347936	0,217323392	0,248270408	0,279148283
253	0,116941	0,157495348	0,220318932	0,251687995	0,28298471
254	0,115758	0,159714303	0,22341415	0,255219239	0,286948636
255	0,114565	0,162007487	0,226612782	0,258868398	0,291044831
256	0,113362	0,164377713	0,229918739	0,262639928	0,295278292
257	0,112149	0,166827928	0,233336123	0,266538502	0,299654254
258	0,110927	0,169361221	0,236869228	0,270569013	0,3041782
259	0,109697	0,171980829	0,240522558	0,274736591	0,308855881
260	0,108458	0,174690149	0,244300833	0,279046616	0,313693323
261	0,10721	0,177492741	0,248209007	0,283504728	0,318696849
262	0,105955	0,180392342	0,252252274	0,288116845	0,323873088
263	0,104692	0,183392872	0,256436084	0,292889178	0,329228999
264	0,103422	0,186498448	0,260766162	0,297828246	0,334771886
265	0,102146	0,189713392	0,265248516	0,302940892	0,340509416
266	0,100862	0,193042244	0,269889456	0,308234305	0,346449644
267	0,099573	0,196489774	0,274695613	0,313716037	0,352601029
268	0,098278	0,200060996	0,279673955	0,319394025	0,358972463
269	0,096978	0,203761181	0,284831808	0,325276612	0,365573291
270	0,095672	0,207595872	0,290176874	0,331372571	0,372413341
271	0,094363	0,211570899	0,295717257	0,337691129	0,379502949
272	0,093049	0,2156924	0,301461483	0,344241996	0,386852989
273	0,091731	0,219966833	0,307418524	0,351035392	0,394474908
274	0,09041	0,224400999	0,313597829	0,358082074	0,402380753
275	0,089086	0,22900206	0,320009348	0,365393373	0,410583215
276	0,08776	0,233777562	0,326663563	0,372981224	0,419095659
277	0,086431	0,238735459	0,333571152	0,380858204	0,427932169
278	0,085101	0,243884133	0,340744862	0,389037571	0,43710759

Продолжение таблицы 10

279	0,08377	0,249232427	0,348195867	0,397533301	0,446637573
280	0,082438	0,254789664	0,355937483	0,406360138	0,456538623
281	0,081106	0,260565684	0,363983371	0,415533633	0,466828154
282	0,079774	0,26657087	0,372347948	0,425070198	0,477524539
283	0,078442	0,272816185	0,381046432	0,434987156	0,488647172
284	0,077112	0,279313204	0,390094891	0,445302799	0,500216527
285	0,075783	0,286074154	0,399510295	0,456036442	0,512254229
286	0,074456	0,293111952	0,409310572	0,467208491	0,524783116
287	0,073132	0,300440248	0,419514665	0,478840507	0,537827322
288	0,071811	0,30807347	0,430142594	0,490955275	0,551412348
289	0,070492	0,316026872	0,441215525	0,503576881	0,56556515
290	0,069178	0,324316583	0,452755833	0,516730792	0,580314227
291	0,067868	0,332959663	0,464787184	0,530443935	0,595689713
292	0,066563	0,341974154	0,477334605	0,544744791	0,611723476
293	0,065264	0,351379146	0,490424572	0,559663486	0,628449225
294	0,06397	0,361194837	0,504085094	0,575231889	0,645902615
295	0,062682	0,371442598	0,518345807	0,591483716	0,664121369
296	0,061401	0,382145043	0,533238066	0,608454641	0,683145394
297	0,060128	0,393326105	0,548795049	0,626182409	0,703016913
298	0,058862	0,405011109	0,565051861	0,644706955	0,723780597
299	0,057604	0,417226852	0,582045646	0,66407053	0,745483702
300	0,056355	0,430001687	0,599815698	0,684317829	0,768176218
301	0,055116	0,44336561	0,618403582	0,705496129	0,791911016
302	0,053886	0,457350346	0,637853254	0,727655422	0,816744003
303	0,052666	0,47198944	0,658211189	0,750848563	0,842734279
304	0,051456	0,487318353	0,679526505	0,775131409	0,8699443
305	0,050258	0,503374549	0,701851095	0,80056297	0,89844004
306	0,049072	0,520197597	0,725239753	0,827205551	0,928291154
307	0,047897	0,537829257	0,749750304	0,855124897	0,959571137
308	0,046735	0,556313573	0,775443725	0,884390336	0,992357482
309	0,045586	0,575696959	0,802384266	0,915074909	1,026731826
310	0,044451	0,596028278	0,830639557	0,947255495	1,062780089
311	0,043329	0,617358912	0,860280703	0,98101292	1,100592594
312	0,042222	0,639742824	0,891382368	1,016432048	1,140264166
313	0,041113	0,663236598	0,924022829	1,053601842	1,181894205
314	0,040053	0,68789946	0,958284011	1,092615401	1,225586719
315	0,038991	0,713793283	0,994251473	1,133569951	1,271450317
316	0,037946	0,740982544	1,032014368	1,17656679	1,319598142
317	0,036918	0,769534257	1,071665334	1,221711166	1,370147737
318	0,035906	0,799517852	1,113300325	1,269112085	1,42322083
319	0,034912	0,831004993	1,157018369	1,318882032	1,478943013
320	0,033936	0,864069342	1,20292122	1,371136575	1,537443306
321	0,032978	0,898786224	1,251112908	1,425993853	1,598853578
322	0,032039	0,93523221	1,30169915	1,483573905	1,663307794
323	0,031119	0,973484585	1,354786613	1,543997828	1,730941079
324	0,030219	1,013620681	1,41048199	1,607386732	1,801888539
325	0,029338	1,05571707	1,46889088	1,673860454	1,876283831
326	0,028478	1,099848577	1,530116418	1,743536014	1,954257428
327	0,027638	1,146087103	1,594257648	1,816525751	2,035934544
328	0,026819	1,194500233	1,66140759	1,892935137	2,121432677
329	0,026022	1,245149594	1,731650974	1,972860192	2,210858733
330	0,025246	1,298088954	1,805061604	2,056384491	2,304305676
331	0,024492	1,353362029	1,881699328	2,143575722	2,401848683

Продолжение таблицы 10

332	0,023761	1,410999985	1,961606581	2,23448176	2,503540754
333	0,023053	1,471018618	2,044804493	2,329126234	2,609407774
334	0,022367	1,53341521	2,131288536	2,427503601	2,719442997
335	0,021705	1,598165065	2,221023748	2,529573702	2,833600984
336	0,021066	1,665217746	2,313939531	2,635255872	2,951791014
337	0,020451	1,734530492	2,4099241	2,744422627	3,073870053
338	0,01986	1,8061902	2,508818664	2,856893059	3,199635377
339	0,019294	1,880440827	2,609466941	2,972426063	3,328817017
340	0,018752	1,957679999	2,712877432	3,090713599	3,461070246
341	0,018235	2,038474681	2,819335314	3,209890847	3,595968368
342	0,017743	2,123574475	2,929359298	3,331495427	3,732996163
343	0,017277	2,213920691	3,043725203	3,455872003	3,871544403
344	0,016836	2,310649067	3,163485022	3,583703749	4,008890054
345	0,016421	2,415083758	3,289978366	3,716044212	4,147179308
346	0,016032	2,528720326	3,424832701	3,854340635	4,286926901
347	0,015669	2,653195699	3,569948556	4,000443695	4,429209652
348	0,015332	2,790243799	3,727466034	4,156598009	4,575709079
349	0,015021	2,941636429	3,89970966	4,325407679	4,728733937
350	0,014737	3,109110187	4,089109865	4,509771859	4,891213222
351	0,01448	3,294281344	4,298101148	4,712786921	5,066649746
352	0,014249	3,498551739	4,528999056	4,937614348	5,259025396
353	0,014046	3,723009535	4,783860231	5,187316685	5,47265188
354	0,013869	3,96832931	5,064331633	5,464667302	5,711965386
355	0,013719	4,234676246	5,371496427	5,77194284	5,98126959
356	0,013597	4,521619441	5,705724878	6,110709576	6,284437911
357	0,013501	4,828059468	6,066538963	6,481616247	6,624591674
358	0,013433	5,152175368	6,452499501	6,884206395	7,003774647
359	0,013392	5,491396174	6,861124375	7,316763101	7,422646089
360	0,013379	5,842401658	7,288846002	7,776198526	7,880214179
361	0,013392	6,201156168	7,73101537	8,257999848	8,373630396
362	0,013433	6,562978115	8,181958479	8,756241923	8,898063899
363	0,013501	6,922645783	8,635088841	9,263674877	9,446673191
364	0,013597	7,2745379	9,083076656	9,77189156	10,01068993
365	0,013719	7,61280484	9,518071512	10,27157519	10,57962568
366	0,013869	7,93156377	9,931971285	10,75282174	11,14160585
367	0,014046	8,225108751	10,3167256	11,2055249	11,68382593
368	0,014249	8,488124917	10,66465837	11,61980493	12,19311356
369	0,01448	8,715894762	10,96879081	11,98645647	12,65656746
370	0,014737	8,904484272	11,22314481	12,29738586	13,06223208
371	0,015021	9,050897338	11,42300606	12,54600668	13,39975753
372	0,015332	9,153188509	11,56512842	12,72756249	13,66098913
373	0,015669	9,210526674	11,64786426	12,83935006	13,84043199
374	0,016032	9,223205437	11,67121052	12,88082342	13,93554394
375	0,016421	9,192599607	11,63676685	12,85356856	13,94682466
376	0,016836	9,121071019	11,54760867	12,76115032	13,8776889
377	0,017277	9,011830485	11,40808536	12,60884436	13,73413501
378	0,017743	8,868765772	11,22355946	12,40327832	13,52424265
379	0,018235	8,696247701	11,00010767	12,15201416	13,25755317
380	0,018752	8,498927656	10,74420665	11,86310843	12,94439789
381	0,019294	8,281539768	10,46242712	11,54468755	12,5952425
382	0,01986	8,048719829	10,16115713	11,2045709	12,22010923
383	0,020451	7,804850777	9,846371396	10,84996698	11,82812281
384	0,021066	7,553941604	9,523457602	10,48725744	11,42720578

Продолжение таблицы 10

385	0,021705	7,299543141	9,197104232	10,12187298	11,0239267
386	0,022367	7,044700815	8,87124825	9,758254964	10,62348525
387	0,023053	6,791941444	8,549075709	9,399888556	10,22980418
388	0,023761	6,543288828	8,233064685	9,049388644	9,845691831
389	0,024492	6,300301427	7,925058032	8,708618241	9,473038813
390	0,025246	6,064124878	7,626353364	8,378820575	9,140121708
391	0,026022	5,835552379	7,337799008	8,084633269	8,819368139
392	0,026819	5,615086908	7,080435248	7,801509557	8,510671531
393	0,027638	5,418559185	6,833000092	7,529293094	8,213861875
394	0,028478	5,229779677	6,595307029	7,267779951	7,928717277
395	0,029338	5,048571787	6,367134835	7,016727977	7,654974155
396	0,030219	4,874737307	6,148235045	6,775865008	7,392336185
397	0,031119	4,708061583	5,938338434	6,544895993	7,140482073
398	0,032039	4,548317956	5,737160617	6,323509145	6,899072253
399	0,032978	4,395271562	5,544406824	6,111381193	6,667754619
400	0,033936	4,248682557	5,359775956	5,90818184	6,446169384
401	0,034912	4,108308817	5,18296399	5,713577518	6,233953166
402	0,035906	3,973908199	5,013666822	5,527234498	6,030742392
403	0,036918	3,84524039	4,851582597	5,348821474	5,836176103
404	0,037946	3,722068418	4,696413616	5,178011649	5,64989824
405	0,038991	3,604159867	4,54786786	5,014484421	5,471559477
406	0,040053	3,491287829	4,405660199	4,85792671	5,30081867
407	0,04113	3,383231635	4,269513311	4,70803398	5,13734397
408	0,042222	3,279777409	4,139158384	4,564511003	4,980813664
409	0,043329	3,180718456	4,014335602	4,427072408	4,830916766
410	0,044451	3,085855521	3,894794482	4,295443047	4,687353423
411	0,045586	2,99499694	3,780294058	4,169358203	4,549835142
412	0,046735	2,907958697	3,670602962	4,048563681	4,418084887
413	0,047897	2,824564407	3,565499405	3,93281579	4,291837064
414	0,049072	2,744645244	3,464771083	3,821881243	4,170837413
415	0,050258	2,668039816	3,368215025	3,715536992	4,054842825
416	0,051456	2,594594001	3,275637389	3,613570008	3,943621104
417	0,052666	2,524160757	3,186853228	3,515777017	3,836950688
418	0,053886	2,45659991	3,101686218	3,421964214	3,734620325
419	0,055116	2,391777923	3,019968375	3,331946948	3,636428738
420	0,056355	2,329567659	2,941539752	3,245549391	3,542184265
421	0,057604	2,26984813	2,866248132	3,162604201	3,451704491
422	0,058862	2,212504251	2,793948715	3,082952182	3,364815873
423	0,060128	2,157426587	2,724503801	3,006441935	3,281353367
424	0,061401	2,104511107	2,657782482	2,932929517	3,201160057
425	0,062682	2,053658936	2,593660332	2,862278109	3,124086785
426	0,06397	2,004776117	2,532019107	2,79435768	3,049991794
427	0,065264	1,957773379	2,472746453	2,729044669	2,978740376
428	0,066563	1,912565905	2,415735617	2,666221673	2,910204536
429	0,067868	1,869073119	2,360885179	2,605777141	2,844262656
430	0,069178	1,82721847	2,30809878	2,547605088	2,780799184
431	0,070492	1,786929232	2,257284871	2,491604814	2,719704328
432	0,071811	1,748136308	2,208356466	2,437680633	2,660873763
433	0,073132	1,710774044	2,161230913	2,38574162	2,604208351
434	0,074456	1,674780055	2,115829664	2,335701365	2,549613876
435	0,075783	1,640095048	2,07207807	2,287477738	2,497000789
436	0,077112	1,606662668	2,02990517	2,240992669	2,446283963
437	0,078442	1,57442934	1,989243506	2,196171933	2,397382466

Продолжение таблицы 10

438	0,079774	1,543344127	1,950028935	2,152944953	2,350219339
439	0,081106	1,513358587	1,912200455	2,111244604	2,304721389
440	0,082438	1,484426647	1,875700043	2,071007036	2,260818991
441	0,08377	1,456504474	1,840472497	2,0321715	2,218445903
442	0,085101	1,429550359	1,806465287	1,994680188	2,177539085
443	0,086431	1,403524607	1,773628416	1,958478074	2,138038534
444	0,08776	1,378389429	1,741914287	1,923512773	2,099887125
445	0,089086	1,354108843	1,711277577	1,889734399	2,063030457
446	0,09041	1,33064858	1,681675119	1,85709544	2,027416715
447	0,091731	1,307975994	1,653065787	1,825550628	1,992996535
448	0,093049	1,286059977	1,625410396	1,795056826	1,959722872
449	0,094363	1,26487088	1,598671592	1,765572917	1,927550887
450	0,095672	1,244380439	1,572813766	1,7370597	1,896437827
451	0,096978	1,2245617	1,547802961	1,709479789	1,866342921
452	0,098278	1,205388955	1,523606784	1,682797524	1,837227277
453	0,099573	1,186837676	1,500194331	1,65697888	1,809053786
454	0,100862	1,168884455	1,47753611	1,631991385	1,781787033
455	0,102146	1,151506951	1,455603965	1,607804038	1,755393209
456	0,103422	1,134683829	1,434371015	1,58438724	1,729840031
457	0,104692	1,118394716	1,413811585	1,56171272	1,705096664
458	0,105955	1,102620151	1,39390115	1,539753471	1,681133652
459	0,10721	1,087341535	1,374616272	1,518483685	1,657922846
460	0,108458	1,072541095	1,355934551	1,497878692	1,63543734
461	0,109697	1,05820184	1,337834574	1,47791491	1,613651412
462	0,110927	1,044307522	1,320295861	1,458569787	1,592540463
463	0,112149	1,030842601	1,303298826	1,43982175	1,572080964
464	0,113362	1,017792211	1,286824732	1,421650161	1,552250404
465	0,114565	1,005142126	1,270855645	1,40403527	1,53302724
466	0,115758	0,99287873	1,255374404	1,386958174	1,514390852
467	0,116941	0,980988987	1,240364577	1,370400772	1,496321498
468	0,118114	0,969460417	1,225810429	1,354345734	1,478800274
469	0,119276	0,958281065	1,21169689	1,33877646	1,461809071
470	0,120427	0,947439479	1,198009525	1,323677046	1,445330542
471	0,121566	0,936924686	1,184734499	1,309032253	1,429348065
472	0,122695	0,926726172	1,171858555	1,294827477	1,413845708
473	0,123811	0,916833857	1,159368985	1,281048717	1,398808198
474	0,124915	0,907238076	1,147253606	1,267682551	1,384220894
475	0,126008	0,897929564	1,135500733	1,254716106	1,370069754
476	0,127087	0,888899434	1,124099162	1,242137037	1,35634131
477	0,128154	0,88013916	1,113038143	1,229933502	1,343022644
478	0,129208	0,871640565	1,102307365	1,218094136	1,330101359
479	0,130248	0,8633958	1,09189693	1,206608038	1,317565562
480	0,131276	0,855397335	1,081797343	1,195464742	1,305403837
481	0,132289	0,847637942	1,071999488	1,184654206	1,293605227
482	0,133289	0,84011068	1,062494615	1,174166786	1,282159212
483	0,134275	0,83280889	1,053274323	1,163993225	1,271055693
484	0,135246	0,825726174	1,044330546	1,154124634	1,260284974
485	0,136203	0,81885639	1,035655537	1,144552477	1,249837742
486	0,137146	0,812193641	1,027241858	1,135268557	1,239705053
487	0,138073	0,805732261	1,019082365	1,126265	1,229878318
488	0,138986	0,79946681	1,011170194	1,117534243	1,220349285
489	0,139884	0,793392061	1,003498755	1,109069022	1,21111003
490	0,140766	0,787502995	0,996061716	1,100862358	1,202152939

Продолжение таблицы 10

500	0,14872	0,737852471	0,933356769	1,031664496	1,126626139
510	0,155012	0,637852471	0,833356769	0,931664496	1,026626139

Таблица 11 – Основные термодинамические параметры работы двигателя при частоте вращения 6000 мин⁻¹.

Угол ПКВ, град.	Объем цилиндра	P _i , базовый	P _i , с наддувом (30° C)	P _i , с наддувом (40° C)	P _i , с наддувом (50° C)
230	0,140766	0,121205835	0,169801697	0,194090601	0,218403463
231	0,139884	0,122259232	0,171273023	0,195769927	0,220291766
232	0,138986	0,123347166	0,17279255	0,197504247	0,222241892
233	0,138073	0,124470653	0,174361691	0,19929517	0,224255653
234	0,137146	0,125630751	0,175981922	0,201144379	0,226334939
235	0,136203	0,126828565	0,177654781	0,203053629	0,22848172
236	0,135246	0,128065248	0,179381876	0,20502475	0,230698055
237	0,134275	0,129342003	0,181164881	0,207059653	0,23298609
238	0,133289	0,130660087	0,183005547	0,209160332	0,235348066
239	0,132289	0,132020809	0,184905698	0,211328866	0,237786319
240	0,131276	0,133425537	0,18686724	0,213567429	0,240303292
241	0,130248	0,134875702	0,188892163	0,215878288	0,242901533
242	0,129208	0,136372794	0,190982546	0,218263812	0,245583702
243	0,128154	0,137918372	0,193140557	0,220726473	0,248352578
244	0,127087	0,139514064	0,195368464	0,223268855	0,251211065
245	0,126008	0,141161571	0,197668635	0,225893657	0,254162194
246	0,124915	0,142862669	0,200043544	0,228603699	0,257209134
247	0,123811	0,144619217	0,202495779	0,231401929	0,260355197
248	0,122695	0,146433158	0,205028044	0,234291428	0,263603846
249	0,121566	0,148306522	0,207643165	0,237275419	0,2669587
250	0,120427	0,150241433	0,2103441	0,240357269	0,270423545
251	0,119276	0,152240114	0,213133943	0,243540506	0,274002341
252	0,118114	0,154304891	0,21601593	0,246828816	0,277699231
253	0,116941	0,156438197	0,218993448	0,250226059	0,281518552
254	0,115758	0,15864258	0,222070044	0,253736276	0,285464843
255	0,114565	0,16092071	0,225249432	0,257363697	0,289542857
256	0,113362	0,16327538	0,2285355	0,261112754	0,293757572
257	0,112149	0,16570952	0,231932324	0,264988089	0,298114202
258	0,110927	0,168226198	0,235444173	0,268994566	0,302618213
259	0,109697	0,170828632	0,239075524	0,273137283	0,307275332
260	0,108458	0,173520195	0,242831069	0,277421588	0,312091565
261	0,10721	0,176304425	0,24671573	0,281853086	0,317073209
262	0,105955	0,179185035	0,250734671	0,28643766	0,322226872
263	0,104692	0,182165921	0,254893312	0,291181481	0,327559487
264	0,103422	0,185251171	0,259197339	0,296091028	0,333078331
265	0,102146	0,188445082	0,263652725	0,301173104	0,338791045
266	0,100862	0,191752164	0,268265744	0,306434853	0,344705653
267	0,099573	0,195177157	0,273042987	0,311883781	0,350830587
268	0,098278	0,198725043	0,277991378	0,317527775	0,357174705
269	0,096978	0,202401058	0,2831182	0,323375128	0,363747321
270	0,095672	0,206210711	0,28843111	0,329434558	0,370558227
271	0,094363	0,210159795	0,293938161	0,335715237	0,377617724
272	0,093049	0,214254408	0,299647828	0,342226815	0,38493665
273	0,091731	0,218500967	0,30556903	0,348979446	0,392526411

Продолжение таблицы 11

274	0,09041	0,22290623	0,311711159	0,355983825	0,400399014
275	0,089086	0,227477313	0,318084105	0,36325121	0,408567105
276	0,08776	0,232221716	0,324698287	0,370793464	0,417044005
277	0,086431	0,23714734	0,331564684	0,378623086	0,425843752
278	0,085101	0,242262516	0,33869487	0,386753251	0,43498114
279	0,08377	0,247576029	0,346101048	0,395197851	0,444471769
280	0,082438	0,253097144	0,353796089	0,403971537	0,45433209
281	0,081106	0,258835638	0,361793571	0,413089763	0,464579458
282	0,079774	0,26480183	0,370107825	0,422568842	0,475232189
283	0,078442	0,271006611	0,378753977	0,432425987	0,486309613
284	0,077112	0,277461485	0,387747998	0,442679378	0,497832139
285	0,075783	0,284178601	0,397106757	0,453348209	0,509821322
286	0,074456	0,291170794	0,406848074	0,464452761	0,522299931
287	0,073132	0,298451629	0,416990777	0,476014459	0,53529202
288	0,071811	0,306035443	0,427554767	0,488055948	0,548823014
289	0,070492	0,313937393	0,43856108	0,500601163	0,562919786
290	0,069178	0,322173508	0,45003196	0,513675411	0,577610746
291	0,067868	0,330760739	0,461990927	0,527305454	0,592925937
292	0,066563	0,339717016	0,47446286	0,541519593	0,608897131
293	0,065264	0,349061309	0,487474075	0,556347767	0,625557937
294	0,06397	0,358813688	0,501052413	0,571821645	0,642943904
295	0,062682	0,368995392	0,515227331	0,587974733	0,661092645
296	0,061401	0,379628893	0,530029995	0,60484248	0,680043951
297	0,060128	0,390737974	0,545493384	0,622462396	0,699839923
298	0,058862	0,402347801	0,561652392	0,640874165	0,720525104
299	0,057604	0,414485005	0,578543939	0,660119771	0,742146619
300	0,056355	0,427177762	0,596207082	0,680243631	0,764754318
301	0,055116	0,440455881	0,614683137	0,701292722	0,788400924
302	0,053886	0,454350888	0,634015796	0,723316723	0,813142193
303	0,052666	0,468896122	0,654251253	0,746368155	0,839037066
304	0,051456	0,484126821	0,675438332	0,770502523	0,866147832
305	0,050258	0,500080219	0,697628612	0,795778463	0,894540291
306	0,049072	0,516795638	0,720876559	0,822257887	0,924283918
307	0,047897	0,53431458	0,74523965	0,850006124	0,955452018
308	0,046735	0,552680817	0,770778494	0,879092062	0,98812189
309	0,045586	0,571940476	0,797556956	0,909588279	1,022374965
310	0,044451	0,592142118	0,825642256	0,941571166	1,058296955
311	0,043329	0,61333681	0,855105075	0,975121035	1,095977964
312	0,042222	0,635578181	0,886019626	1,010322207	1,135512592
313	0,041113	0,658922467	0,918463716	1,047263081	1,177000006
314	0,040053	0,683428533	0,952518775	1,086036159	1,220543978
315	0,038991	0,709157871	0,988269849	1,126738048	1,266252873
316	0,037946	0,736174564	1,025805555	1,169469395	1,314239587
317	0,036918	0,764545217	1,065217972	1,214334773	1,364621411
318	0,035906	0,794338835	1,106602478	1,261442488	1,417519819
319	0,034912	0,825626649	1,150057505	1,310904301	1,473060149
320	0,033936	0,858481871	1,195684195	1,362835034	1,531371169
321	0,032978	0,89297937	1,243585952	1,417352063	1,592584495
322	0,032039	0,929195256	1,293867857	1,474574649	1,656833852
323	0,031119	0,967206346	1,346635934	1,534623102	1,72425413
324	0,030219	1,00708951	1,401996237	1,597617744	1,794980214
325	0,029338	1,048920859	1,460053727	1,663677628	1,869145558
326	0,028478	1,092774773	1,520910919	1,732919004	1,946880452

Продолжение таблицы 11

327	0,027638	1,138722727	1,584666262	1,805453474	2,028309958
328	0,026819	1,186831908	1,651412216	1,881385807	2,113551455
329	0,026022	1,237163584	1,721233001	1,960811379	2,202711771
330	0,025246	1,289771213	1,794201977	2,043813202	2,295883842
331	0,024492	1,344698266	1,870378632	2,130458495	2,393142873
332	0,023761	1,401975743	1,949805147	2,220794785	2,494541962
333	0,023053	1,461782101	2,032502523	2,314845513	2,60010717
334	0,022367	1,524083647	2,11846626	2,412605123	2,709832015
335	0,021705	1,589090705	2,207041323	2,514033669	2,823671424
336	0,021066	1,657107018	2,298926304	2,618051511	2,941535157
337	0,020451	1,728539681	2,394363868	2,725771919	3,063280783
338	0,01986	1,803908398	2,493728898	2,837534148	3,188706321
339	0,019294	1,883853283	2,597542715	2,953877591	3,315797352
340	0,018752	1,969140213	2,706486006	3,07556306	3,446426752
341	0,018235	2,060662583	2,821409196	3,203591479	3,581050288
342	0,017743	2,159438211	2,943338653	3,339217756	3,72046556
343	0,017277	2,266600125	3,07347693	3,483957085	3,865845734
344	0,016836	2,38338004	3,213195046	3,639580628	4,018765967
345	0,016421	2,511083599	3,364014867	3,80809735	4,181217611
346	0,016032	2,651056792	3,527579818	3,991719	4,355604571
347	0,015669	2,804643434	3,705612632	4,192805768	4,544715815
348	0,015332	2,973134162	3,899859492	4,413791164	4,751668421
349	0,015021	3,157707944	4,112020801	4,657085952	4,979816713
350	0,014737	3,35936767	4,343669816	4,924962591	5,232625182
351	0,01448	3,578871887	4,59616138	5,219423278	5,513505708
352	0,014249	3,816665213	4,870533999	5,542056234	5,825622975
353	0,014046	4,072810365	5,167409325	5,893886317	6,171675214
354	0,013869	4,346925097	5,486893822	6,275227133	6,55366035
355	0,013719	4,638127662	5,828487903	6,685542779	6,972639791
356	0,013597	4,944994557	6,191008152	7,123328006	7,428513684
357	0,013501	5,265534331	6,572528319	7,586015987	7,919822463
358	0,013433	5,597180996	6,970344623	8,069922897	8,443590078
359	0,013392	5,936809978	7,380970318	8,570237862	8,995224435
360	0,013379	6,280778663	7,800163543	9,081065541	9,568489844
361	0,013392	6,624992359	8,222991025	9,595526275	10,15556443
362	0,013433	6,964995003	8,643928395	10,1059156	10,74719188
363	0,013501	7,296082325	9,056995646	10,60392097	11,33293158
364	0,013597	7,613433546	9,455923918	11,08088902	11,90150397
365	0,013719	7,91225624	9,834347427	11,52813237	12,44121965
366	0,013869	8,187937788	10,18601219	11,93726052	12,94047193
367	0,014046	8,436196123	10,50499158	12,30051648	13,38826414
368	0,014249	8,653222197	10,7858976	12,61109864	13,7747369
369	0,01448	8,835806834	11,02407647	12,863447	14,09165641
370	0,014737	8,981445428	11,21577773	13,05347454	14,33282545
371	0,015021	9,088415116	11,35828711	13,17872762	14,4943823
372	0,015332	9,155820624	11,4500156	13,23846397	14,57496132
373	0,015669	9,183606749	11,49053976	13,23364301	14,57570049
374	0,016032	9,172537389	11,48059113	13,16682956	14,50009472
375	0,016421	9,124142846	11,42199584	13,04201885	14,35370874
376	0,016836	9,04063894	11,31756882	12,86439658	14,14377624
377	0,017277	8,924822913	11,17096938	12,64005238	13,87872277
378	0,017743	8,779952273	10,98652774	12,37566842	13,56765573
379	0,018235	8,609613425	10,76905327	12,0782051	13,21986562

Продолжение таблицы 11

380	0,018752	8,417587216	10,52363612	11,75460538	12,84437832
381	0,019294	8,207718275	10,25545377	11,41153529	12,4495891
382	0,01986	7,983794361	9,969592855	11,05517416	12,04299712
383	0,020451	7,749440878	9,670894891	10,691062	11,63104635
384	0,021066	7,508034331	9,363832181	10,32400604	11,21906652
385	0,021705	7,262637019	9,052417296	9,95804289	10,81129865
386	0,022367	7,01595363	8,740146902	9,596448871	10,41098355
387	0,023053	6,770308999	8,429978097	9,241787911	10,02049012
388	0,023761	6,527644996	8,124333336	8,895985565	9,641461583
389	0,024492	6,289533582	7,825128564	8,560417708	9,302530094
390	0,025246	6,057202486	7,533818393	8,236003953	8,975575111
391	0,026022	5,831569716	7,251452064	7,946679285	8,660566889
392	0,026819	5,613283257	6,97873441	7,668240652	8,357400678
393	0,027638	5,402762661	6,716086953	7,400533867	8,065909437
394	0,028478	5,200239857	6,482448137	7,143357953	7,785875163
395	0,029338	5,020268027	6,258168235	6,896474361	7,51703892
396	0,030219	4,847612026	6,04300298	6,659615033	7,259109617
397	0,031119	4,68205931	5,836687704	6,432489427	7,011771644
398	0,032039	4,523385383	5,638942838	6,214790554	6,774691449
399	0,032978	4,371357569	5,449478604	6,006200158	6,547523171
400	0,033936	4,225738209	5,267999011	5,806393091	6,329913407
401	0,034912	4,086287352	5,094205192	5,615041005	6,121505228
402	0,035906	3,952764986	4,927798201	5,431815423	5,921941524
403	0,036918	3,82493289	4,768481308	5,256390263	5,730867752
404	0,037946	3,702556126	4,615961867	5,0884439	5,547934187
405	0,038991	3,585404249	4,469952821	4,927660822	5,372797721
406	0,040053	3,473252252	4,33017388	4,77373293	5,205123281
407	0,04113	3,365881302	4,196352438	4,626360544	5,044584931
408	0,042222	3,26307928	4,068224247	4,485253158	4,890866688
409	0,043329	3,164641174	3,94553391	4,350129972	4,743663111
410	0,044451	3,070369339	3,828035202	4,220720252	4,60267969
411	0,045586	2,980073645	3,715491256	4,09676354	4,467633078
412	0,046735	2,893571537	3,607674636	3,978009735	4,338251181
413	0,047897	2,810688022	3,504367328	3,864219078	4,214273144
414	0,049072	2,731255594	3,405360638	3,755162053	4,095449244
415	0,050258	2,655114113	3,31045505	3,650619223	3,981540713
416	0,051456	2,582110646	3,219460022	3,550381012	3,872319501
417	0,052666	2,512099275	3,132193752	3,454247446	3,767568002
418	0,053886	2,444940894	3,04848292	3,362027873	3,66707874
419	0,055116	2,380502973	2,9681624	3,273540645	3,570654033
420	0,056355	2,31865933	2,89107497	3,188612804	3,478105646
421	0,057604	2,259289878	2,817071005	3,107079738	3,389254422
422	0,058862	2,202280386	2,74600817	3,028784852	3,303929923
423	0,060128	2,147522225	2,677751112	2,953579224	3,221970057
424	0,061401	2,094912124	2,612171153	2,881321272	3,143220713
425	0,062682	2,044351929	2,549145985	2,811876418	3,067535402
426	0,06397	1,995748362	2,488559382	2,745116769	2,994774903
427	0,065264	1,949012794	2,430300902	2,680920795	2,92480692
428	0,066563	1,904061015	2,374265613	2,619173022	2,857505748
429	0,067868	1,860813021	2,320353823	2,55976374	2,792751946
430	0,069178	1,819192805	2,268470816	2,502588712	2,730432033
431	0,070492	1,77912815	2,218526602	2,447548897	2,670438181
432	0,071811	1,740550443	2,170435682	2,394550194	2,612667934

Продолжение таблицы 11

433	0,073132	1,70339449	2,124116809	2,34350318	2,557023931
434	0,074456	1,667598333	2,079492779	2,294322877	2,503413644
435	0,075783	1,633103091	2,036490212	2,246928515	2,451749127
436	0,077112	1,599852793	1,995039361	2,20124332	2,40194678
437	0,078442	1,567794231	1,955073916	2,157194299	2,353927122
438	0,079774	1,536876813	1,916530829	2,114712048	2,307614572
439	0,081106	1,507052423	1,87935014	2,073730558	2,262937252
440	0,082438	1,478275299	1,843474815	2,034187043	2,219826784
441	0,08377	1,4505019	1,808850594	1,996021766	2,178218113
442	0,085101	1,423690795	1,775425843	1,959177882	2,138049332
443	0,086431	1,397802551	1,74315142	1,923601284	2,099261514
444	0,08776	1,372799629	1,711980539	1,889240463	2,061798558
445	0,089086	1,348646283	1,681868651	1,856046367	2,02560704
446	0,09041	1,325308467	1,652773326	1,823972278	1,990636075
447	0,091731	1,302753747	1,624654141	1,792973685	1,956837184
448	0,093049	1,280951217	1,597472578	1,763008176	1,924164168
449	0,094363	1,25987142	1,571191924	1,734035323	1,892572992
450	0,095672	1,239486271	1,545777175	1,706016581	1,862021671
451	0,096978	1,21976899	1,521194955	1,678915195	1,832470166
452	0,098278	1,20069403	1,497413425	1,652696102	1,803880284
453	0,099573	1,18223702	1,474402209	1,627325851	1,776215583
454	0,100862	1,1643747	1,452132316	1,602772514	1,749441283
455	0,102146	1,147084867	1,430576075	1,579005614	1,723524183
456	0,103422	1,130346322	1,409707061	1,555996051	1,69843258
457	0,104692	1,114138818	1,38950004	1,533716031	1,674136194
458	0,105955	1,098443012	1,369930905	1,512139002	1,650606098
459	0,10721	1,083240423	1,350976618	1,491239591	1,627814648
460	0,108458	1,068513386	1,332615164	1,470993547	1,605735423
461	0,109697	1,054245014	1,314825492	1,451377685	1,584343162
462	0,110927	1,040419159	1,297587476	1,432369835	1,56361371
463	0,112149	1,027020374	1,280881863	1,413948791	1,54352396
464	0,113362	1,014033883	1,264690236	1,396094262	1,524051806
465	0,114565	1,001445546	1,248994968	1,378786835	1,505176092
466	0,115758	0,989241829	1,233779192	1,362007926	1,48687657
467	0,116941	0,977409775	1,219026755	1,345739742	1,469133853
468	0,118114	0,965936976	1,204722193	1,329965248	1,451929376
469	0,119276	0,954811549	1,190850694	1,314668124	1,435245358
470	0,120427	0,944022111	1,177398068	1,299832738	1,419064762
471	0,121566	0,933557753	1,164350718	1,28544411	1,403371265
472	0,122695	0,923408021	1,151695613	1,271487885	1,388149223
473	0,123811	0,913562895	1,139420263	1,257950299	1,373383638
474	0,124915	0,904012768	1,127512692	1,24481816	1,359060132
475	0,126008	0,894748426	1,115961416	1,232078814	1,345164916
476	0,127087	0,885761035	1,104755423	1,219720127	1,331684765
477	0,128154	0,877042119	1,093884146	1,207730457	1,318606992
478	0,129208	0,868583547	1,08333745	1,196098637	1,305919426
479	0,130248	0,860377515	1,073105608	1,184813949	1,293610385
480	0,131276	0,852416536	1,063179286	1,173866107	1,28166866
481	0,132289	0,844693422	1,053549525	1,163245239	1,270083491
482	0,133289	0,837201274	1,044207724	1,152941868	1,258844548
483	0,134275	0,829933468	1,035145626	1,142946896	1,247941916
484	0,135246	0,822883644	1,026355302	1,133251585	1,237366069
485	0,136203	0,816045694	1,01782914	1,123847545	1,227107865

Продолжение таблицы 11

486	0,137146	0,809413753	1,009559827	1,11472672	1,217158521
487	0,138073	0,802982188	1,001540342	1,10588137	1,207509602
488	0,138986	0,796745589	0,993763939	1,097304063	1,198153005
489	0,139884	0,790698758	0,98622414	1,088987659	1,189080948
490	0,140766	0,784836702	0,978914722	1,080925299	1,180285956
500	0,14872	0,735411777	0,917285928	1,012945499	1,106126232
510	0,155012	0,635411777	0,817285928	0,912945499	1,006126232

Таблица 12 – Основные термодинамические параметры работы двигателя при частоте вращения 10000 мин⁻¹.

Угол ПКВ, град.	Объем цилиндра	P _i , базовый	P _i , с наддувом (30° C)	P _i , с наддувом (40° C)	P _i , с наддувом (50° C)
230	0,140766	0,118752078	0,168033713	0,190763109	0,214746082
231	0,139884	0,119784224	0,169534549	0,192413646	0,21660004
232	0,138986	0,120850212	0,171084361	0,194118231	0,218514672
233	0,138073	0,121951036	0,172684577	0,195878451	0,220491755
234	0,137146	0,123087734	0,174336684	0,197695958	0,222533141
235	0,136203	0,124261387	0,176042238	0,199572475	0,224640764
236	0,135246	0,125473127	0,177802858	0,201509804	0,226816642
237	0,134275	0,126724131	0,179620236	0,20350982	0,229062879
238	0,133289	0,128015631	0,181496137	0,205574484	0,231381672
239	0,132289	0,12934891	0,183432402	0,207705842	0,233775313
240	0,131276	0,13072531	0,185430955	0,209906027	0,236246195
241	0,130248	0,132146231	0,187493802	0,212177269	0,238796817
242	0,129208	0,133613133	0,18962304	0,214521895	0,241429788
243	0,128154	0,135127546	0,191820856	0,216942336	0,244147831
244	0,127087	0,136691062	0,194089536	0,219441131	0,246953793
245	0,126008	0,13830535	0,19643147	0,222020934	0,249850646
246	0,124915	0,139972151	0,198849151	0,224684515	0,252841497
247	0,123811	0,141693285	0,201345187	0,227434772	0,255929592
248	0,122695	0,143470656	0,203922304	0,230274733	0,259118325
249	0,121566	0,145306254	0,206583351	0,233207566	0,262411244
250	0,120427	0,14720216	0,209331308	0,236236582	0,265812059
251	0,119276	0,149160553	0,212169291	0,239365245	0,269324654
252	0,118114	0,151183711	0,215100563	0,24259718	0,272953088
253	0,116941	0,153274018	0,218128533	0,245936181	0,276701611
254	0,115758	0,155433973	0,221256775	0,249386218	0,280574673
255	0,114565	0,15766619	0,224489026	0,252951451	0,284576931
256	0,113362	0,159973408	0,227829203	0,256636234	0,288713264
257	0,112149	0,162358496	0,231281406	0,26044513	0,292988782
258	0,110927	0,164824462	0,234849933	0,26438292	0,297408841
259	0,109697	0,167374458	0,238539287	0,268454615	0,301979053
260	0,108458	0,17001179	0,242354189	0,272665469	0,306705303
261	0,10721	0,172739926	0,24629959	0,277020993	0,311593763
262	0,105955	0,175562503	0,250380681	0,281526969	0,316650905
263	0,104692	0,178483338	0,25460291	0,286189462	0,321883523
264	0,103422	0,181506441	0,258971995	0,29101484	0,327298747
265	0,102146	0,184636018	0,263493935	0,296009789	0,332904063
266	0,100862	0,187876491	0,268175033	0,30118133	0,338707332
267	0,099573	0,191232505	0,273021907	0,306536842	0,344716814
268	0,098278	0,19470894	0,278041511	0,312084075	0,350941187

Продолжение таблицы 12

269	0,096978	0,198310929	0,283241154	0,317831181	0,357389575
270	0,095672	0,20204387	0,288628518	0,323786728	0,36407157
271	0,094363	0,20591344	0,294211683	0,329959731	0,370997262
272	0,093049	0,209925615	0,299999147	0,336359674	0,378177265
273	0,091731	0,214086682	0,305999851	0,342996539	0,385622752
274	0,09041	0,218403263	0,312223207	0,349880834	0,393345482
275	0,089086	0,222882334	0,318679121	0,357023627	0,401357841
276	0,08776	0,227531243	0,325378026	0,364436576	0,409672873
277	0,086431	0,232357732	0,332330914	0,372131967	0,418304327
278	0,085101	0,237369966	0,339549364	0,380122749	0,427266688
279	0,08377	0,242576554	0,347045583	0,388422575	0,436575233
280	0,082438	0,247986575	0,354832436	0,397045844	0,446246069
281	0,081106	0,25360961	0,362923493	0,406007748	0,456296191
282	0,079774	0,259455771	0,371333068	0,415324316	0,466743528
283	0,078442	0,265535731	0,380076261	0,425012471	0,477607008
284	0,077112	0,271860764	0,38916901	0,435090077	0,48890661
285	0,075783	0,278442775	0,398628137	0,445576002	0,500663436
286	0,074456	0,285294342	0,408471404	0,456490178	0,512899772
287	0,073132	0,292428759	0,418717569	0,467853662	0,525639166
288	0,071811	0,299860076	0,429386445	0,479688711	0,538906503
289	0,070492	0,307603146	0,440498964	0,49201885	0,552728085
290	0,069178	0,315673676	0,452077242	0,504868954	0,567131718
291	0,067868	0,324088279	0,464144654	0,518265323	0,582146804
292	0,066563	0,332864527	0,476725904	0,532235775	0,597804436
293	0,065264	0,342021009	0,489847105	0,546809734	0,6141375
294	0,06397	0,351577395	0,503535863	0,562018328	0,631180784
295	0,062682	0,361554496	0,517821363	0,577894487	0,648971087
296	0,061401	0,371974338	0,532734459	0,594473054	0,667547345
297	0,060128	0,382860226	0,548307771	0,611790893	0,686950745
298	0,058862	0,394236824	0,564575783	0,62988701	0,707224865
299	0,057604	0,40613023	0,581574945	0,64880267	0,728415802
300	0,056355	0,418568056	0,599343783	0,668581526	0,750572319
301	0,055116	0,431579516	0,617923005	0,689269751	0,773745988
302	0,053886	0,445195507	0,637355616	0,710916173	0,797991339
303	0,052666	0,459448699	0,657687033	0,73357241	0,823366016
304	0,051456	0,474373629	0,678965202	0,757293019	0,849930935
305	0,050258	0,490006785	0,701240711	0,782135628	0,877750441
306	0,049072	0,506386705	0,724566909	0,808161088	0,906892464
307	0,047897	0,523554062	0,749000017	0,835433609	0,937428681
308	0,046735	0,541551752	0,774599235	0,864020898	0,96943466
309	0,045586	0,560424984	0,801426844	0,893994287	1,002990011
310	0,044451	0,580221348	0,829548294	0,925428859	1,038178518
311	0,043329	0,600990893	0,859032282	0,958403548	1,075088251
312	0,042222	0,622786177	0,889950808	0,993001231	1,113811671
313	0,04113	0,645662315	0,92237921	1,02930879	1,154445692
314	0,040053	0,669676998	0,956396168	1,067417143	1,197091717
315	0,038991	0,694890492	0,992083672	1,107421238	1,24185563
316	0,037946	0,721365603	1,029526945	1,149419998	1,288847732
317	0,036918	0,749167607	1,068814311	1,193516203	1,338182605
318	0,035906	0,778364137	1,110036996	1,239816303	1,389978904
319	0,034912	0,809025002	1,15328885	1,288430142	1,444359044
320	0,033936	0,841221959	1,198665979	1,339470574	1,501448774
321	0,032978	0,875028386	1,24626626	1,393052962	1,561376608

Продолжение таблицы 12

322	0,032039	0,910518878	1,296188731	1,449294524	1,624273098
323	0,031119	0,947768725	1,348532831	1,508313506	1,690269911
324	0,030219	0,986853268	1,403397462	1,570228166	1,759498682
325	0,029338	1,027847107	1,460879858	1,635155519	1,832089624
326	0,028478	1,070823144	1,521074224	1,70320982	1,908169826
327	0,027638	1,115851437	1,584070123	1,774500759	1,987861237
328	0,026819	1,16299784	1,649950578	1,849131306	2,071278268
329	0,026022	1,21252594	1,718789863	1,927195206	2,158524984
330	0,025246	1,264355267	1,79065095	2,008774044	2,249691842
331	0,024492	1,318664466	1,865219329	2,093933889	2,344851939
332	0,023761	1,375690013	1,942952884	2,182721453	2,444056734
333	0,023053	1,435732319	2,024065317	2,275159774	2,547331234
334	0,022367	1,49916173	2,10885024	2,275159774	2,65466862
335	0,021705	1,566424109	2,197689609	2,370245522	2,766024332
336	0,021066	1,638045558	2,291061853	2,469016057	2,87984413
337	0,020451	1,714635768	2,389549163	2,571694168	2,997628774
338	0,01986	1,796889374	2,493843278	2,678611723	3,119657791
339	0,019294	1,885584668	2,604748922	2,790221449	3,246385531
340	0,018752	1,981578931	2,723183973	2,90710792	3,378460147
341	0,018235	2,085799712	2,850175311	3,029996782	3,516740555
342	0,017743	2,199231402	2,986849288	3,159761057	3,662309475
343	0,017277	2,32289659	3,134415815	3,297423105	3,816480278
344	0,016836	2,457831855	3,294145175	3,444150695	3,980794972
345	0,016421	2,605057862	3,467336947	3,601245547	4,157010532
346	0,016032	2,765543926	3,655280733	3,770122763	4,347070785
347	0,015669	2,940167465	3,859208839	3,9522798	4,553061451
348	0,015332	3,129669122	4,080241528	4,149254024	4,777146647
349	0,015021	3,334604664	4,319326026	4,362568477	5,02148622
350	0,014737	3,555295154	4,57717099	4,593666259	5,288134633
351	0,01448	3,791777215	4,854178704	4,84383474	5,578923651
352	0,014249	4,043755643	5,15037778	5,114121755	5,895332663
353	0,014046	4,310560853	5,465359573	5,405246814	6,23835193
354	0,013869	4,591113962	5,798221894	5,717511146	6,608345346
355	0,013719	4,88390234	6,147523808	6,050711068	7,004920295
356	0,013597	5,186968399	6,51125529	6,404059661	7,42681288
357	0,013501	5,497914051	6,886825344	6,776121979	7,871797114
358	0,013433	5,813922675	7,271071578	7,164768985	8,336626571
359	0,013392	6,131799629	7,660293488	7,567155128	8,817016329
360	0,013379	6,448031286	8,050310492	7,979723682	9,307671765
361	0,013392	6,758861449	8,436544469	8,398242971	9,802368758
362	0,013433	7,060382798	8,814124989	8,817875081	10,29408715
363	0,013501	7,348639941	9,178013943	9,233276905	10,77519597
364	0,013597	7,619739712	9,523144838	9,638731394	11,2376853
365	0,013719	7,869963764	9,844570871	10,02830482	11,67343562
366	0,013869	8,095878209	10,13761507	10,39602397	12,07451227
367	0,014046	8,294435128	10,39801547	10,73606552	12,43346948
368	0,014249	8,463061235	10,62205822	11,04294862	12,74364659
369	0,01448	8,59972971	10,80669241	11,31172123	12,99943872
370	0,014737	8,703012164	10,9496209	11,53813055	13,19652446
371	0,015021	8,772108865	11,0493632	11,71876864	13,33203598
372	0,015332	8,806856461	11,10528762	11,85118563	13,40465986
373	0,015669	8,80771365	11,11761179	11,93396455	13,41466227
374	0,016032	8,775726241	11,08737221	11,96675406	13,36383671

Продолжение таблицы 12

375	0,016421	8,712474012	11,0163651	11,9502577	13,2553788
376	0,016836	8,620002445	10,90706219	11,88618092	13,09369724
377	0,017277	8,500742967	10,76250629	11,77713934	12,88417505
378	0,017743	8,357425628	10,58619223	11,62653401	12,63289822
379	0,018235	8,192988217	10,38193938	11,43840122	12,34637081
380	0,018752	8,010485729	10,15376186	11,21724559	12,03123535
381	0,019294	7,813003777	9,90574254	10,96786582	11,69401603
382	0,01986	7,603579103	9,641916063	10,69518246	11,34089864
383	0,020451	7,385129748	9,366165544	10,40407652	10,97755724
384	0,021066	7,160396747	9,082136183	10,09924616	10,60903261
385	0,021705	6,931898521	8,793168018	9,785087332	10,23966278
386	0,022367	6,70189838	8,502248657	9,465601971	9,873061521
387	0,023053	6,472384869	8,211985627	9,144335283	9,512137672
388	0,023761	6,245064079	7,924596928	8,82434151	9,159145749
389	0,024492	6,021362559	7,64191747	8,508175861	8,815757808
390	0,025246	5,802439082	7,365418534	8,197908772	8,483146725
391	0,026022	5,589203336	7,096237036	7,895157814	8,162072446
392	0,026819	5,382339537	6,835211346	7,601132116	7,876254829
393	0,027638	5,182333025	6,582920636	7,316684297	7,601447614
394	0,028478	4,989498112	6,339725061	7,04236536	7,337444985
395	0,029338	4,804005684	6,105804644	6,778478791	7,084002538
396	0,030219	4,625909411	5,881195257	6,319138332	6,840845567
397	0,031119	4,467820481	5,665820665	6,103477975	6,607676261
398	0,032039	4,316303854	5,459520107	5,896773441	6,384179909
399	0,032978	4,171137011	5,26207131	5,698722084	6,170030206
400	0,033936	4,032092692	5,073209138	5,509014744	5,964893753
401	0,034912	3,898941468	4,892640312	5,327339246	5,768433842
402	0,035906	3,771453871	4,720054724	5,153383315	5,580313605
403	0,036918	3,649402159	4,555133945	4,986836977	5,400198613
404	0,037946	3,532561747	4,513763467	4,827394517	5,227758989
405	0,038991	3,420712354	4,371681709	4,674756045	5,062671109
406	0,040053	3,313638914	4,235578692	4,528628734	4,904618937
407	0,04113	3,211132267	4,105199155	4,388727775	4,753295062
408	0,042222	3,112989682	3,980295018	4,254777086	4,608401468
409	0,043329	3,019015231	3,860625938	4,126509825	4,469650087
410	0,044451	2,929020033	3,745959685	4,003668724	4,336763169
411	0,045586	2,842822394	3,6360724	3,88600629	4,209473494
412	0,046735	2,760247868	3,530748726	3,773284881	4,087524462
413	0,047897	2,68112924	3,429781857	3,665276692	3,970670076
414	0,049072	2,605306456	3,332973501	3,561763654	3,858674841
415	0,050258	2,532626503	3,240133786	3,462537282	3,751313596
416	0,051456	2,462943261	3,151081112	3,367398467	3,648371293
417	0,052666	2,396117318	3,065641972	3,276157231	3,549642732
418	0,053886	2,33201577	2,983650731	3,188632453	3,454932273
419	0,055116	2,270512004	2,904949394	3,104651574	3,364053511
420	0,056355	2,21148547	2,829387348	3,024050291	3,276828952
421	0,057604	2,154821451	2,756821099	2,946672239	3,193089667
422	0,058862	2,100410821	2,687113998	2,872368669	3,112674947
423	0,060128	2,048149811	2,62013597	2,800998126	3,035431958
424	0,061401	1,997939773	2,555763232	2,732426128	2,961215389
425	0,062682	1,949686948	2,493878028	2,666524851	2,889887123
426	0,06397	1,903302239	2,434368352	2,603172823	2,821315892
427	0,065264	1,858700989	2,377127688	2,542254617	2,755376963

Продолжение таблицы 12

428	0,066563	1,815802766	2,322054755	2,483660565	2,691951816
429	0,067868	1,774531156	2,269053252	2,427286469	2,63092784
430	0,069178	1,734813564	2,218031622	2,373033335	2,572198042
431	0,070492	1,696581017	2,168902815	2,320807108	2,515660764
432	0,071811	1,659767987	2,121584068	2,27051842	2,46121941
433	0,073132	1,624312208	2,075996688	2,222082353	2,408782191
434	0,074456	1,590154513	2,032065849	2,175418209	2,358261873
435	0,075783	1,557238667	1,989720392	2,130449291	2,309575546
436	0,077112	1,525511221	1,94889264	2,087102692	2,262644396
437	0,078442	1,494921363	1,909518221	2,045309103	2,217393491
438	0,079774	1,46542078	1,871535895	2,00500262	2,173751582
439	0,081106	1,436963526	1,834887393	1,966120567	2,131650904
440	0,082438	1,409505901	1,799517263	1,928603328	2,091027
441	0,08377	1,38300633	1,765372728	1,892394182	2,051818542
442	0,085101	1,357425251	1,732403543	1,857439157	2,013967169
443	0,086431	1,332725011	1,700561865	1,823686881	1,977417333
444	0,08776	1,308869768	1,66980213	1,791088449	1,942116148
445	0,089086	1,285825389	1,640080934	1,759597289	1,908013254
446	0,09041	1,263559368	1,611356922	1,729169047	1,875060683
447	0,091731	1,242040738	1,583590683	1,699761467	1,843212738
448	0,093049	1,221239991	1,556744649	1,671334281	1,812425868
449	0,094363	1,201129001	1,530783001	1,64384911	1,782658566
450	0,095672	1,181680956	1,505671577	1,617269361	1,753871254
451	0,096978	1,162870288	1,481377794	1,591560142	1,726026193
452	0,098278	1,144672607	1,457870561	1,566688168	1,69908738
453	0,099573	1,127064647	1,435120205	1,542621681	1,673020465
454	0,100862	1,110024203	1,413098403	1,519330376	1,647792666
455	0,102146	1,093530076	1,391778109	1,496785321	1,623372687
456	0,103422	1,077562031	1,371133495	1,474958893	1,599730646
457	0,104692	1,062100738	1,351139885	1,453824708	1,576838002
458	0,105955	1,047127733	1,331773704	1,433357562	1,554667489
459	0,10721	1,032625373	1,313012416	1,413533371	1,533193052
460	0,108458	1,018576796	1,294834482	1,394329117	1,512389787
461	0,109697	1,004965882	1,277219302	1,375722794	1,492233885
462	0,110927	0,991777216	1,260147177	1,357693356	1,472702578
463	0,112149	0,978996054	1,243599258	1,340220677	1,453774089
464	0,113362	0,966608292	1,227557514	1,323285498	1,435427581
465	0,114565	0,954600432	1,212004684	1,306869393	1,417643116
466	0,115758	0,942959556	1,196924246	1,290954724	1,400401608
467	0,116941	0,931673297	1,182300379	1,275524604	1,383684786
468	0,118114	0,920729812	1,168117931	1,260562863	1,367475152
469	0,119276	0,910117758	1,154362389	1,246054015	1,351755948
470	0,120427	0,899826271	1,141019847	1,231983223	1,336511117
471	0,121566	0,889844939	1,128076978	1,21833627	1,321725275
472	0,122695	0,880163784	1,115521011	1,205099531	1,307383677
473	0,123811	0,870773244	1,103339699	1,192259947	1,29347219
474	0,124915	0,861664147	1,091521302	1,179804995	1,279977261
475	0,126008	0,852827703	1,080054561	1,167722669	1,266885896
476	0,127087	0,844255478	1,068928673	1,156001451	1,254185631
477	0,128154	0,835939384	1,058133279	1,144630296	1,241864509
478	0,129208	0,82787166	1,047658437	1,133598604	1,229911058
479	0,130248	0,820044859	1,037494606	1,122896205	1,218314272
480	0,131276	0,812451836	1,027632629	1,112513339	1,207063585

Продолжение таблицы 12

481	0,132289	0,805085731	1,018063718	1,102440638	1,196148858
482	0,133289	0,79793996	1,008779433	1,092669107	1,185560355
483	0,134275	0,791008201	0,999771674	1,083190114	1,175288731
484	0,135246	0,784284386	0,991032661	1,073995367	1,165325011
485	0,136203	0,777762685	0,982554923	1,065076906	1,155660577
486	0,137146	0,771437502	0,974331284	1,056427084	1,146287154
487	0,138073	0,76530346	0,966354854	1,048038559	1,137196792
488	0,138986	0,759355398	0,958619011	1,039904278	1,128381855
489	0,139884	0,753588354	0,951117398	1,032017466	1,11983501
490	0,140766	0,747997567	0,943843905	1,024371615	1,111549212
500	0,14872	0,700860962	0,882472156	0,959905315	1,041683936
510	0,155012	0,600860962	0,782472156	0,859905315	0,941683936

Выводы по 2-му разделу бакалаврской работы

Применение наддува значительно повысило мощностные показатели работы двигателя. За счет варьирования степенью наддува можно снизить не только объем, но и частоту вращения двигателя, тем самым сохранив нагрузки и ресурс агрегата в допустимых пределах.

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 21,25 мм, а длина шатуна 109 мм) проводился по известным методикам приведенным в [1,2], при частоте вращения коленчатого вала 12000 мин^{-1} .

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

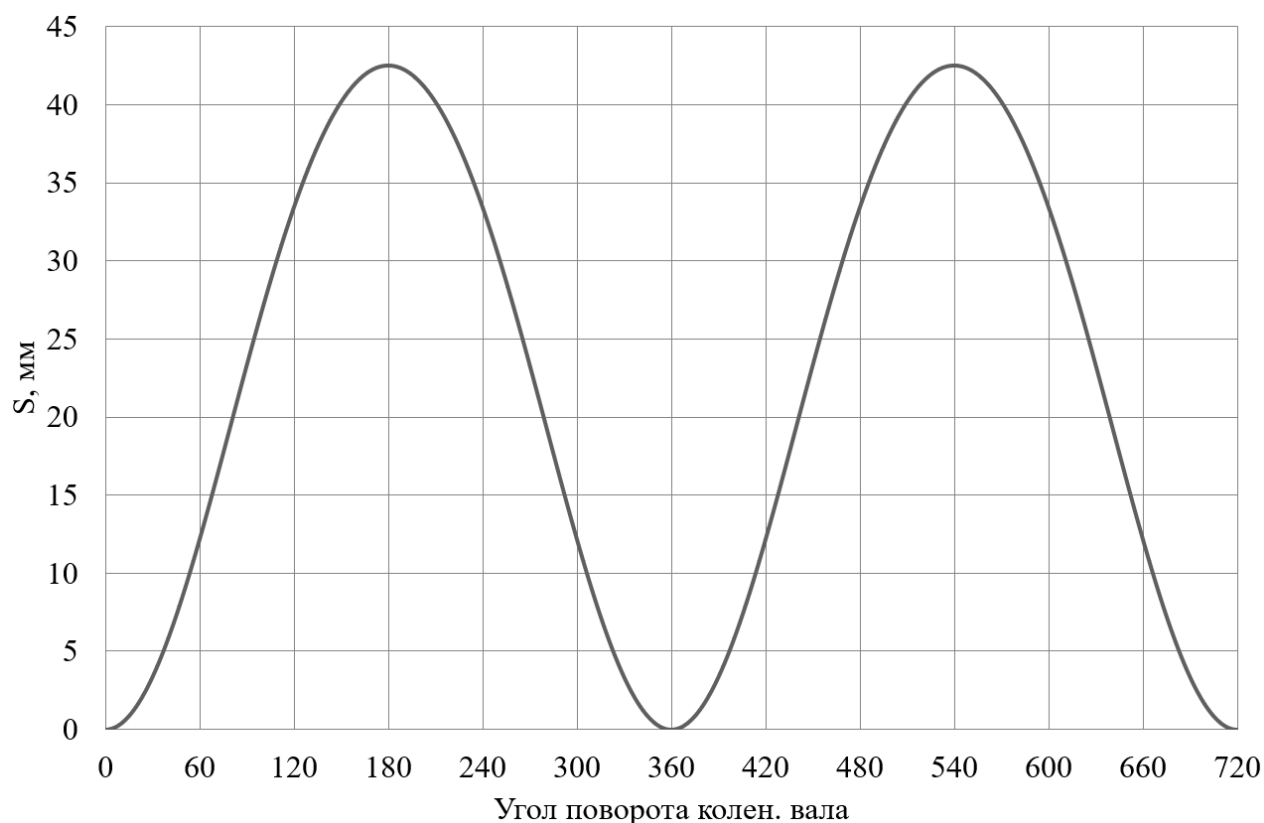


Рисунок 9 – Диаграмма изменения хода поршня

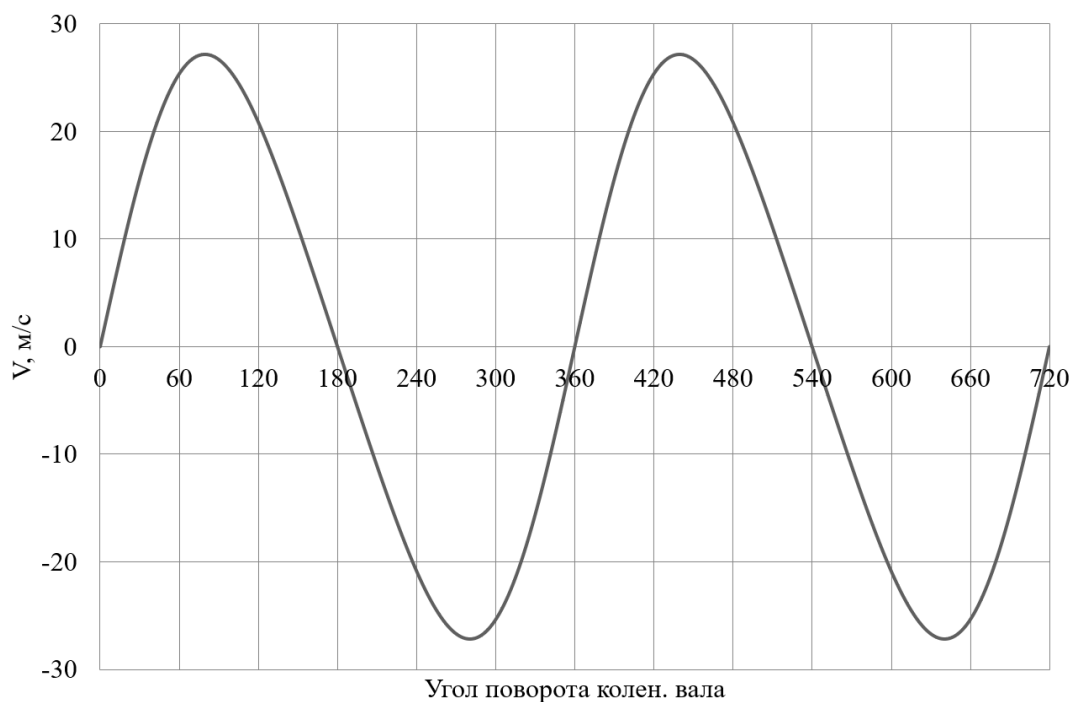


Рисунок 10 – Диаграмма изменения скорости поршня

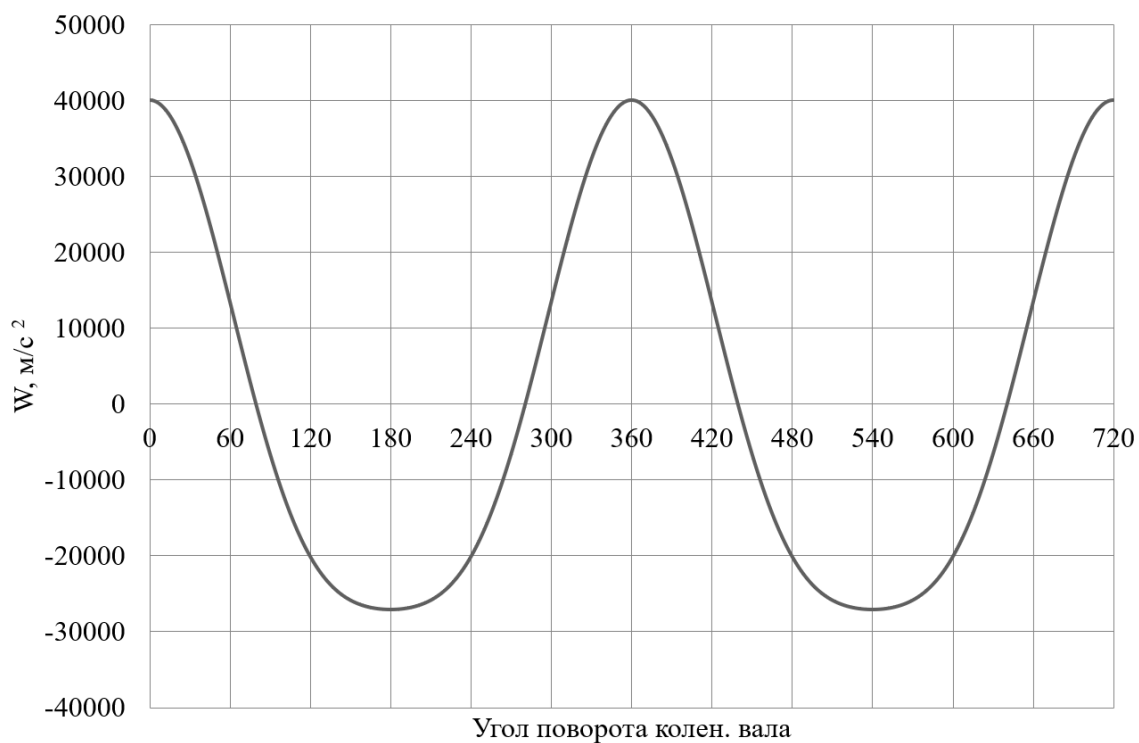


Рисунок 11 – Диаграмма изменения ускорения поршня

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 12000 мин^{-1} , для условий работы при варьируемом наддуве.

Результаты приведение масс кривошипно-шатунного механизма по двух массовой схеме показаны в таблице 13.

Таблица 13 – Приведение масс кривошипно-шатунного механизма

Параметр	Величина
Площадь поршня, м^2	0,003526
Удельная масса поршня, $\text{кг}/\text{м}^2$	100
Масса поршневой группы, кг	0,35257
Удельная масса шатуна, $\text{кг}/\text{м}^2$	150
Масса шатуна, кг	0,52885
Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца, кг	0,145
Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа, кг	0,383
Удельная масса одного колена вала, $\text{кг}/\text{м}^2$	140
Масса неуравновешенных частей одного колена вала, кг	0,4936
Массы, совершающие возвратно-поступательное движение	0,498
Массы, совершающие вращательное движение	0,87701
Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна, Н	-12866,1
Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа, Н	-16563
Центробежная сила инерции вращающихся масс, Н	-29429

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

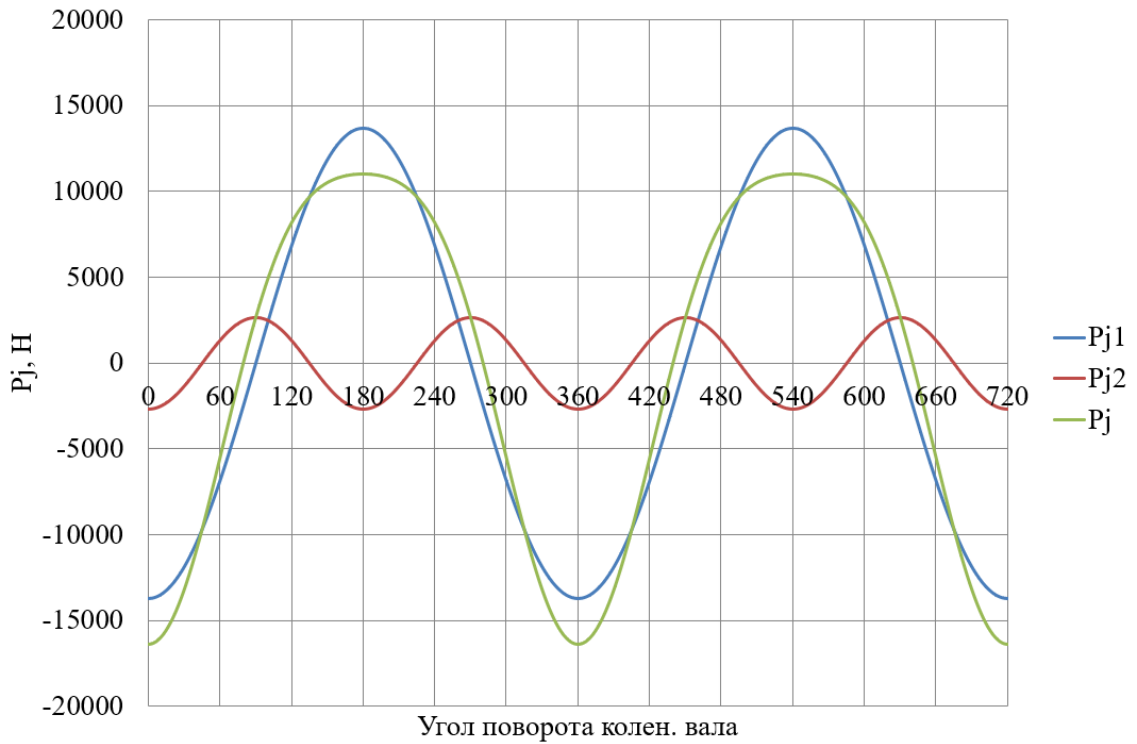


Рисунок 12 – Силы инерции возвратно-поступательного движения поршня и шатуна

На рисунках 13 и 14 приведено сравнение суммарных сил, действующих на поршневой палец двигателя при работе в базовом варианте двигателя и при наддуве со степенью повышения давления 1,4, 1,6 и 1,8, соответственно.

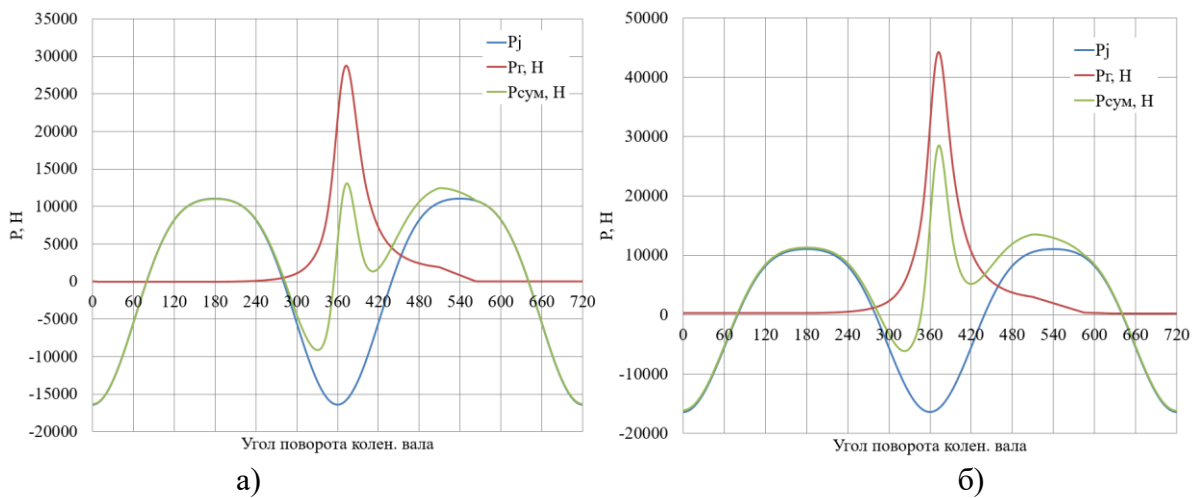


Рисунок 13 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец двигателя: (а) базовый двигатель и (б) при наддуве со степенью повышения давления 1,4

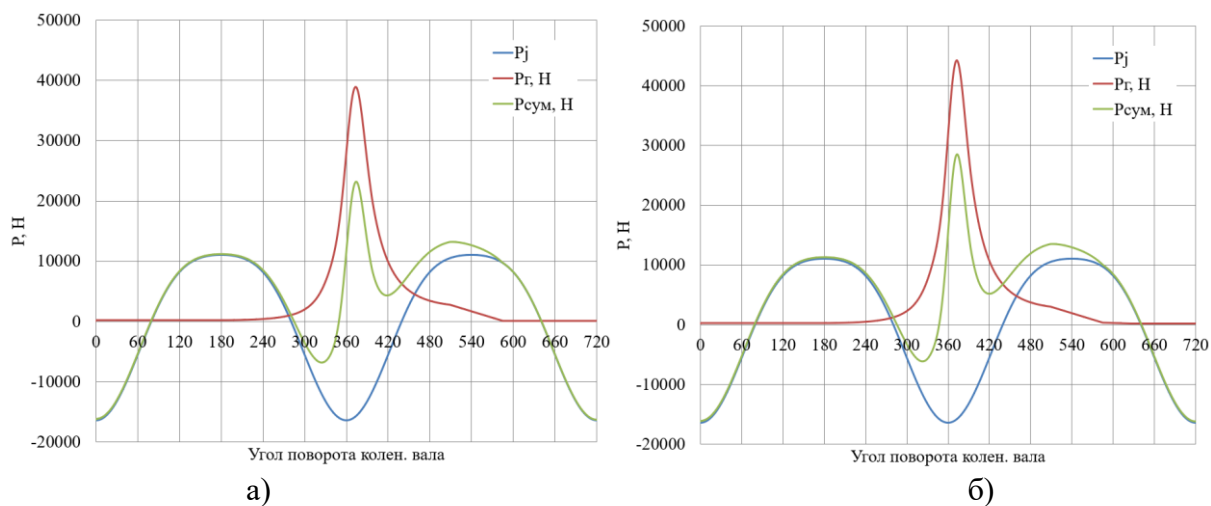


Рисунок 14 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец двигателя при наддуве со степенью повышения давления: (а) 1,6 и (б) 1,8

На рисунках 15 и 16 приведено сравнение сил, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки в базовом варианте двигателя и при наддуве со степенью повышения давления 1,4, 1,6 и 1,8, соответственно. Видим, что наддув приводит к значительному увеличению изгибающих коленчатый вал сил.

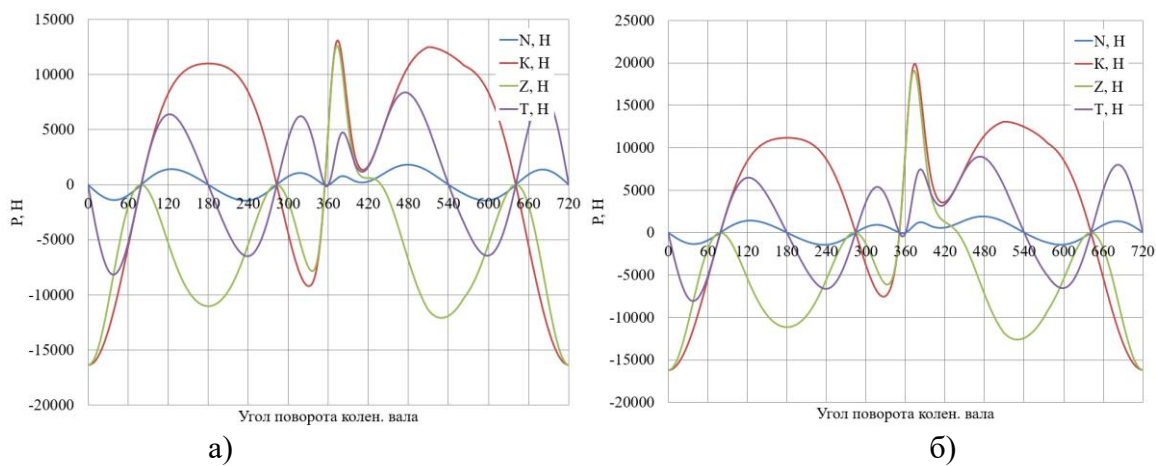


Рисунок 15 – Силы, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки двигателя: (а) базовый двигатель и (б) при наддуве со степенью повышения давления 1,4

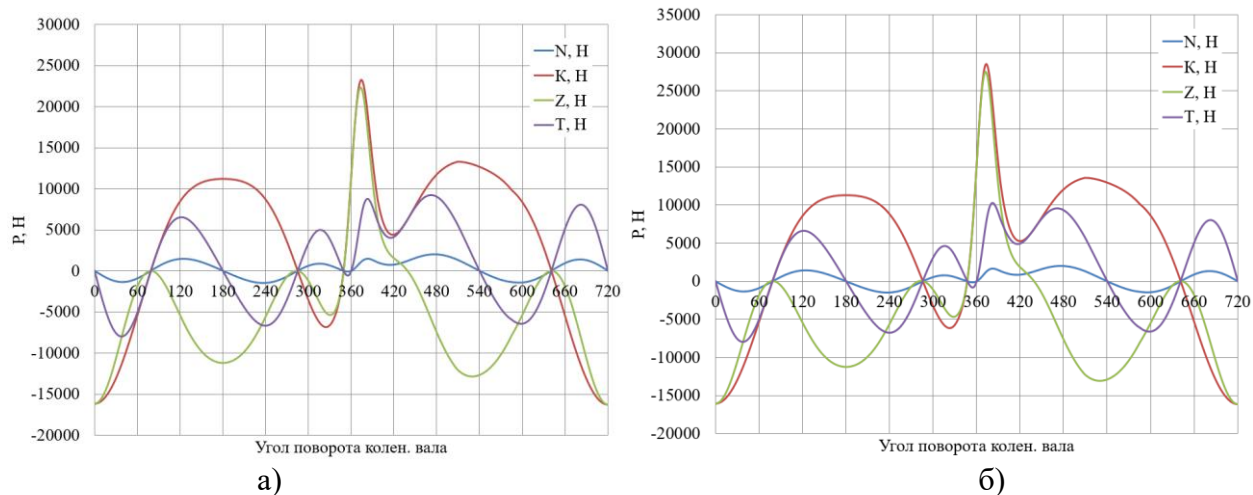


Рисунок 16 – Силы, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки двигателя при наддуве со степенью повышения давления: (а) 1,6 и (б) 1,8

На рисунках 17 и 18 приведено сравнение крутящего момента двигателя в базовом варианте двигателя и при наддуве со степенью повышения давления 1,4, 1,6 и 1,8, соответственно.

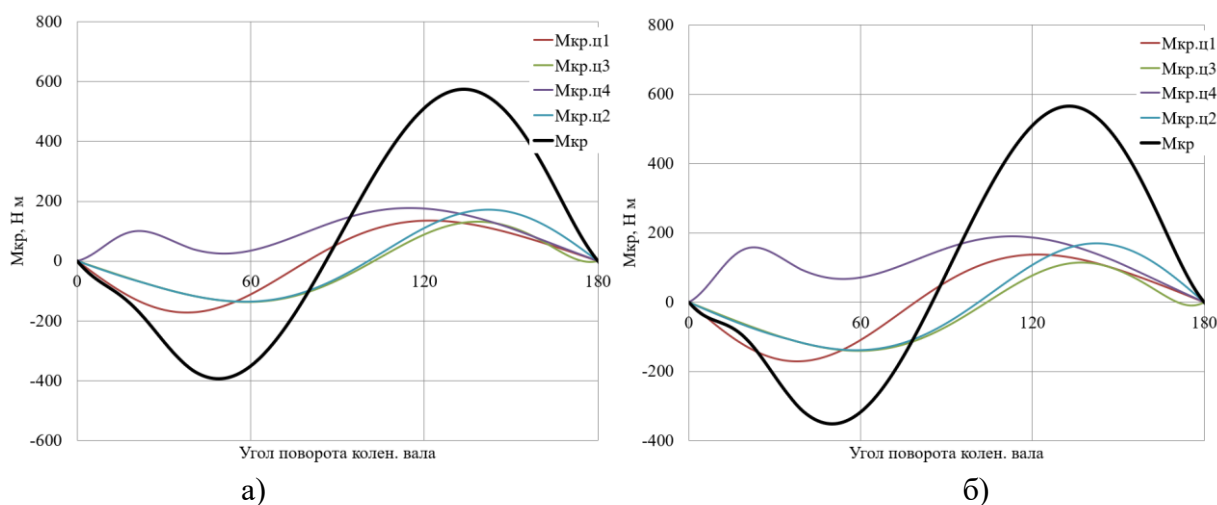


Рисунок 17 – График крутящего момента: (а) базовый двигатель и (б) при наддуве со степенью повышения давления 1,4

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.

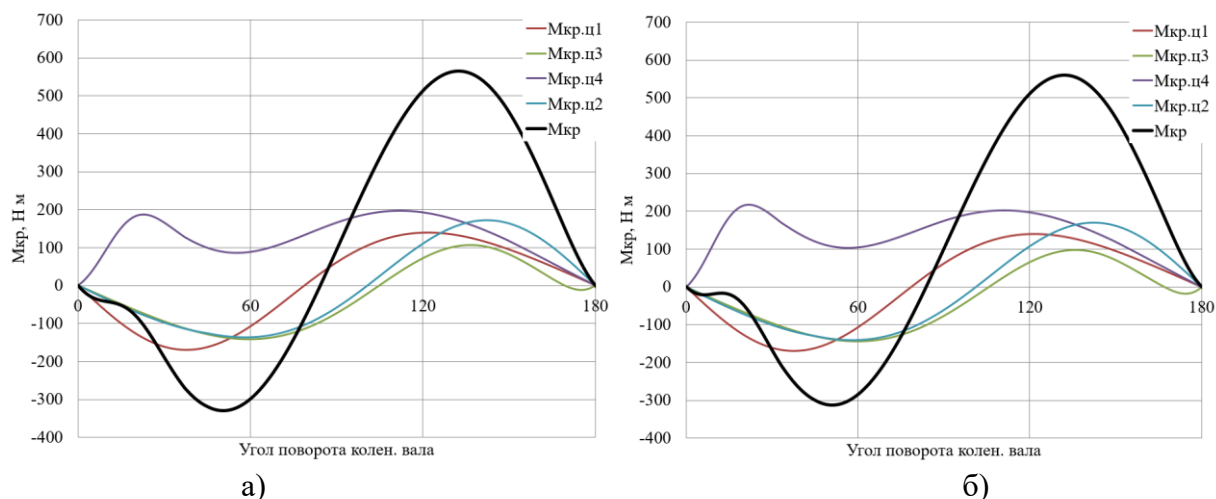


Рисунок 18 – График крутящего момента при степени сжатия при наддуве со степенью повышения давления: (а) 1,6 и (б) 1,8

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 в базовом варианте двигателя и при наддуве со степенью повышения давления 1,4, 1,6 и 1,8, соответственно. Видим, что с применением наддува резко возрастают нагрузки в зоне пикового давления 350 – 380 градусов ПКВ. Рост нагрузки составляет 16000 Н, что составляет 50% нагрузки при работе атмосферного двигателя.

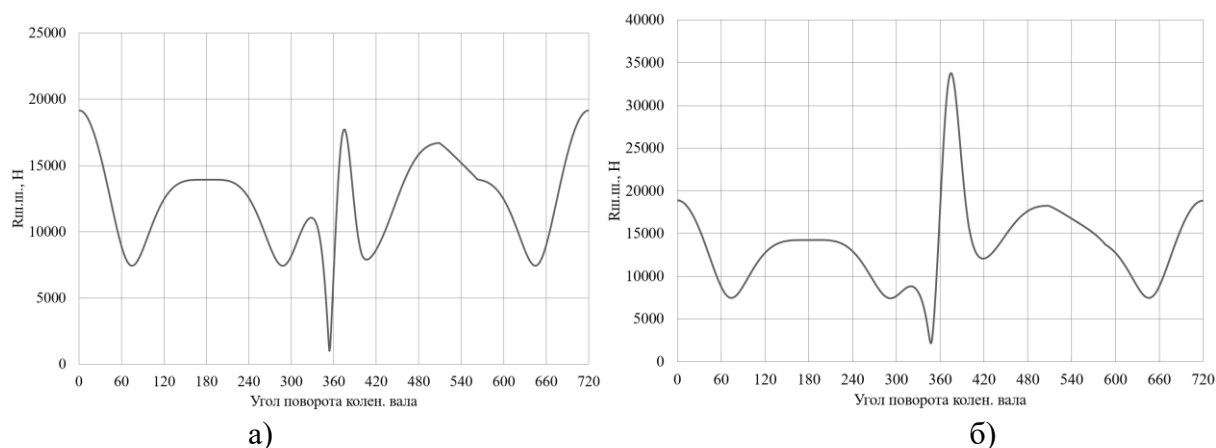


Рисунок 19 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку: (а) базовый двигатель и (б) при наддуве со степенью повышения давления 1,4

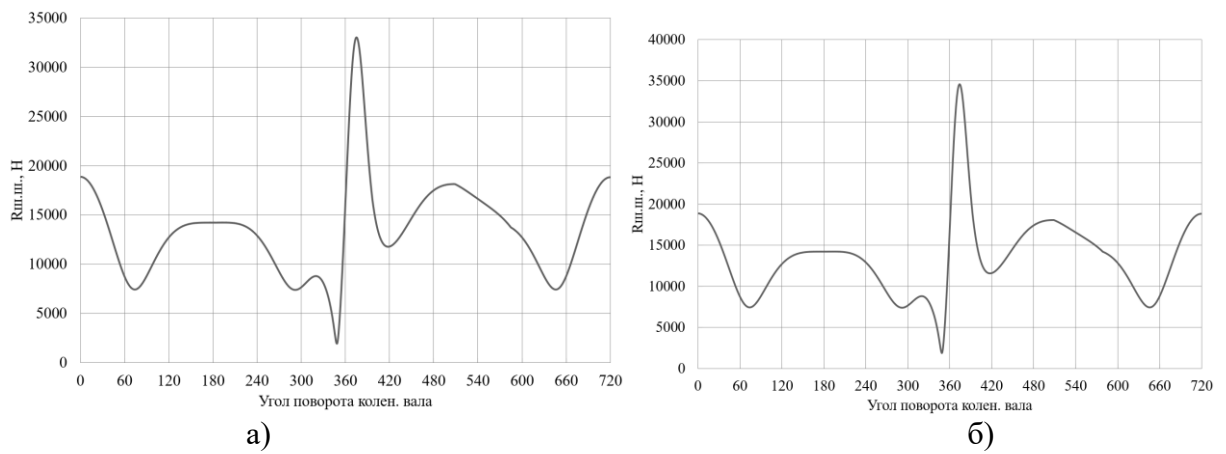


Рисунок 20 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку при наддуве со степенью повышения давления: (а) 1,6 и (б) 1,8

На рисунках 21 и 22 приведено сравнение суммарной силы, действующую на шатунную шейку в полярных координатах в базовом варианте двигателя и при наддуве со степенью повышения давления 1,4, 1,6 и 1,8, соответственно. Видим, что с наддувом, происходит рост нагрузки на одном лишь участке шатунной шейки.

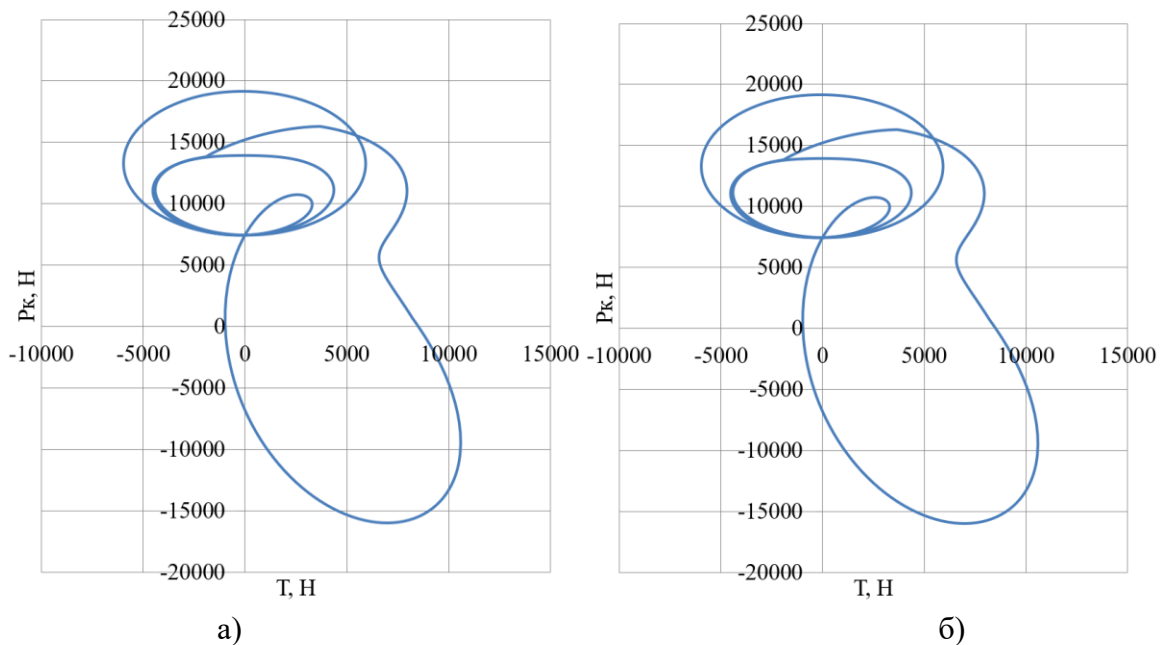


Рисунок 21 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку в полярных координатах: (а) базовый двигатель и (б) при наддуве со степенью повышения давления 1,4

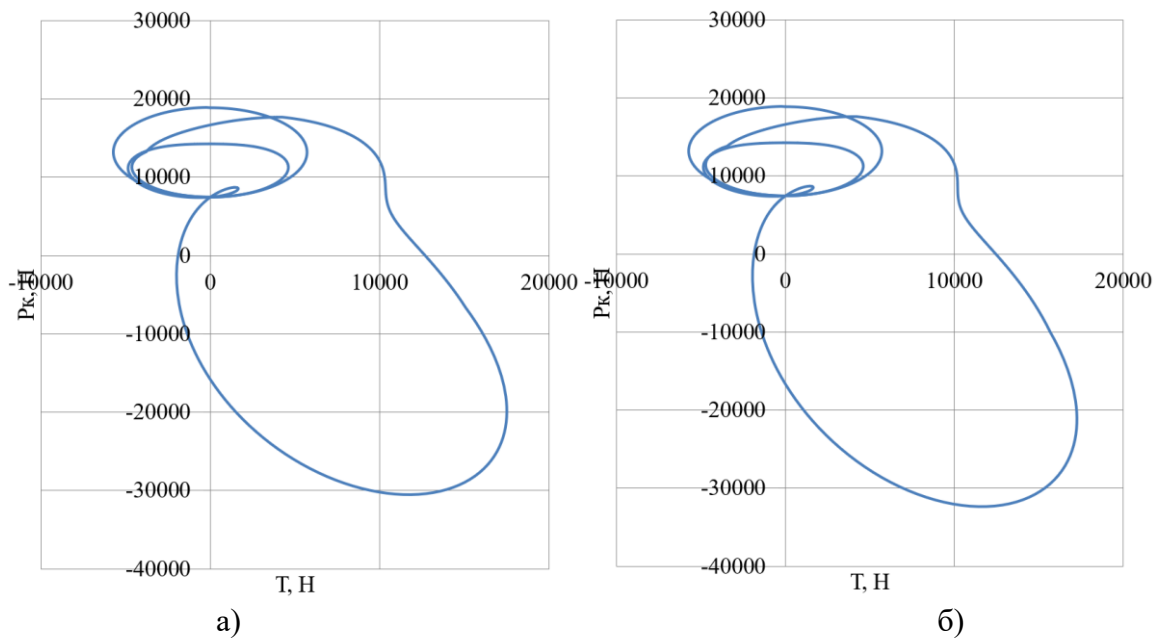


Рисунок 22 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку в полярных координатах при наддуве со степенью повышения давления: (а) 1,6 и (б) 1,8

На рисунках 23 и 24 приведено сравнение суммарных сил, действующих на коренные шейки в прямоугольных координатах в базовом варианте двигателя и при наддуве со степенью повышения давления 1,4, 1,6 и 1,8, соответственно.

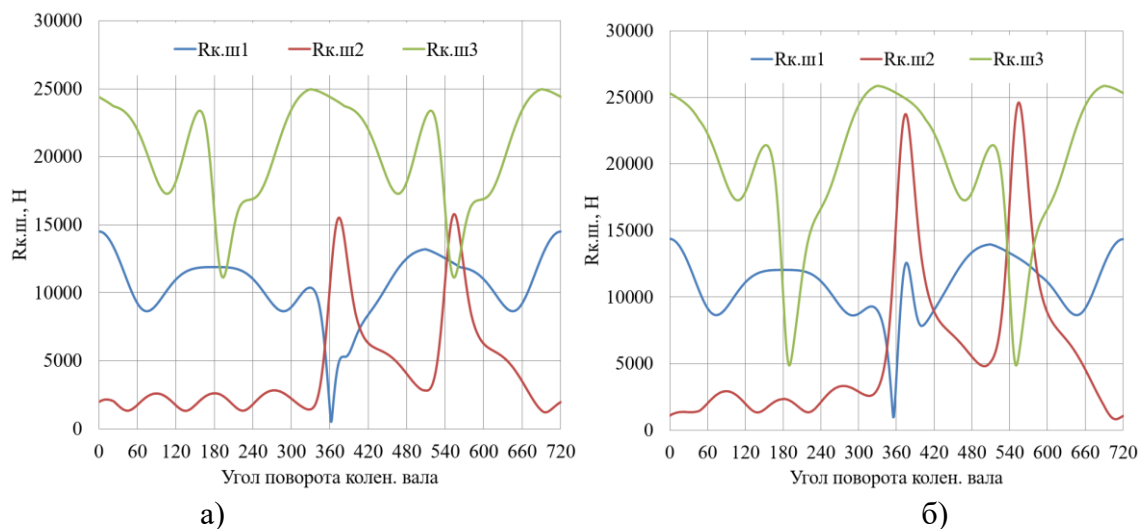


Рисунок 23 – Суммарные силы, действующие на коренные шейки в прямоугольных координатах: (а) базовый двигатель и (б) при наддуве со степенью повышения давления 1,4

Видим, что с наддувом, также растут нагрузки в зонах действия максимального давления. Видно, что имеются зоны низких нагрузок в

независимости от степени наддува, в этой зоне и рекомендуется расположить ось масляного канала.

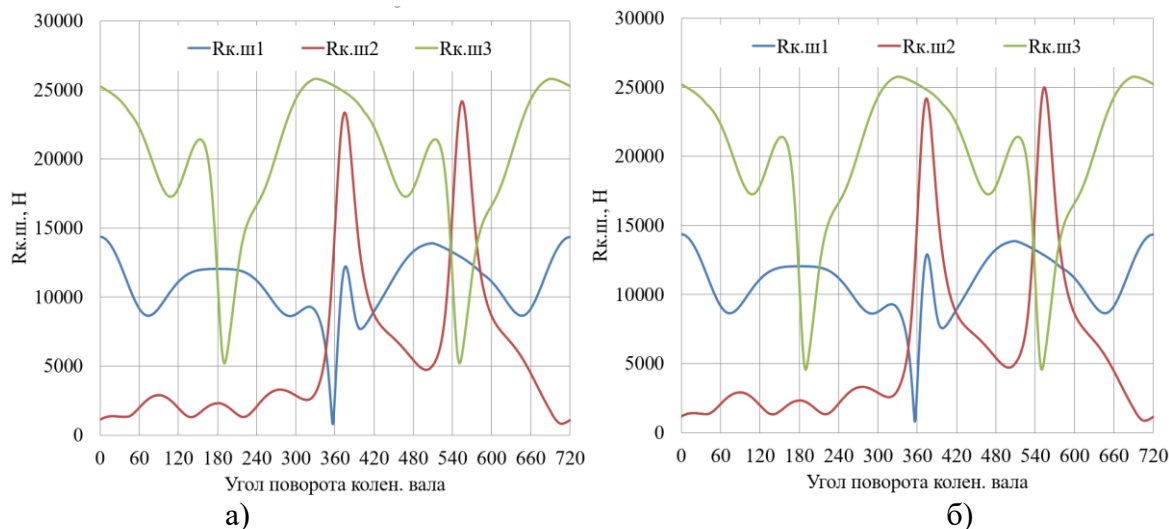


Рисунок 24 – Суммарные силы, действующие на коренные шейки в прямоугольных координатах при наддуве со степенью повышения давления: (а) 1,6 и (б) 1,8

На рисунках 25 и 26 приведено сравнение суммарных сил, действующих на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при работе в базовом варианте двигателя и при наддуве со степенью повышения давления 1,4, 1,6 и 1,8, соответственно.

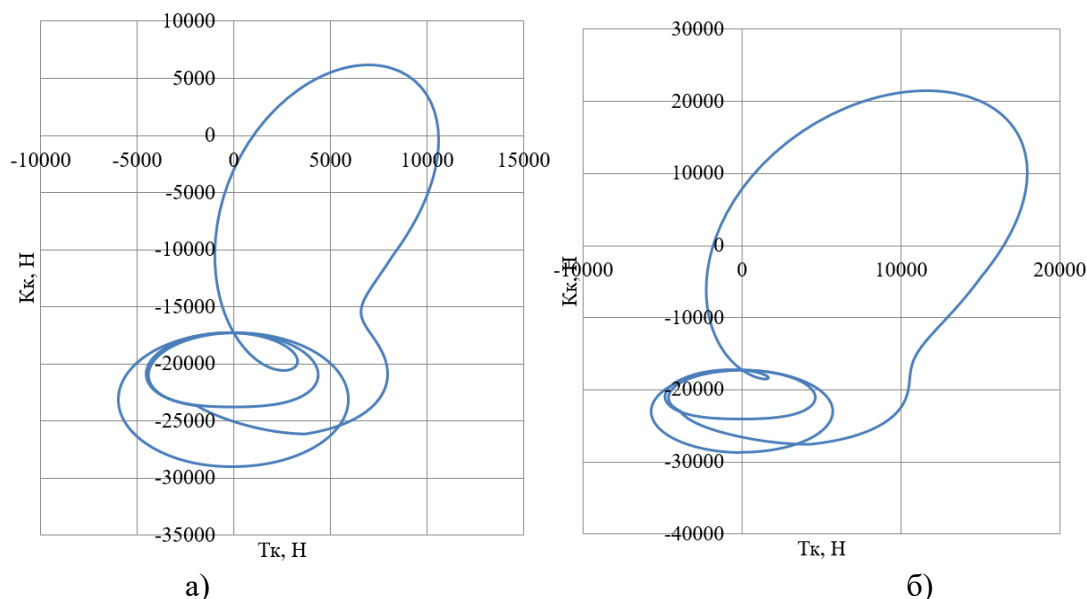


Рисунок 25 – Суммарные силы, действующие на 1-ю коренную шейку в полярных координатах: (а) базовый двигатель и (б) при наддуве со степенью повышения давления 1,4

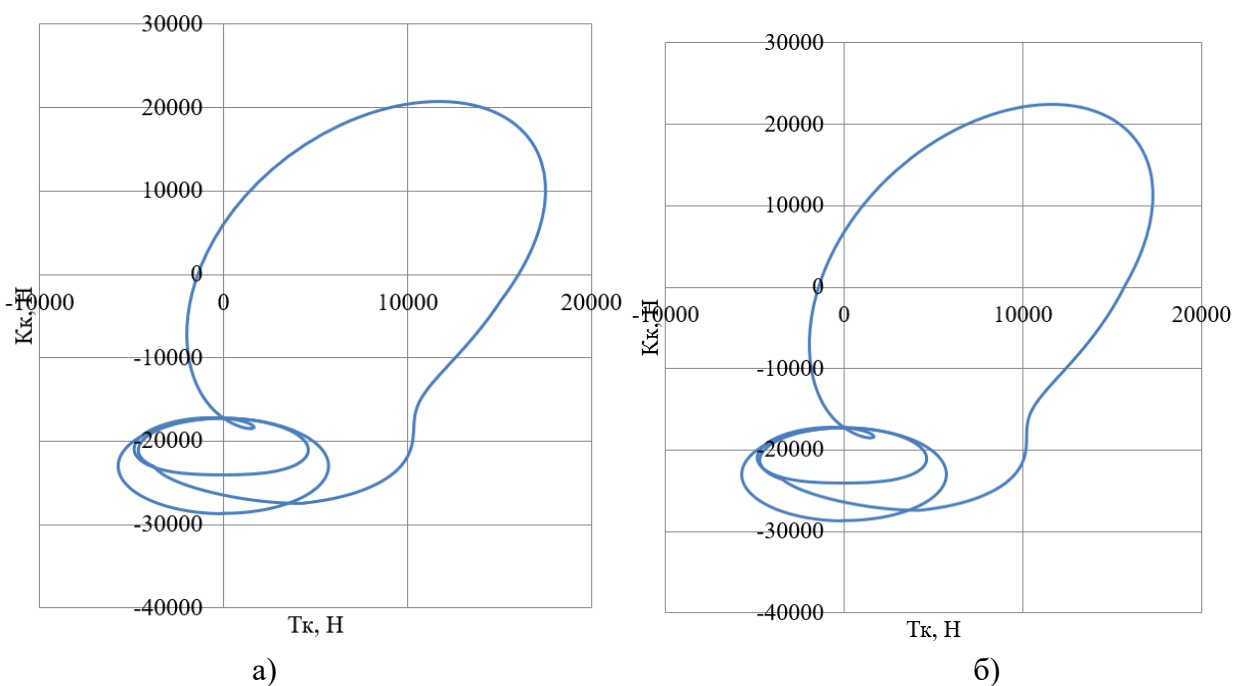


Рисунок 26 – Суммарные силы, действующие на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при наддуве со степенью повышения давления: (а) 1,6 и (б) 1,8

Видим, что с наддувом, 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 наддува, в этой зоне и рекомендуется расположить ось масляного канала.

Выводы по 3-му разделу

Применение наддува повышает нагрузки на элементы КШМ, причем практически линейно в соответствии с ростом степени повышения давления. Одним из вариантов снижения нагрузок является снижение частоты вращения коленчатого вала.

4 Анализ степени повышения давления при наддуве на рабочий процесс ДВС с турбонаддувом

4.1 Влияния степени повышения давления при наддуве 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 условий применения наддува, а также значения максимального давления в цилиндре двигателя в районе 12 МПа. Это говорит о невозможности проведения нормального процесса сгорания без охлаждения наддувочного воздуха хотя бы до 40 °С.

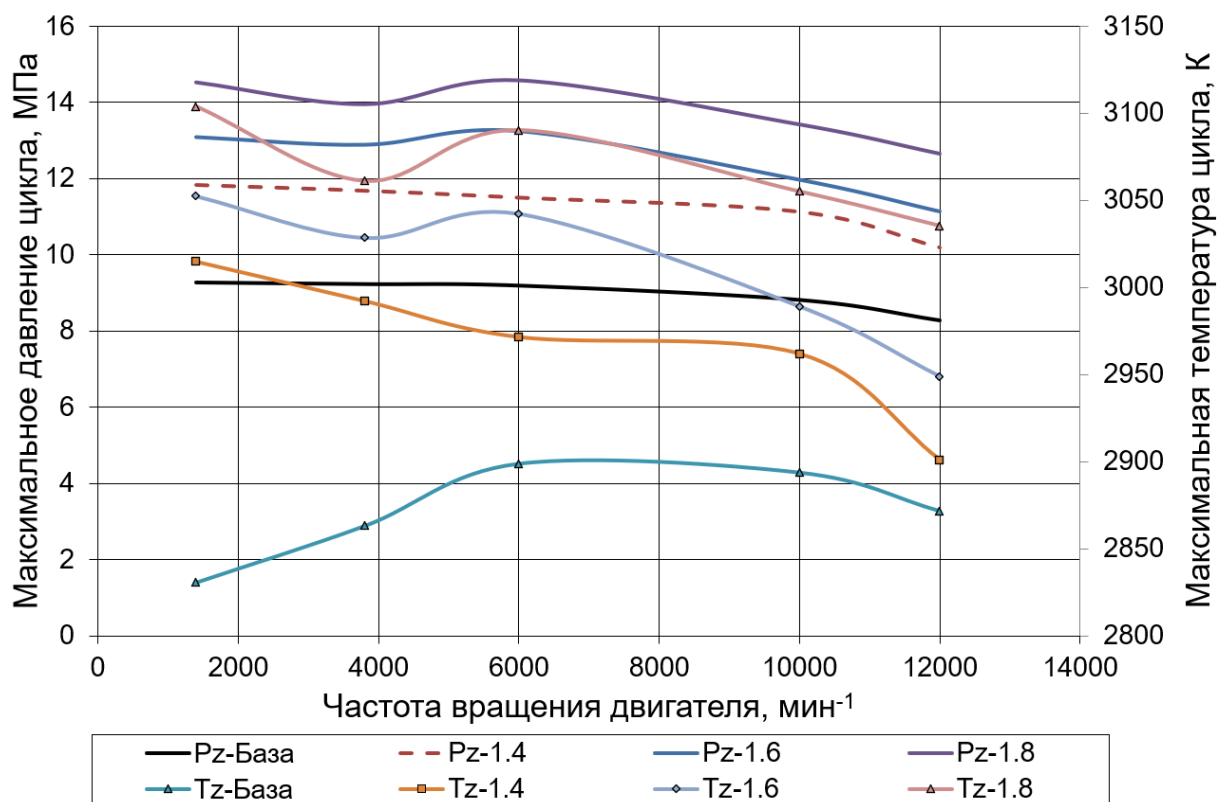


Рисунок 27 – Сравнение величины максимального давления и максимальной температуры в цилиндре двигателя при работе в базовом варианте и при наддуве со степенью повышения давления 1,4, 1,6 и 1,8, соответственно.

Для оценки токсичности проведем сравнение изменения температуры в процессе сгорания (рисунки 28 – 32).

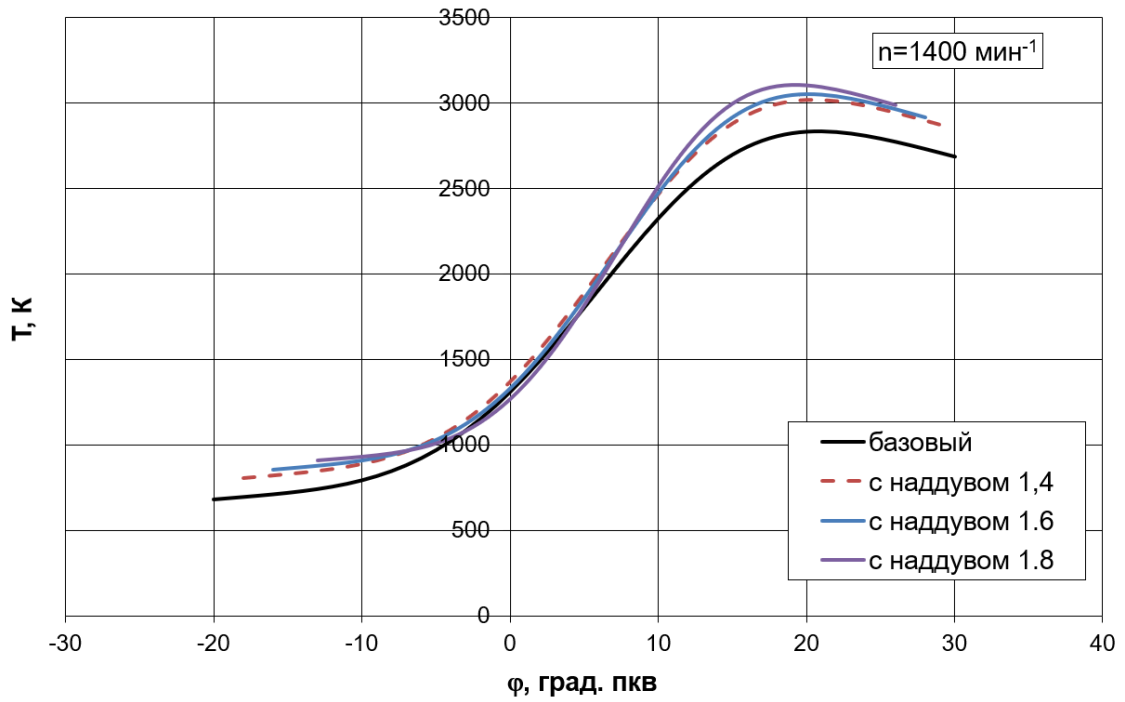


Рисунок 28 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 1400 мин⁻¹

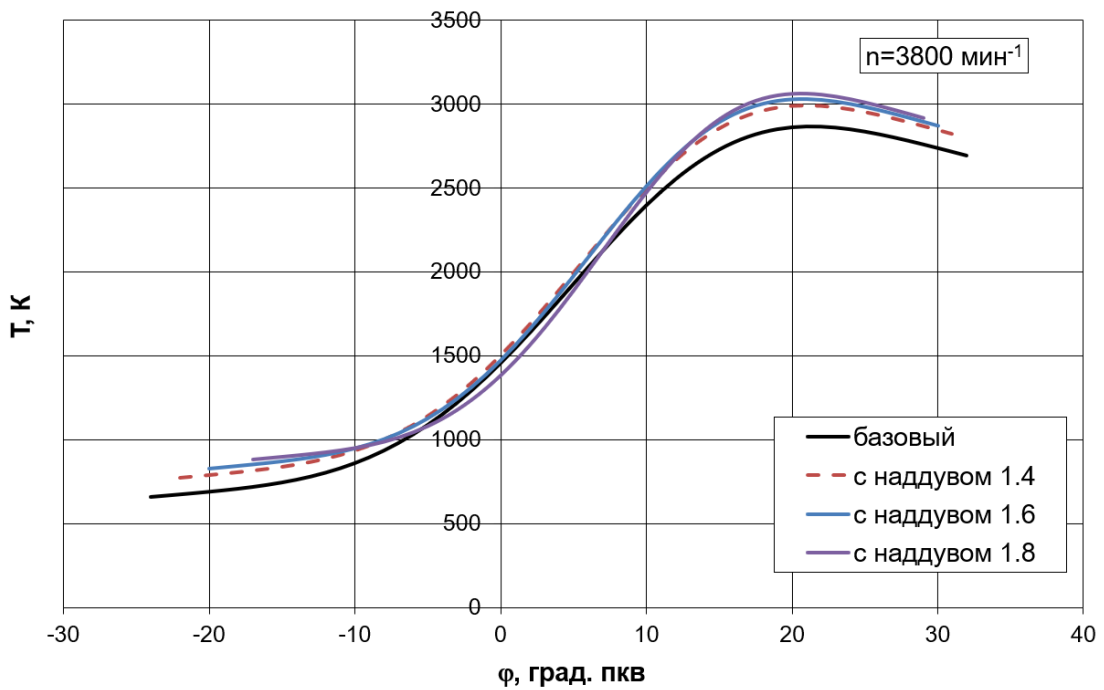


Рисунок 29 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 3800 мин⁻¹

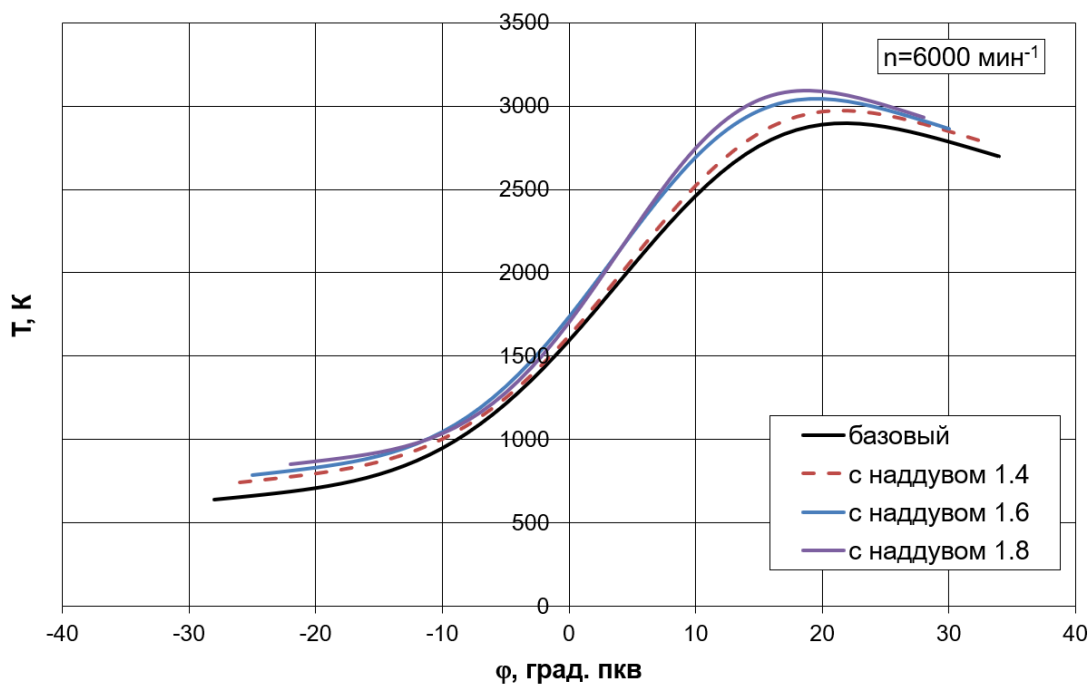


Рисунок 30 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 6000 мин^{-1}

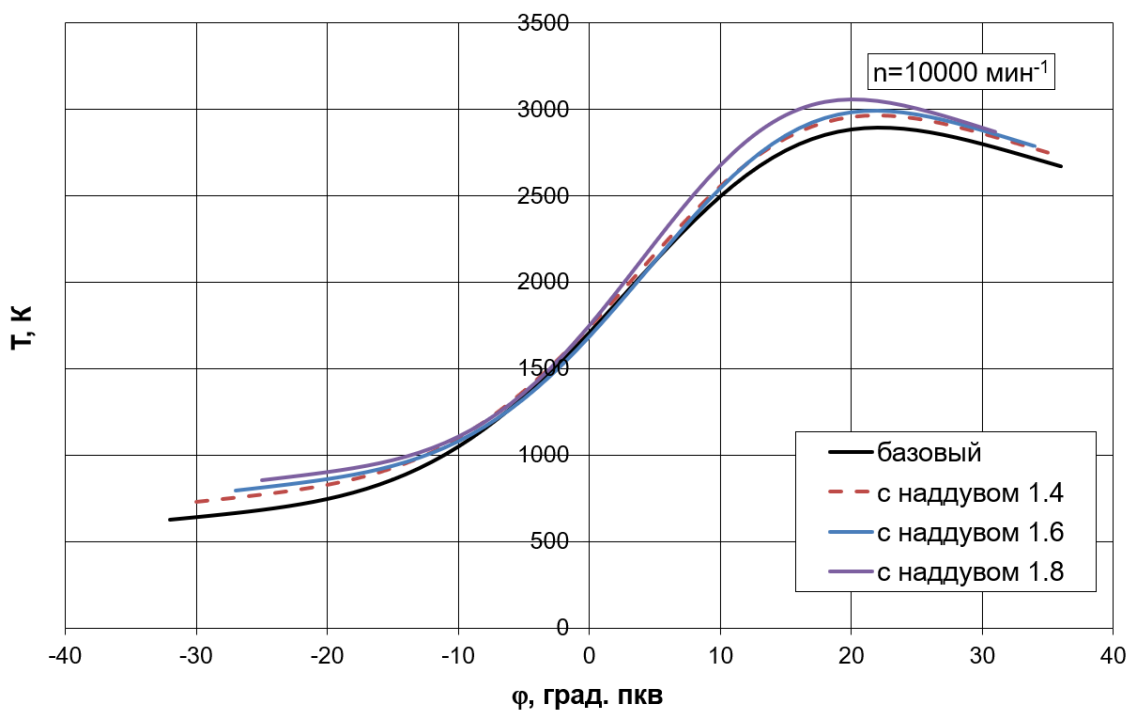


Рисунок 31 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 10000 мин^{-1}

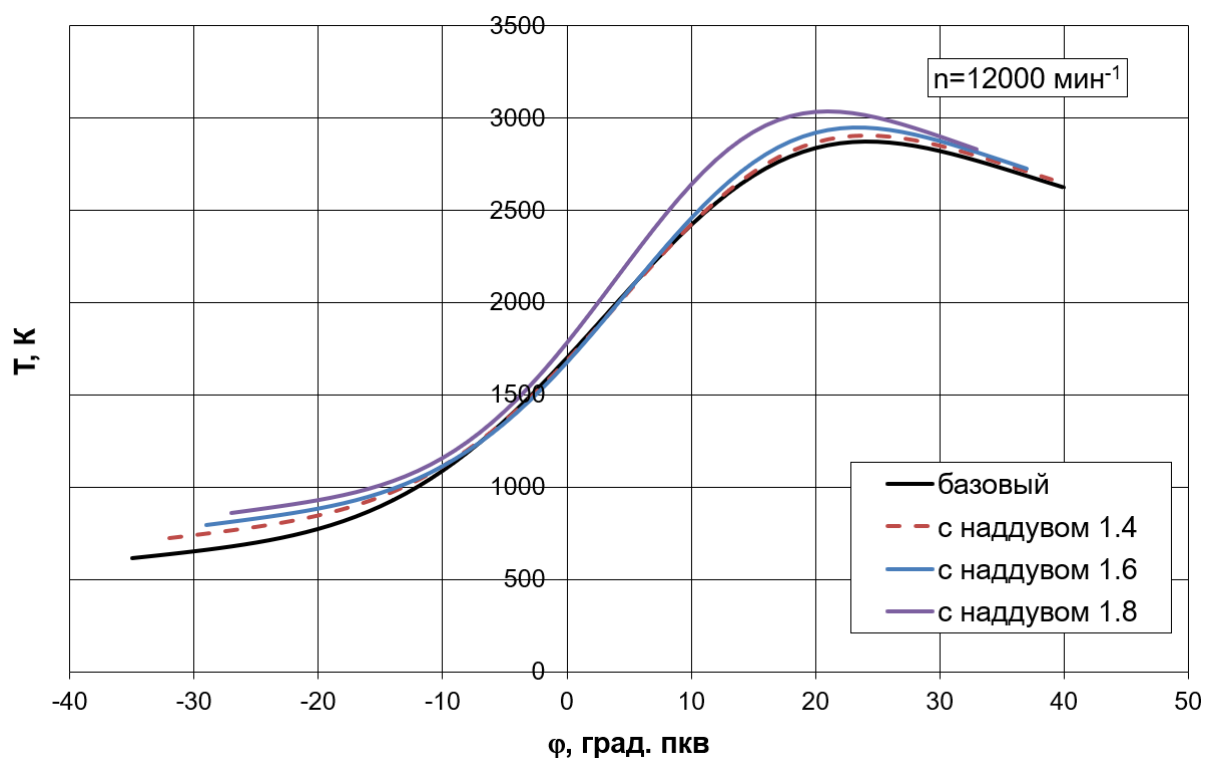


Рисунок 32 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 12000 мин^{-1}

Проводя анализ средней температуры в цилиндре двигателя во время сгорания по рисункам 28 – 32, можно отметить, необходимость уменьшения угла опережения зажигания, что позволит провести перевод 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 наддува 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 на высоких оборотах позволяет несколько увеличить степень наддува, что увеличит мощностные показатели.

4.2 Влияния степени повышения давления при наддуве на эффективные показатели цикла

Проводить анализ эффективных показателей работы двигателя правильнее всего по графическому изображению внешней скоростной характеристики (рисунки 33 – 36). Для атмосферного двигателя (рисунок 33), наблюдаем снижение крутящего момента при увеличении частоты вращения.

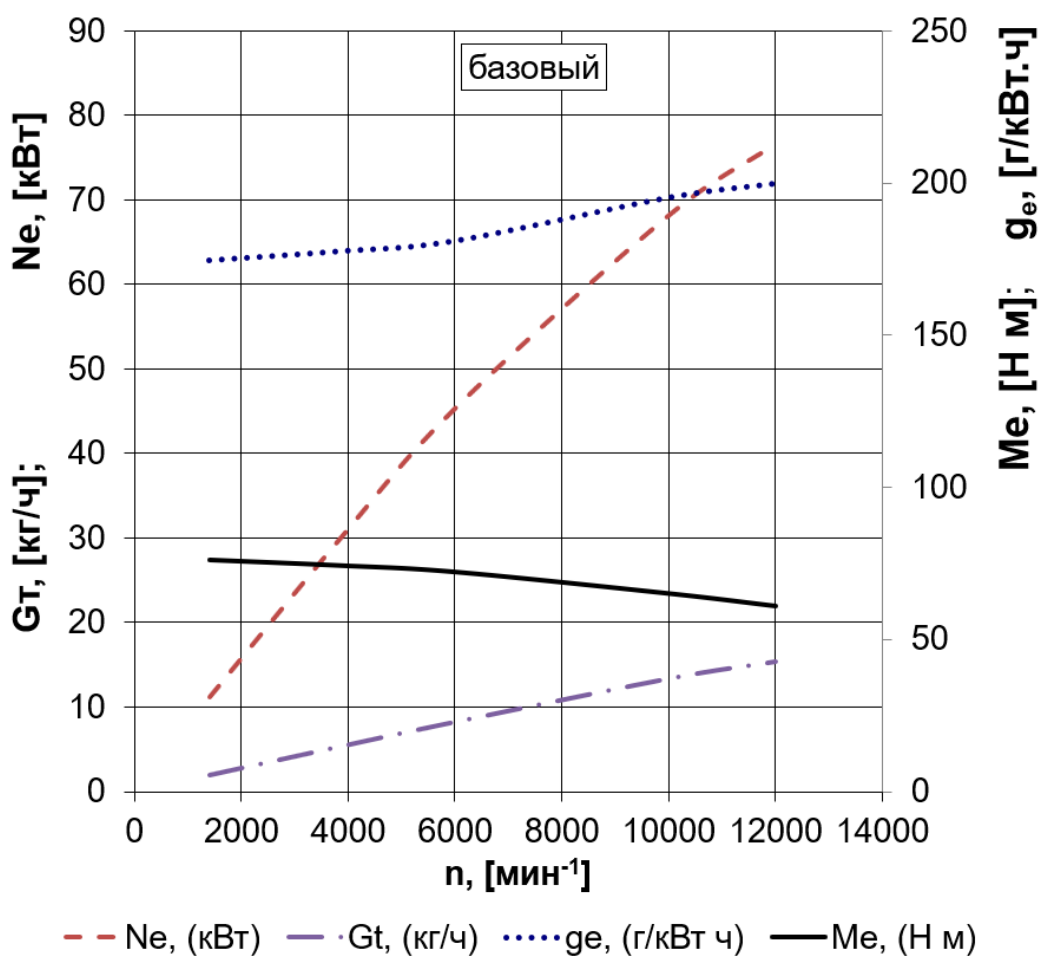


Рисунок 33 – Внешняя скоростная характеристика атмосферного базового двигателя

Для двигателя с наддувом со степенью повышения давления 1,4 (рисунок 4, видим снижение влияния частоты вращения на эффективные характеристики работы, при этом получаем в среднем 2% увеличение мощностных показателей при сохранении такого же расхода топлива.

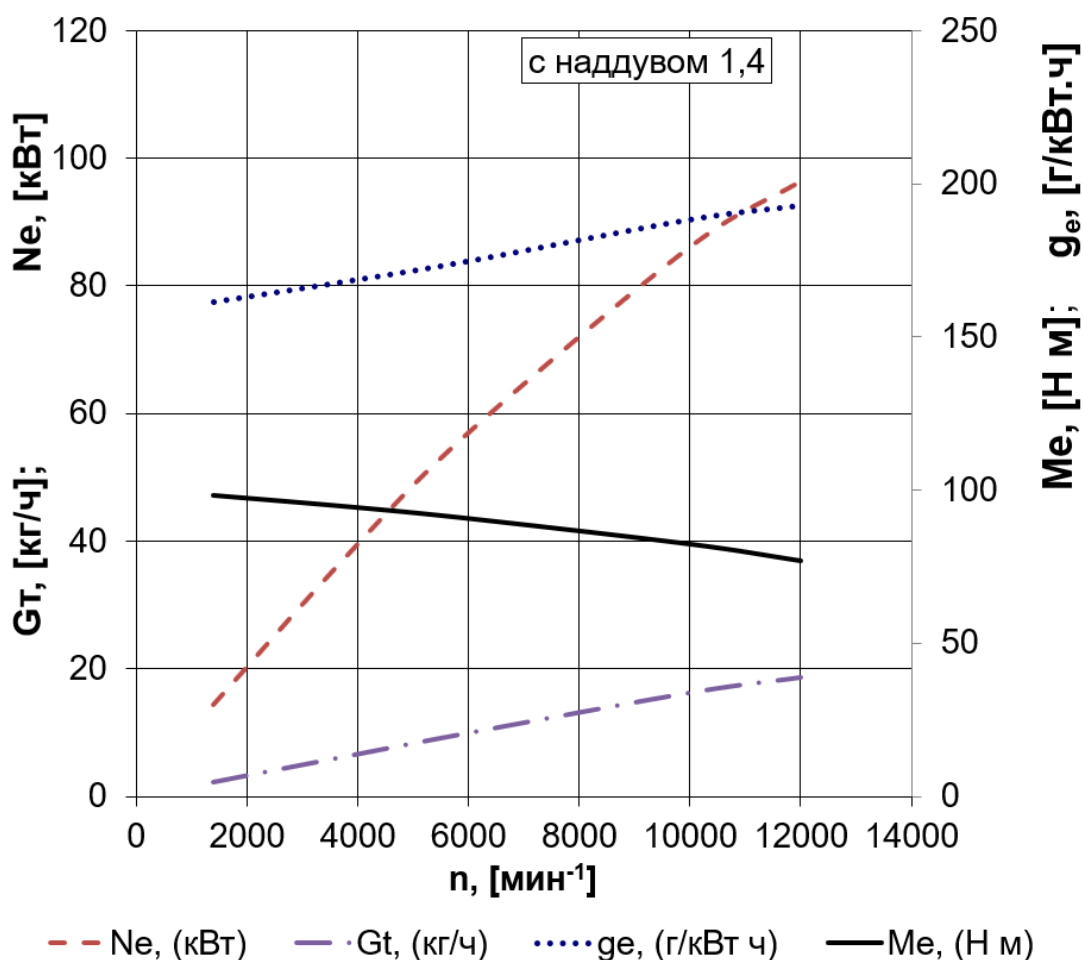


Рисунок 34 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с наддувом со степенью повышения давления 1,4

Для двигателя с наддувом со степенью повышения давления 1,6 и 1,8 соответственно (рисунок 35 и 36), видим некоторое выравнивание 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.

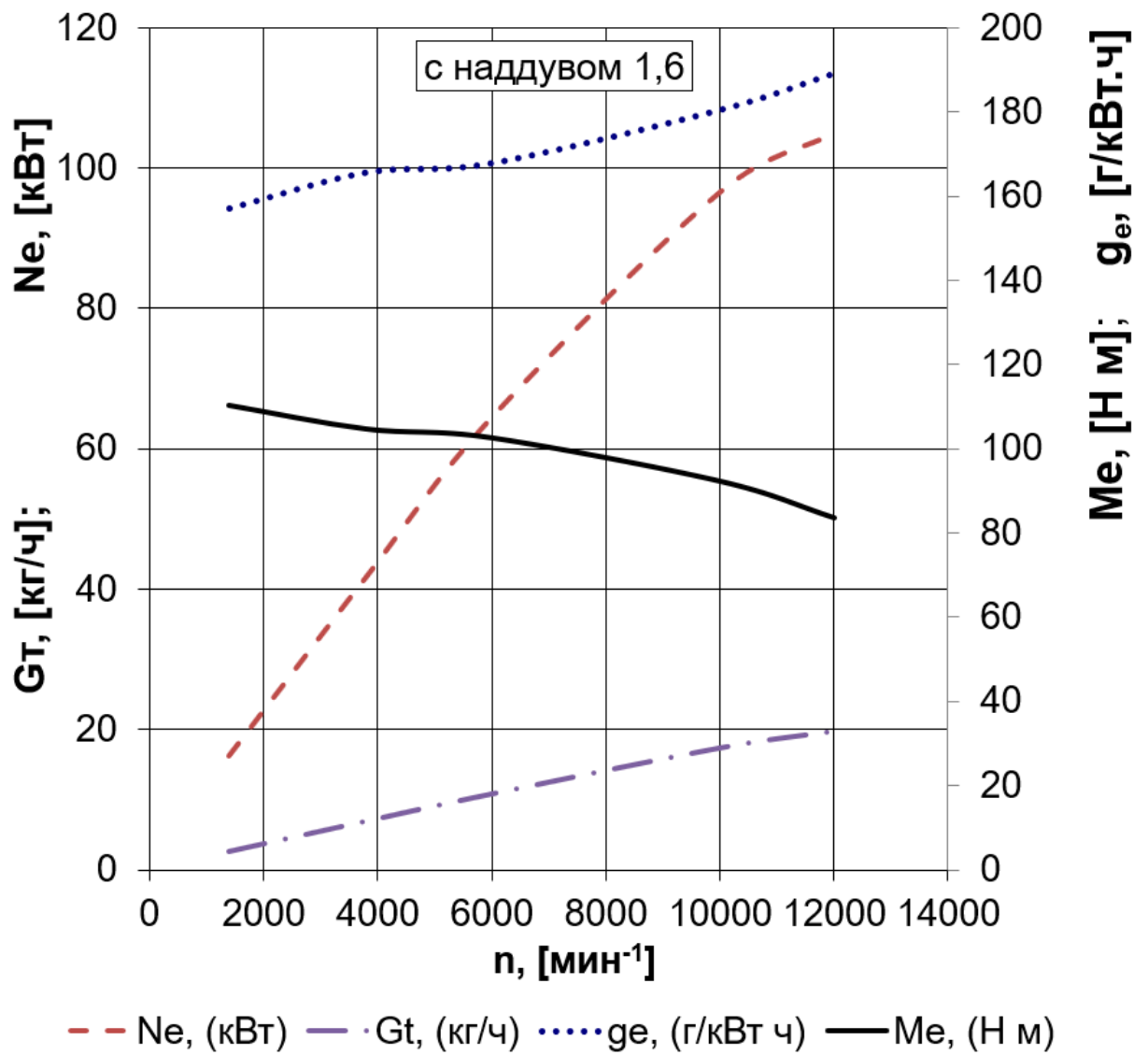


Рисунок 35 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с наддувом со степенью повышения давления 1,6

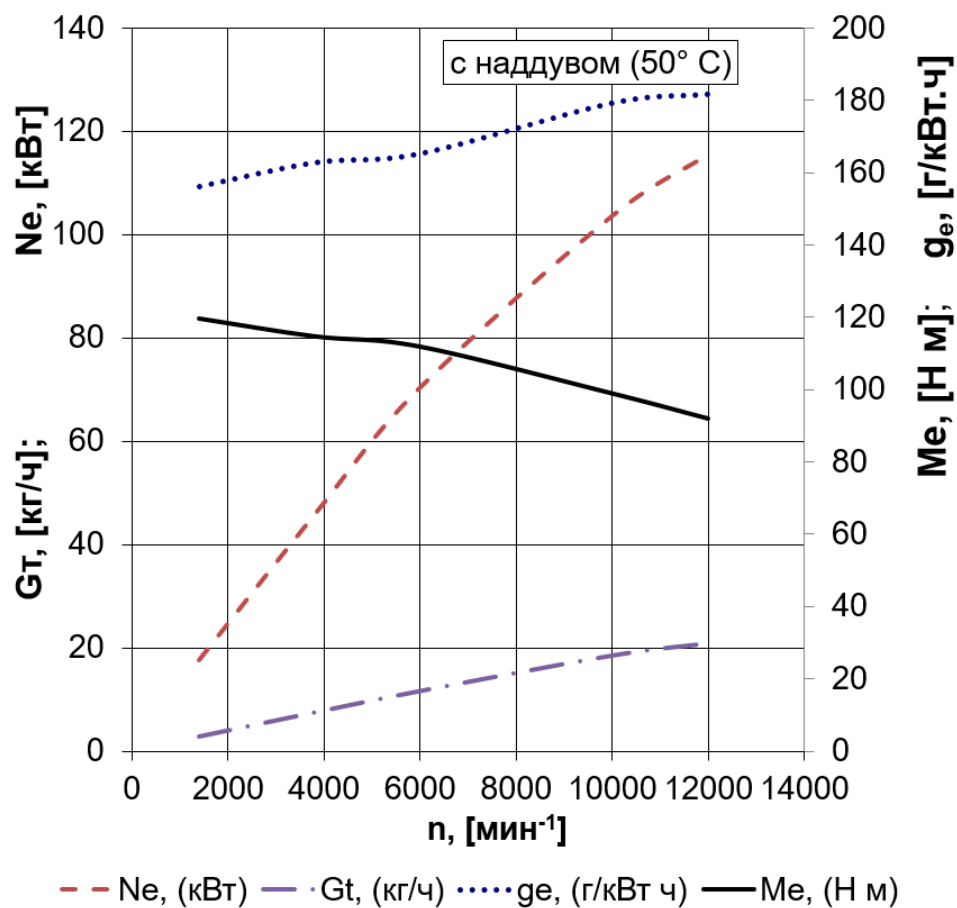


Рисунок 36 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с наддувом со степенью повышения давления 1,8

Выводы по 4-му разделу

Проведенный анализ показал, что для эффективной работы двигателя с наддувом необходимо осуществлять снижение тепловой напряженности деталей и термодинамического процесса сгорания за счет применения системы охлаждения наддувочного воздуха. Получено, что с при максимальной степени охлаждения наддувочного воздуха, эффективность процесса сгорания увеличивается не значительно, но при этом почти на 100 К снижается максимальная температура цикла, а для условий без охлаждения эта величина уже составляет 200 К, что принципиально важно для обеспечения бездетонационной работы двигателя. В тоже время не столь экстремальное снижение температуры до 40 ° С также имеет вполне жизнеспособные характеристики и не выходит за пределы устойчивой работы двигателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе проведен расчет основных параметров бензинового двигателя для легкового автомобиля с регулируемым турбонаддувом. Получены основные выводы по работе:

1. Выполнено проектирование двигателя с турбонаддувом и системой регулирования на основе электрического бустера на малых частотах вращения и резком разгоне и регулировочного клапана на турбине.
2. Анализ расчетов показал следующие результаты:
 - Мощность и крутящий момент возросли наддуве со степенью повышения давления 1,4 в среднем на 27%, со степенью повышения давления 1,6 – на 41% и со степенью повышения давления 1,8 – на 53%;
 - Эффективный КПД двигателя увеличился со степенью повышения давления 1,4 в среднем на 6%, со степенью повышения давления 1,6 – на 8% и со степенью повышения давления 1,8 – на 9%;
 - Удельный эффективный расход топлива снизился со степенью повышения давления 1,4 в среднем на 4,8%, со степенью повышения давления 1,6 – на 7,5% и со степенью повышения давления 1,8 – на 9%.

Выводы по 1-му разделу

Проведенный обзор современного состояния двигателей с турбонаддувом показал значительные возможности улучшения характеристик двигателя за счет использования современных технологий регулирования и согласования работы турбокомпрессора и двигателя.

Одним из перспективных направлений развития турбонаддува является применение бустерной системы с небольшим электрическим нагнетателем, что позволяет компенсировать потери производительности на малых частотах вращения и резком разгоне. Также активно развивается направление

даунсайзинг – показывающее возможности применения малолитражных двигателей с турбонаддувом в городских автомобилях, где мощностные показатели требуются только на стадии разгона.

Выводы по 2-му разделу

Применение наддува значительно повысило мощностные показатели работы двигателя. За счет варьирования степенью наддува можно снизить не только объем, но и частоту вращения двигателя, тем самым сохранив нагрузки и ресурс агрегата в допустимых пределах.

Выводы по 3-му разделу

Применение наддува повышает нагрузки на элементы КШМ, причем практически линейно в соответствии с ростом степени повышения давления. Одним из вариантов снижения нагрузок является снижение частоты вращения коленчатого вала.

Выводы по 4-му разделу

Проведенный анализ показал, что для эффективной работы двигателя с наддувом необходимо осуществлять снижение тепловой напряженности деталей и термодинамического процесса сгорания за счет применения системы охлаждения наддувочного воздуха. Получено, что с при максимальной степени охлаждения наддувочного воздуха, эффективность процесса сгорания увеличивается не значительно, но при этом почти на 100 К снижается максимальная температура цикла, а для условий без охлаждения эта величина уже составляет 200 К, что принципиально важно для обеспечения бездетонационной работы двигателя. В тоже время не столь экстремальное снижение температуры до 40 ° С также имеет вполне жизнеспособные характеристики и не выходит за пределы устойчивой работы двигателя.

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-litrovuj-dvigatel-vaz-21179>(дата обращения 29.05.18)
4. Макаренко Н.В. Мастеру об охране труда / Н.В. Макаренко//«Машиностроение» - Москва: 1990. - 128 с.
5. Орлин А.С., Круглов М.Г. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей. – М.: «Машиностроение», 1983.
6. Сидоров В.В. Положение о Мастере основного производственного цеха / В.В. Сидоров // ОАО АвтоВаз– Тольятти: 2003.
7. Смоленский, В.В. Автомобильные двигатели: курс лекций / В.В. Смоленский. – Тольятти: ТГУ, 2009. – 183 с.
8. Akmandor, I.S. Novel Thermodynamic Cycle / I.S. Akmandor, N. Ersöz// PTC, WO, 2004. 022919 AI. (March 18th 2004)
9. Baumeister, T. Mark's Standard Handbook for M. Engineer / T Baumeister // McGraw- Hill Inc., New York, 1966.
10. Beran, R. Entwicklung des H17/24G - Demerstenkoreanischen Gasmotor / R. Beran, T. Baufeld, H. Philipp, J. T. Kim, J. S.Kim // in: 11. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors. Graz. 2007
11. Bonnevie-Svendsen, A. Double-Vibe-Model for heat release in lean burn gas engines with prechamber ignition /A. Bonnevie-Svendsen, K. Boulouchos,

- Ch. Lämmle, I. Vlakos // in: 6. Dessauer Gasmotoren-Konferenz. Dessau-Roßlau. 2009
12. Carbot-Rojas, D. A survey on modeling, biofuels, control and supervision systems applied in internal combustion engines /D.A. Carbot-Rojas , R.F. Escobar-Jiménez, J.F. Gómez-Aguilar, A.C. Téllez-Anguiano // Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Michoacán, CP 58120, Mexico 2017-PP.21-26
 13. Clarke, J. M. Thermodynamic Cycle Requirements for Very High Rotational Efficiencies / J. M. Clarke // J. Mech. Eng. Sci. 1974
 14. Fuller, D.D. Theory and Practice of Lubrication for Engineers / D.D. Fuller // John Wiley & Sons Inc., New York, 1966
 15. Habermann K. Demonstration Vehicle with Continuously Variable Compression Ratio (VCR). FEV Magazine “Spectrum”, Issue 22, 2003 [Internet]. Available from: <http://www.fev.com> [Accessed: 5 October 2018]
 16. Haywood, R.W. A Critical Review of Theorems of Thermodynamics Availability // R.W. Haywood / J. Mech. Eng. Sci. vol.16 MIT Press, 1970.
 17. Huan,L.Study of air fuel ratio on engine performance of direct injection hydrogen fueled engine / L. Huan //Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Pahang, 26600 Pekan, Pahang, Malaysia 2016-PP.13-21
 18. Larsen GJ. Research Engine for Evaluating the Effects of Variable Compression Ratio (VCR) and/or Variable Valve Timing (VVT). SAE Paper No. 910053. Warrendale PA, USA: SAE International; 1991
 19. MCE-5 VCRI: Pushing back the fuel consumption reduction limits, MCE-5 Development 2010 [Internet]. Available from: www.vcri.eu [Accessed: 5 October 2018]
 20. Moteki K, Aoyama S, Ushijima K, Hiyoshi R, Takemura S, Fujimoto H, et al. A study of a variable compression ratio system with a multi-link mechanism. SAE Paper No. 2003-01-0921. Warrendale PA, USA: SAE International; 2003

21. Rabhi V, Beroff J, Dionnet F. Study of a Gear-Based Variable Compression Ratio Engine. SAE Paper No. 2004-01-2931. Warrendale PA, USA: SAE International; 2004
22. Renegar, D.C. The Quasiturbine / D.C. Renegar // USA Patent No:6629065 September 12th 2003
23. Rory, R. D. The Ball Piston Engine: A New Concept in High Efficient Power Machines / R. D. Rory // Convergence Eng. Corporation.
24. Shaik A, Shenbaga Vinayaga Moorthi N, Rudramoorthy R. Variable compression ratio engine: A future power plant for automobiles—An overview. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IMEchE); Part D: Journal of Automobile Engineering. 2007;221(D9):1159-1168
25. Stephen, R. T. An Introduction to Combustion / R.T.Stephen // McGraw-Hill Series in Mech. Eng. 1996.
26. SVC Variable Compression Engine, Linköping University, Sweden 2014 [Internet]. Available from: www.vehicular.isy.liu.se [Accessed: 5 October 2018]
27. Thomasson, A. Co-Surge in Bi-Turbo Engines - Measurements, Analysis and Control / Thomasson A, Eriksson L. // Control Engineering Practice, (32) 2014, 113-122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.08.001>
Copyright: Elsevier
28. Verhelst, S. A critical review of experimental research on hydrogen fueled SI engines / S. Verhelst, R. Sierens, S. Verstraeten // SAE. - 2006. - №2006-01-0430.
29. Woś P, Balawender K, Jakubowski M, Kuszewski H, Lejda K, Ustrzycki A. Design of Affordable Multi-Cylinder Variable Compression Ratio (VCR) Engine for Advanced Combustion Research Purposes. SAE Paper No. 2012-01-0414. Warrendale PA, USA: SAE International; 2012