

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 Проектирование трехцилиндрового бензинового двигателя

Студент

М.С. Врясов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, В.В. Смоленский

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

Тольятти 2023

АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа посвящена вопросу проектирования трехцилиндрового двигателя на альтернативных жидких топливах с возможным применением в малолитражных автомобилях или гибридных транспортных средствах.

Целью бакалаврского проекта исследования перспектив использования малолитражного трехцилиндрового двигателя на альтернативных жидких топливах в качестве силового агрегата на малолитражных автомобилях или гибридных транспортных средствах.

Поэтому в данном бакалаврской работе представлены результаты проектирования одноцилиндрового двигателя с анализом процесса сгорания на жидких альтернативных топливах (бензин и метанол), также выполнено имитационное моделирование в программе WAVE Ricardo 17.1 для оценки токсичности отработавших газов спроектированного двигателя. Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка состоит из аннотации, введения, 4 разделов, заключения с основными результатами и выводами, содержит 25 рисунков, 18 таблиц, списка использованных источников (65 источник). Основной текст изложен на 64 страницах.

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

ABSTRACT

Topic of the bachelor thesis: "Improving the efficiency of the fuel system for VAZ engines".

The fuel delivery system plays a crucial role in internal combustion engines. This thesis examines the shortcomings of the existing fuel delivery system and proposes a solution to address the high amplitude fuel pressure fluctuations.

This bachelor's thesis aims to improve the fuel delivery system for the VAZ 21129 gasoline engine. It consists of an explanatory note of 63 pages and a graphical part. The explanatory note covers the following topics:

- Analysis of the existing fuel delivery system;
- Thermal balance and thermal calculation of the engine;
- Kinematic and dynamic calculations were performed;
- Design of an external damper.

The graphic section contains six A1-sized sheets. They show longitudinal and transverse sections of the engine, three diagram sheets, and detailed drawings of the proposed fuel delivery system.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Проблемы применения альтернативных топлив в двигателях с искровым зажиганием	5
1.1 Спирты как топливо для двигателей внутреннего сгорания	5
1.2 Проблемы использования метанола в двигателях внутреннего сгорания	10
1.3 Смесевое топливо М85 (метанол и бензин)	13
1.4 Исследование альтернативных видов топлива в бензиновых двигателях с непосредственным впрыском топлива в цилиндр (GDI)	14
1.5 Гибридные силовые установки.....	18
2 Тепловой расчет проектируемого двигателя	25
2.1 Тепловой расчет трехцилиндрового двигателя при работе на бензине	25
2.2 Тепловой расчет трехцилиндрового двигателя на метаноле	30
3 Кинематический и динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя	36
3.1 Кинематический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя.....	36
3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя.....	38
4 Анализ токсичности отработавших газов при работе трехцилиндрового двигателя на бензине и метаноле	44
Заключение	56
Список используемых источников	58

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильная промышленность пережила огромный рост с увеличением мобильности людей. Транспорт рассматривается как основная необходимость и удобство. Однако использование автомобилей на обычном топливе, таком как бензин, оказывает пагубное воздействие на окружающую среду в виде загрязнения воздуха. Кроме того, запасы ископаемого топлива истощаются угрожающими темпами, что, по-видимому, приводит к увеличению стоимости этого топлива. Растущая забота об окружающей среде привели к энергетическим реформам и исследованиям по сокращению использования автомобильного топлива. Новые автомобильные технологии, позволяющие транспортным средствам работать на возобновляемых и альтернативных источниках энергии, рассматриваются, разрабатываются и создаются прототипы. Основное внимание в них уделяется повышению эффективности двигателей, сокращению выбросов и, если возможно, устранению их без ущерба для существующего пробега и комфорта.

1 Проблемы применения альтернативных топлив в двигателях с искровым зажиганием

1.1 Спирты как топливо для двигателей внутреннего сгорания

1.1.1 Этанол

Этанол можно производить из сельскохозяйственных продуктов, таких как сахарный тростник, кукуруза, картофель и т.д. Преимущество использования первичных спиртов в качестве топлива заключается в том, что они могут производиться внутри страны и могут снизить выбросы СО и НС. Спирты, как правило, намного более эффективны и обеспечивают более чистые характеристики горения по сравнению с топливом на основе нефти, таким как бензин. Они имеют более высокое октановое число, что позволяет разрабатывать специализированные двигатели на этаноле для более высоких степеней сжатия, не опасаясь детонации. Однако использование этанола оказывает дополнительное давление на и без того скудную доступность продуктов питания из-за диверсификации земель для производства этанола. Следовательно, необходимо изучить альтернативные ресурсы для производства спирта, чтобы сделать его устойчивым топливом.

1.1.2 Метанол

На протяжении всей истории производства энергии из углеродных источников наблюдается постоянный переход к низкоуглеродным видам топлива (более низкое соотношение С/Н). Переход от топливной древесины к ископаемому углю с последующим переходом на нефть и, наконец, на природный газ в настоящее время, предполагает естественную адаптацию первичного топлива, богатого водородом, такого как метанол. Преимущества метанола включают более низкие выбросы, улучшенный тепловой КПД двигателя при торможении и меньшую опасность возгорания из-за меньшего диапазона воспламеняемости по сравнению с бензином. Метанол можно производить из малоценных сельскохозяйственных отходов, биомассы и

других углеродсодержащих первичных источников, таких как природный газ, уголь и т.д.

По данным Института метанола США, двигатели, работающие на метаноле, демонстрируют прирост энергоэффективности на 50% по сравнению с бензином. Поэтому метанол широко используется в автоспорте.

Излишки метана можно использовать для производства метанола для транспорта, потенциально снижая выбросы парниковых газов. CO₂, образующийся при сжигании метанола, используется заводами и за короткий период времени превращается обратно в сельскохозяйственные отходы, которые в дальнейшем можно использовать для производства метанола. Таким образом, метанол имеет гораздо более короткое время рециркуляции по сравнению с ископаемым топливом, что делает его возобновляемым топливом. При производстве метанола из сельскохозяйственных и муниципальных твердых отходов (ТБО) будут использоваться эти ресурсы, которые в противном случае сбрасываются на свалки и водоемы или сжигаются. Все эти средства экологически небезопасны. Также уголь можно превратить в метанол в процессе газификации и использовать в транспортном секторе в качестве топлива.

В отличие от КППГ или водорода, метанол не требует какой-либо уникальной распределительной сети. Потенциально его можно откачивать от существующих бензиновых и дизельных бензонасосов, что позволяет сэкономить значительную сумму денег и избежать необходимости строительства дополнительной инфраструктуры. Знание свойств топлива необходимо для проектирования и проектирования систем сгорания, систем хранения топлива, а также систем обращения с топливом и его распределения.

Свойства топлива существенно влияют на характеристики двигателя, выбросы и сгорание; следовательно, важно понимать свойства метанола по сравнению с обычным топливом. В таблице 1 сравниваются некоторые

важные топливные свойства метанола, дизельного топлива, этанола и бензина.

Таблица 1 – Свойства метанола по сравнению с другими видами топлива

Свойство	Метанол	Спирт этиловый	Дизельное топливо	Бензин
Химическая формула	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	C ₈ -C ₂₅	C ₄ -C ₁₂
Углерод (мас.%)	38	52	85	86
Водород (мас.%)	12	13	15	14
Кислород (мас.%)	50	35	0	0
Молярная масса (кг/кмоль)	32	56	183	114
Плотность жидкости (кг/м ³)	798	794	840	740
Нижняя теплота сгорания (МДж/кг)	20.1	27.0	42.7	44
Температура кипения (°С при 1 бар)	65	78	180-360	27-245
Давление пара (бар при 20°С)	0.13	0.059	~0	0.25-0.45
Кинематическая вязкость (сСт при 20°С)	0.74	1.2	2.5-3.0	0.6
Объемный модуль (Н/мм ² при 20°С, 2 МПа)	823	902	553	1300
Цетановое число	<5	8	38-53	-
Октановое число	109	109	15-25	90-100
Температура самовоспламенения на воздухе (°С)	470	362	250-450	250-460
Теплота испарения (кДж/кг при 1 бар)	1089	841	250	375
Минимальная энергия зажигания (мДж при α=1)	0.21	0.65	0.23	0.8
Стехиометрическое соотношение воздух/топливо	6.5	9.1	14.6	14.7
Пиковая температура пламени (°С при 1 бар)	1890	1920	2054	2030
Пределы воспламеняемости (об.%)	6-36	3-19	0.5-7.5	1.4-7.6
Температура вспышки (°С)	12	14	52	-45

Метанол – это бесцветный первичный спирт без запаха, который является жидкостью при комнатной температуре и с ним можно обращаться, как и с другими видами топлива на нефтяной основе, такими как бензин и дизельное топливо.

Свойства горения. Метанол имеет более высокую температуру самовоспламенения по сравнению с бензином, что делает его более безопасным для транспортировки. Более высокая температура самовоспламенения означает, что в случае двигателя с SI может

использоваться более высокая степень сжатия, что потенциально может привести к более высокому уровню эффективного КПД. Октановое число метанола (109) значительно выше, чем у бензина (90). Это позволяет двигателю, спроектированному под работу на метаноле работать с более высокой степенью сжатия без детонации. Таким образом, он потенциально может быть более термодинамически эффективным и генерировать более высокую выходную мощность по сравнению с бензиновым двигателем аналогичной мощности.

Кислородное топливо. В молекулярной структуре метанола присутствует кислород, который отвечает за сокращение выбросов CO и HC, и он преобразует их в диоксид углерода (CO₂) и H₂O. Связанный с топливом кислород помогает добиться более полного сгорания во время такта расширения.

Скрытая теплота испарения. Метанол имеет значительно более высокую скрытую теплоту испарения по сравнению с бензином и дизельным топливом. Более высокая скрытая теплота испарения метанола имеет как преимущества, так и недостатки. Из-за более высокой скрытой теплоты парообразования метанол имеет превосходные характеристики охлаждения двигателя. Это дополнительно повышает эффективность использования топлива за счет работы двигателя на обедненной топливно-воздушной смеси. С другой стороны, более высокая скрытая теплота испарения метанола может потенциально привести к плохому холостому ходу и проблемам с холодным запуском. Если в транспортных средствах текущего поколения использовать 100% метанол или даже смеси метанола и бензина без надлежащей регулировки, могут возникнуть серьезные проблемы с холодным запуском и управляемостью.

Калорийность. Метанол имеет более низкую калорийность по сравнению с базовым бензином. Таким образом, необходимо впрыскивать большее количество топлива для достижения эквивалентной выходной мощности торможения от бензинового двигателя аналогичной мощности.

1.1.3 Метанол и биометанол (EN 228)

Этот первый в своем роде коммерческий завод в Нидерландах расщепляет сырой глицерин (остаток производства биодизельного топлива) в синтез-газ и синтезирует в метанол со скоростью 250 мл/год. Это также крупнейший современный завод по производству биотоплива в мире. Производство метанола из биомассы, т.е. целлюлозный материал технически осуществим, но в настоящее время ограничен.

В промышленных масштабах метанол преимущественно производится из природного газа путем реформинга газа с паром, а затем преобразования и дистилляции полученной смеси синтезированных газов для получения чистого метанола (Метанекс 3). В результате получается прозрачный жидкий органический химикат, растворимый в воде и легко биоразлагаемый. При производстве из природного газа обычно используется комбинация парового реформинга и частичного окисления с эффективностью преобразования энергии примерно до 70%. Это соответствует производственным выбросам около 24 кг CO₂/ГДж топлива и 68,8 кг CO₂/ГДж топлива при использовании ископаемого метанола, что в сумме дает 92,8 кг CO₂/ГДж топлива, что аналогично выбросам дизельного топлива. Метанол, полученный в результате газификации угля, зависит от дешевого, широкодоступного ресурса, но выбросы ПГ примерно в два раза выше, чем при сжигании природного газа, при 182-190 кг CO₂/ГДж топлива [24].

Еще одна интересная возможность производства метанола с низким выбросом CO₂ — непосредственно из водорода после электролиза с использованием геотермального электричества и CO₂ из того же геотермального источника. В настоящее время это тестируется в Исландии [24].

Хотя метанол сам по себе немного дороже СПГ, компромисс между метанолом и СПГ связан со сложностью топливной системы и стоимостью топлива [25]. Метанол имеет свойства, подобные свойствам метана, когда он впрыскивается в двигатель. Следовательно, метанол также используется в

двухтопливной концепции. Метанол имеет относительно низкую температуру воспламенения, токсичен при контакте с кожей, при вдыхании или проглатывании, а его пары плотнее воздуха [26]. Важно отметить, что к 2050 году ожидается, что биомасса в метанол/ДМЭ станет наиболее энергоэффективным способом получения энергии для транспорта [27].

1.2 Проблемы использования метанола в двигателях внутреннего сгорания

Хотя метанол имеет несколько преимуществ перед бензином, его немедленное использование в двигателях внутреннего сгорания является сложной задачей, поскольку есть несколько проблем, которые необходимо решить. Здесь обсуждаются основные проблемы использования метанола в качестве топлива в двигателях SI текущего поколения.

1.2.1 Совместимость материалов

Проблемы совместимости материалов при использовании метанола в системах подачи топлива очень важны. Компоненты, содержащие латунь и медь, подвержены сильной коррозии при использовании метанола. Однако компоненты из синтетической резины и уплотнения из неопрена и буна-N не повреждаются метанолом. Высокая летучесть и сцепление метанола с водой ухудшают сгорание и производительность двигателя. Когда смеси метанола и бензина хранятся в течение длительного времени, может произойти фазовое разделение метанола и бензина. Полярность метанола – основная причина его плохой совместимости с материалами. Метанол имеет тенденцию разъедать как металлы, так и эластомеры, используемые в системах подачи топлива и уплотнениях двигателя. Поляризация молекул метанола вызывает сухую коррозию металлов, которая дополнительно усиливается примесями хлорид-иона (Cl^-), присутствующими в топливе. Метанол – гигроскопичное соединение, и после поглощения влаги может вызвать влажную коррозию металлов. Комбинация метанола с другими примесями, такими как

этилацетат, уксусная кислота и хлорид, приводит к синергетическим эффектам, которые могут привести к более высокой степени коррозии, чем от одной примеси. Метанол очень агрессивен по отношению к меди, алюминию и магнию, но сталь и другие черные металлы подвержены меньшему влиянию. Таким образом, предпочтение стали алюминию при производстве компонентов, которые вступают в прямой контакт с метанолом, может в некоторой степени уменьшить проблемы, связанные с коррозией. В 2018 году опубликован полный список металлов и эластомеров, которые совместимы с метанолом и могут использоваться в двигателях. Тщательный выбор материалов для изготовления компонентов двигателя может решить проблему совместимости материалов при использовании метанола.

Химическая структура метанола (CH_3OH) содержит кислород, который отделяется от обычного топлива и вызывает износ, разрушение и коррозию компонентов двигателя.

Было проведено изучение коррозии стальной и алюминиевой подложки для бензина в качестве эталонного топлива и бензина с 15 и 85% метанола для чистой подложки и покрытий. Покрытия, нанесенные химическим способом на алюминий, сталь и анодированный алюминий, показали лучшую защиту от коррозии в условиях испытаний. Анодирование – это электрохимический процесс, при котором металлические поверхности превращаются в анодный оксид, который является коррозионноустойчивым и очень прочным. Таким образом, эти покрытия можно использовать для двигателей, работающих на метаноле (таблица 2).

1.2.2 Ограниченный рабочий диапазон

Метанол (20,1 МДж/кг) имеет половину теплотворной способности по сравнению с бензином (44 МДж/кг). Чтобы количественно оценить, для смеси М85, двигатель получает только 52% энергии бензина при том же количестве подачи. Эту проблему можно решить, впрыскивая большее количество топлива за цикл двигателя, чтобы ввести ту же энергию в цилиндр двигателя. Таким образом, для одинаковой выходной мощности в

двигателях, работающих на метаноле и бензине, одинаковой мощности количество впрыскиваемого метанола должно быть почти вдвое больше, чем количество впрыскиваемого бензина.

Таблица 2 - Коррозионные характеристики двигателя, работающего на метаноле

Материал/топливо	15% метанол	85% метанол
Сталь 1010	Умеренная скорость коррозии	Высокая скорость коррозии
Сталь Base 1010 с никелевым фосфорным покрытием	Отличная защита от коррозии	Отличная защита от коррозии
Нержавеющая сталь 304	Умеренная скорость коррозии	Более высокая скорость коррозии
Алюминий 356	Коррозия субстрата	Коррозия субстрата
Алюминий с фосфорным никелем 356	Защищен от коррозии	Небольшая коррозия
Анодированный алюминий 356	Защищен от коррозии	Небольшая коррозия

Чтобы поддерживать тот же запас хода, топливный бак автомобиля, работающего на метаноле, должен быть примерно в два раза больше, чем у базового автомобиля, работающего на бензине.

1.2.3 Холодный запуск

Холодный запуск – еще одна серьезная проблема, связанная с утилизацией метанола.

Основные факторы, приводящие к плохому запуску метанола из холодного состояния по сравнению с бензином, можно резюмировать следующим образом:

- Низкая удельная энергия: метанол имеет более низкую теплотворную способность (20 МДж/кг) по сравнению с бензином (45 МДж/кг). Следовательно, по сравнению с бензином, требуется испарение большего количества метанола для образования горючего заряда и выделения равного количества тепла в цикле двигателя.
- Скрытая теплота испарения: теплота испарения метанола (1089 кДж/кг) намного выше, чем у бензина (375 кДж/кг). Следовательно, требуются

более высокие затраты энергии для испарения метанола для эквивалентного высвобождения энергии в цикле двигателя.

- Однокомпонентное топливо: в отличие от бензина, метанол является однокомпонентным топливом без легколетучих компонентов. Наличие в бензине легколетучих компонентов значительно улучшает его пусковые характеристики при холодном пуске.
- Электропроводность: Метанол является довольно хорошим проводником электричества и может вызвать короткое замыкание в электродах свечи зажигания в случае намокания свечи зажигания, что необходимо учитывать.

1.3 Смесевое топливо М85 (метанол и бензин)

Добавление небольшого количества бензина к метанолу улучшает некоторые топливные свойства смеси, что делает метанол пригодным для использования в двигателях внутреннего сгорания. М85 – одна из таких типичных и популярных смесей метанол-бензин, содержащая 85% метанола и 15% бензина. В таблице 3 перечислены важные свойства М85 по сравнению с метанолом и бензином.

Таблица 3 – Сравнительные топливные свойства метанола, М85 и бензина

Свойства	Метанол	М85	Бензин
Стехиометрический AFR	6,5	7,62	14,7
Плотность при 15°C (г/см ³)	0,798	0,785	0,753
Скрытая теплота испарения (ккал /кг)	260,7	234	89,96
RON (октановое число по исследованию)	110	111	100
Давление паров по Рейду (RVP) (кПа)	31	60.4	61

Помимо улучшения видимости пламени метанола, бензин также улучшает его пусковые характеристики при холодном пуске. При смешивании бензина с метанолом в смесь добавляются летучие соединения и повышается давление паров. При добавлении небольшого количества

метанола к бензину давление паров по Рейду (RVP) увеличивается более чем на 30%, в результате чего значения выше, чем у базового бензина (61 кПа) и 100% метанола (31 кПа). RVP смесей метанола выше, чем у базового бензина для концентраций до 80% (об./об.).

1.4 Исследование альтернативных видов топлива в бензиновых двигателях с непосредственным впрыском топлива в цилиндр (GDI)

Из всех доступных топливных смесей E5 (5% этанола и 95% бензина по объему) в настоящее время широко распространен в Европе; Смесей E10 распространены повсеместно, а E15 находится на пути к рынку для новых автомобилей в США. Введение этанола в бензиновые топливные смеси приводит к увеличению энтальпии парообразования топлива. Более высокие энтальпии парообразования в некотором роде увеличивают эффект охлаждения заряда для топлива и улучшают объемный КПД. Однако охлаждение заряда и более низкая точка кипения этанола, которые способствуют меньшему образованию сажи, иногда могут играть противоположную роль и иметь конкурирующий эффект, который может привести к образованию сажи.

Альтернативные виды топлива представляют собой кислородсодержащие топливные смеси, обладающие большим потенциалом сокращения выбросов CO₂ от транспортных средств. Этанол является наиболее часто добавляемым кислородсодержащим компонентом к бензину; другие оксигенаты включают спирты, такие как метанол, бутанол, и простые эфиры, такие как метил-трет-бутиловый эфир (MTBE), этил-трет-бутиловый эфир (ETBE), образованные в результате этерификации соответствующих спиртов. E5 с 5% (об./об.) Этанолом, смешанным с бензином, есть повсюду в Европе, при этом E10 и E15 преобладают в США. Также доступны E85 и E100, но для этого требуется специальная адаптация автомобилей.

По сравнению с чистым бензином, кислородсодержащее топливо имеет более высокое давление пара, значительно более высокую теплоту парообразования и значительно более низкую теплотворную способность (LHV).

Эти характеристики, скорее всего, влияют на количество топлива, впрыскиваемого в цилиндр. Таким образом, это также влияет на испарение брызг один раз после впрыска топлива. Эти явления, в свою очередь, приводят к более высокому или пониженному количеству твердых частиц (PN) в выбросах в зависимости от условий работы двигателя. Из-за наличия связи -ОН почти во всех оксигенатах он увеличивает реакционную способность по отношению к окислению предшественников сажи, что снижает выбросы PN.

Что делает спирты такими замечательными оксигенатами, которые широко доступны в наши дни? Некоторые факторы включают в себя:

1. их можно производить из возобновляемого сырья,
2. они обладают низкой растворимостью в воде, оказывая меньшее влияние на наши водоснабжение,
3. могут смешиваться с бензином и сжигаться непосредственно в качестве топлива. чистое топливо,
4. сокращает выбросы окиси углерода, вызывая более бедное сгорание, чем чистый бензин (рисунок 1).

1.4.1 Влияние этанола на выбросы твердых частиц (PN)

Поскольку этанол производится из возобновляемых источников, чаще всего перерабатывается, его использование не способствует возможному глобальному потеплению и загрязнению. Следовательно, этанол является экологически безопасным топливом для двигателей с искровым зажиганием. Использование этанола для снижения PN уже было установлено в двигателях PFI, снижающих PN. Однако исследования показывают смешанное поведение в двигателях GDI, то есть добавление этанола может как увеличиваться, так и уменьшаться. Как и в случае с GDI, качество сгорания и

условия работы двигателя считаются важными для PN. Попадание жидкого топлива на стенки цилиндра, клапаны и поршень является одной из основных причин образования твердых частиц и довольно часто встречается при холодном пуске и переходных режимах. При использовании смесей этанола образование брызг относительно сложно, что может привести к более высокому PN по сравнению с бензином. Однако в случае, когда столкновение может быть компенсировано временем и энергией для относительно лучшего образования смеси, PN уменьшается.

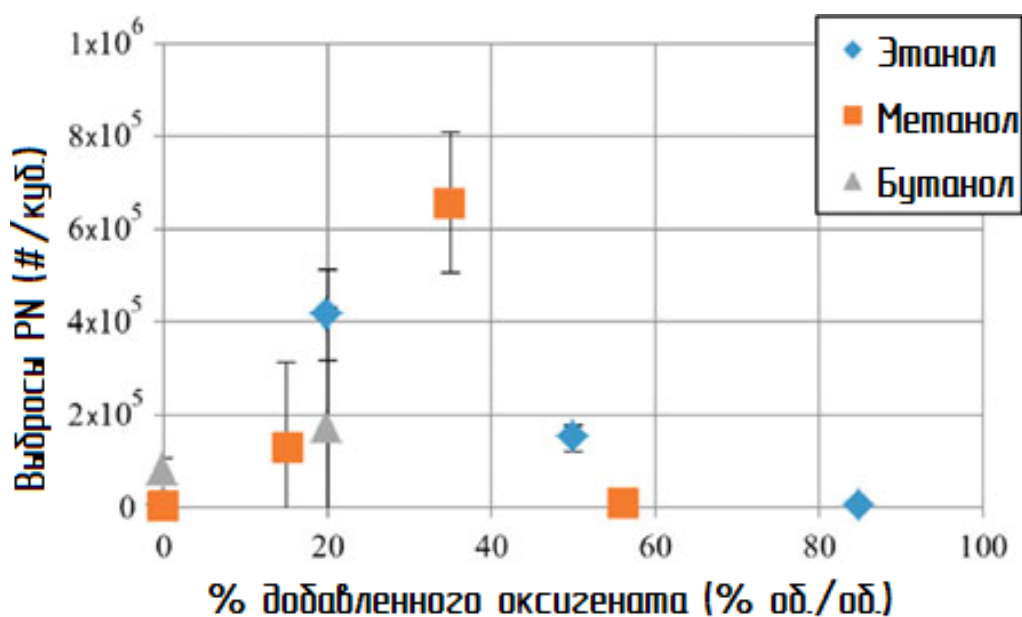


Рисунок 1 – Выбросы PN для топливных смесей с бензин/спирт, имеющими различные уровни оксигенатов

Как только уровень смешанного этанола увеличивается, сообщается о снижении выбросов PN. Присутствие и преобладание химически связанного кислорода и сильно разбавленных ароматических углеводородов снижает образование поли ароматических углеводородов (ПАУ), предшественников сажи, что, в свою очередь, снижает образование сажи. Однако недавно обнаружили, что высокие уровни этанола могут расслаивать ароматические углеводороды в испарившейся смеси и приводить к более высокому PN, несмотря на некоторое разбавление ароматических углеводородов в топливе смешанным этанолом.

1.4.2 Влияние метанола на выбросы твердых частиц (PN)

Иногда метанол можно использовать вместо этанола в качестве смешанного топлива с более низкими затратами на производство по сравнению с этанолом. Использование метанола не так распространено, как этанол, однако в Китае можно найти M100 (100% метанол), который широко используется при их транспортировке. Как и этанол, метанол имеет более низкую объемную плотность энергии и более высокое RON по сравнению с бензином.

Следуя своему предшественнику, метанол, как и этанол, при смешивании с бензином оказывает аналогичное влияние на PN. Одним из таких эффектов от метанола является то, что он способствует испарению топлива за счет снижения конечной точки кипения топлива, что помогает в снижении PN.

Кроме того, имеется повышенная теплота испарения и высокая летучесть, что может привести к ухудшению качества смесей, что приведет к более высокому PN. Исследовали влияние бензина, 100% метанола и других комбинаций смесей метанол-бензин и обнаружили, что с увеличением концентрации метанола в бензине выбросы PN значительно уменьшаются. Как и ожидалось, чистый метанол произвел еще меньше PN по сравнению с бензином. Также подтверждается другим исследованием, в котором сообщалось, что по сравнению с бензином смеси метанола (M15, M25 и M40) снижали PN.

Выбросы твердых частиц из двигателей GDI состоят из сложной смеси летучих и твердых компонентов, содержащих сажу, органический углерод и углеводороды. Частицы в режиме зародышеобразования (<50 нм) часто считались летучими, но в недавних исследованиях сообщалось о обнаружении твердых частиц и в режиме зародышеобразования. Частицы в режиме накопления (50-200 нм) включают черный углерод, частицы углеродистой сажи с рудиментарной углеродной структурой и адсорбированные летучие вещества.

Добавление кислородсодержащего вещества в топливо снижает содержание ароматических веществ в топливе, теоретически приводя к более низкому РН по сравнению с топливом в чистом виде. Поскольку ароматические углеводороды – не единственное свойство топлива, влияющее на РН, существует смешанная тенденция, о которой сообщается для кислородсодержащих смесей. Хотя более низкие уровни оксигенатов в смесях обещают снизить РН при более низких нагрузках, они не могут снизить РН при более высоких нагрузках.

1.5 Гибридные силовые установки

ООН/ЕЭК определяет гибридную силовую установку следующим образом: «Гибридный силовой агрегат» означает силовой агрегат, имеющий по меньшей мере два различных преобразователя энергии и две различных системы хранения энергии (на борту автомобиля) для приведения в движение транспортного средства. Для автомобильных приводов появилась комбинация, изготовленная из бензинового или дизельного двигателя и электродвигателя. Однако определение не устанавливает это разделение в обязательном порядке. Таким образом, в прошлом также существовали комбинации дизельного/качающегося дискового двигателя и газовой турбины/электродвигателя с соответствующими накопителями энергии. Кроме того, привод топливных элементов с дополнительной батареей также считается транспортным средством с гибридным приводом.

Гибридный привод предназначен для объединения преимуществ двух приводов, в настоящее время целью является снижение выбросов и снижение потребления энергии транспортного средства. Сравнение идентификатора потребности транспортного средства с идентификатором доставки транспортного средства дизельного, бензинового двигателей и электродвигатель показывают, что двигатели внутреннего сгорания имеют больше слабых мест в нижнем диапазоне оборотов (рисунок 2).

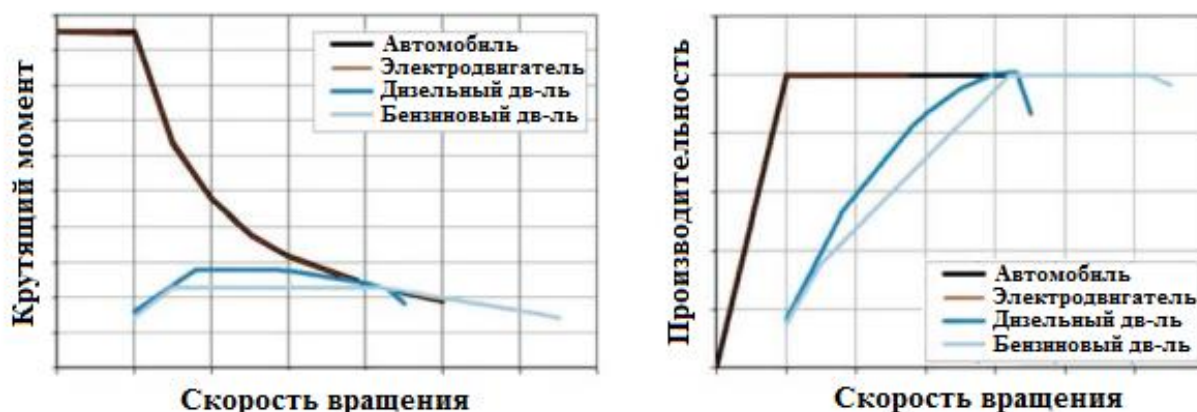


Рисунок 2 – Характеристики двигателей внутреннего сгорания и электродвигателей

Если посмотреть на взаимодействие двигателей внутреннего сгорания и электроприводов, то становится очевидным потенциал гибридного привода. Электрический двигатель дополняет характерную слабость двигателя внутреннего сгорания, в то время как эффективное хранение энергии «топливный бак» компенсирует недостатки батарей/аккумуляторов. Кроме того, возможно преобразование энергии при торможении или усилении выхлопных газов. Можно повторно использовать электрическую энергию для гибридного привода. Кроме того, условия эксплуатации двигателя внутреннего сгорания следует избегать случаев, когда происходят повышенные выбросы.

По сравнению с приводом дизельного или бензинового двигателя для гибридного привода требуются некоторые настройки и дополнительные компоненты. Помимо электродвигателей и накопителей для электрической энергии также требуется подключение электронных машин к силовой трансмиссии и силовой электронике.

Надлежащее электронное управление позволяет добиться ряда преимуществ по сравнению с обычными приводами. Например, сокращение потребления ископаемой энергии за счет работы двигателя внутреннего сгорания в точке с максимальной эффективностью или близкой к ней и поддержки ускорения с помощью электродвигателя или запуска с помощью электродвигателя. Это также позволяет уменьшить размер двигателя

внутреннего сгорания. Частичная рекуперация энергии торможения помогает повысить общую эффективность. Выбросы можно поддерживать на низком уровне за счет общей оптимизации привода, в электрическом режиме они равны нулю. Низкий уровень шума, особенно при работе от электричества, является еще одним преимуществом. В отличие от чисто электрических транспортных средств, гибридные автомобили уже достигли значительного числа. Гибридные приводы делятся на различные типы в зависимости от установленной электрической мощности. В зависимости от комбинаций двигателя внутреннего сгорания и электропривода гибридные приводы делятся на три вида, а именно последовательные, параллельные и смешанные гибриды (рисунок 3).



Рисунок 3 – Классификация гибридных приводов

Основной принцип этих трех видов показан на рисунке 4. В качестве электрической машины подходят практически все известные виды. Однако машины постоянного тока менее подходят из-за их сравнительно низкой эффективности (от 80 до 85%), тем более что они более трудоемки в обслуживании, чем другие типы бесщеточных. Кроме того, они чувствительны к вибрации и ударам.

Асинхронные машины — это прочные электродвигатели, которые работают при подходящих механических и тепловых условиях. Конструкция

асинхронного электродвигателя не имеет изнашиваемых деталей. Это простые и недорогие двигатели.

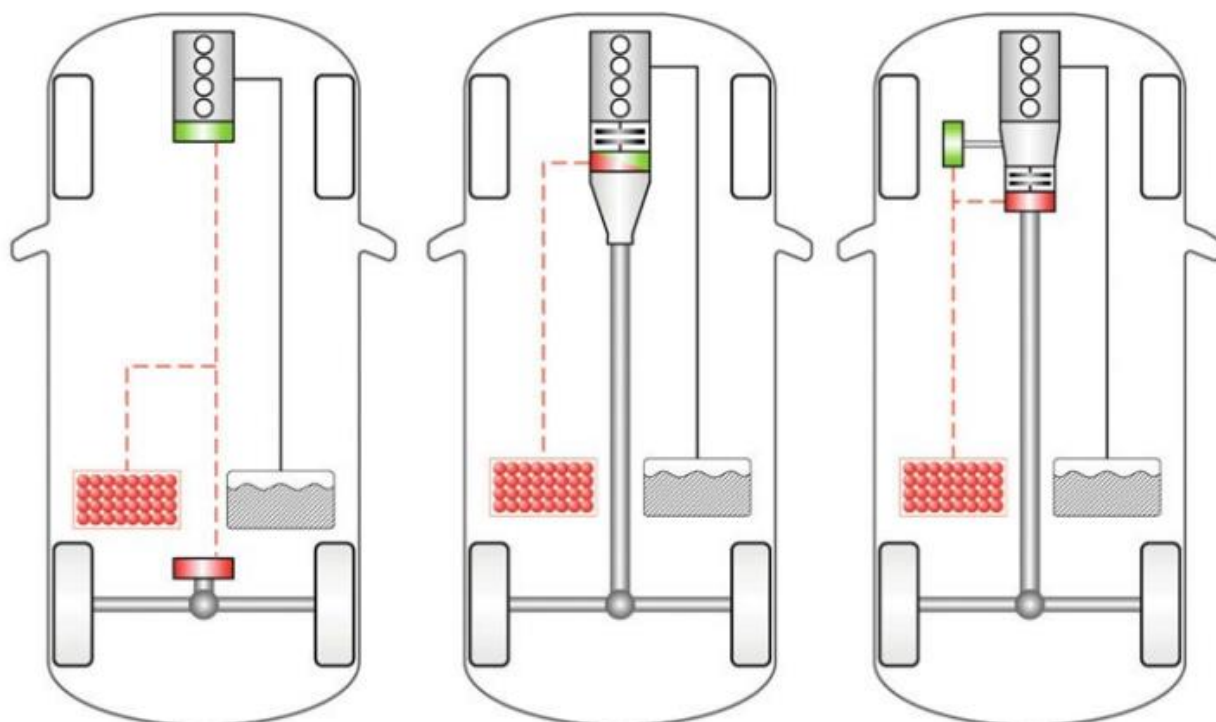


Рисунок 4 – Принцип работы последовательного, параллельного и гибридного привода с отдельным питанием

Синхронные машины имеют противоположность асинхронным-машинам имеют более высокую эффективность и более высокую плотность мощности, но из-за необходимых магнитов стоимость системы выше.

Следующим важным аспектом является генератор. Функция генератора может быть реализована различными способами. Для низкой мощности (~ 5 кВт) или простых гибридных концепций можно использовать классический генератор переменного тока. Однако из-за существующих электрических машин их также можно использовать в качестве генератора. Если это невозможно по техническим причинам, электрический машина используется специально для работы генератора.

Гибридные автомобили позволяют использовать ряд новых технологий во всей области транспортных средств, таких как управление энергией и приводом, оптимизация выхлопных газов, управление температурой и

оптимизация ходовых качеств. Многие компоненты все еще находятся в стадии разработки, например, высокотемпературная электроника (карбид кремния), новые шестерни, рекуперация отработанного тепла и усовершенствованные литий-ионные батареи. Благодаря гибридизации появилась новая перекрестная технология, которая включает в себя дополнительные синергии.

Таким образом, производители транспортных средств говорят уже не об альтернативных приводах, а о целенаправленном дальнейшем развитии бензиновых и дизельных двигателей в соответствии с девизом «В будущем каждое транспортное средство будет содержать часть гибридизации».

Параллельный гибрид позволяет обеспечивать привод обоими приводными блоками одновременно. Серийный гибрид всегда имеет привод от электродвигателя; следовательно, электроэнергия должна вырабатываться «на борту». Этого можно достичь с помощью самых разнообразных агрегатов, например двигателей Отто или дизельных двигателей, газовых турбин или топливных элементов.

Преимущество заключается в том, что энергоблок может эксплуатироваться с оптимальным КПД и выбросами.

Смешанный гибрид представляет собой комбинацию последовательного и параллельного гибридов, при этом гибридный привод с разделением мощности является еще одним вариантом, если не самым далеко идущим из всех гибридных вариантов. Обычная трансмиссия (механическая МКПП или АКПП) заменяется одноступенчатой или многоступенчатой планетарной передачей с непосредственным сцеплением не менее двух электродвигателей.

Этот чрезвычайно компактный блок представляет собой бесступенчатую трансмиссию (ЕСVТ), с которой могут быть реализованы все гибридные функции, такие как старт/стоп, рекуперация и частично или полностью электрический привод. Преимущества и недостатки различных систем сравниваются в таблице 4.

Таблица 4 – Техническая оценка гибридных приводов

Серийный гибрид	Параллельный гибрид	Стартер/генератор (мягкий гибрид)
Полностью электрический привод оси	Комбинированный ВМ эл. последняя передача	Э-машина жестко соединена с ВМ
+ Функция стартера/генератора	+ Функция стартера/генератора	+ Функция стартера/генератора
+ Чисто электрическое вождение	+ Функция повышения	+ Функция повышения (ISG)
+ Рекуперация с полной мощностью	+ восстановление	+ Простая конструкция
+ Электропитание при 0 км/ч	+ Чисто электрическое вождение	+ Низкие затраты
+ Оптимальное управление энергопотреблением	+ Возможно оптимальное управление энергопотреблением	+ питание 42В
+ Комфортный запуск двигателя даже при $v > 0$ км/ч	+ Немедленный запуск ВМ при $v > 0$ км/ч	+ также с ременным приводом (RSG)
- Большой вес (тройная установленная мощность)	+ Относительно небольшие двигатели РМ Е	- ВМ нельзя отстыковать
- Функция повышения только электрически при перегрузке	+ Электропитание даже при 0 км/ч	- Ограниченная рекуперация (крутящий момент двигателя)
	- Расходы	- нет чисто электрического режима
- Высокие затраты	- Большой вес	- экономия на низком потреблении
- Большой вес	- Сложная структура	
- продуманная упаковка	- более длинная трансмиссия	

Из-за небольшого радиуса действия, а также из-за проблемы застревания в чисто электрическом транспортном средстве с разряженной батареей, подключаемые модули и расширители диапазона становятся все более важными в качестве гибридных приводов. Однако это не означает, что чисто электрические автомобили не имеют шансов на рынке. Однако их использование будет сильно зависеть от соответствующего профиля приложения. С расширителем диапазона, например. В настоящее время двигатель внутреннего сгорания гарантирует, что батарея всегда будет достаточно заряжена и что большие расстояния можно будет проехать исключительно на электричестве. Здесь также возможна дополнительная зарядка аккумулятора извне. Гибрид с параллельным подключением может

приводиться в движение как электрическим, так и двигателем внутреннего сгорания. Внешняя зарядка аккумулятора является частью концепции. В настоящее время на рынке существует множество концепций подключаемых модулей.

Выводы по первому разделу

По вопросам применения альтернативных видов топлива, следует отметить, что наиболее перспективными считаются спирты для двигателей с искровым зажиганием. Для газов имеются существенные ограничения по применению вследствие значительного увеличения массы хранения топлива и стоимости системы топливоподачи. Но можно отметить, как перспективные это сжатый природный газ и водород.

При использовании альтернативных топлив необходимо учитывать необходимость адаптации рабочего процесса на изменение свойств горения нового топлива.

2 Тепловой расчет трехцилиндрового двигателя

Основные параметры двигателя, выбранного для дальнейшей проработки, приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Технические параметры двигателя, выбранного как прототип для дальнейшей проработки

Параметры двигателя	Базовый
Тип	4-тактный бензиновый
Кол-во цилиндров, тип ГБЦ	3, ДОНС
Диаметр цилиндров, мм	72
Ход поршня, мм	82
Длина шатуна, мм	136,5
Рабочий объем, л	1,0016
Степень сжатия	10

2.1 Тепловой расчет трехцилиндрового двигателя при работе на бензине

Тепловой расчет производится по методике И.И. Вибе. Расчет проводился для двух видов топлива на бензине и на метаноле. Результаты расчета представлены в виде таблиц и графиков. Исследование проводится на пяти режимах работы при оборотах коленчатого вала 800, 2000, 3500, 5000 и 6000 мин⁻¹.

Для удобства анализа регулировочных характеристик представим данные в виде таблицы 6. Коэффициент избытка воздуха принят равным стехиометрическим, так как это обеспечивает оптимальные условия работы трехкомпонентного каталитического нейтрализатора.

Для удобства анализа термохимических характеристик бензина представим их в виде таблицы 7. Массовое содержание элементов в бензине взято из [6 и 12]. Тем самым мы получили действительные значения теоретически необходимое количество воздуха в кг для сгорания 1 кг топлива равно 14.7, что соответствует действительным значениям, получаемым при экспериментах.

Таблица 6 – Регулировочные характеристики двигателя на бензине

Название параметра, размерность	Условное обозначение	Значение характеристики				
		800	2000	3500	5000	6000
Частота вращения, мин ⁻¹	n	800	2000	3500	5000	6000
Угол опережения зажигания, ° ПКВ	Θ	10	13	15	18	22
Коэффициент избытка воздуха	α	1	1	1	1	1
Температура подогрева заряда в цилиндре ДВС, °С	ΔT _N	5	5	5	5	5
Давление на впуске (атмосферное), МПа	P ₀	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Температура на впуске (окружающей среды), К	T ₀	293,15	293,15	293,15	293,15	293,15
Расчетная политропа сжатия	n _p	1,3782	1,3776	1,3769	1,3753	1,3749
Действительная политропа сжатия	n _д	1,3342	1,3343	1,3344	1,3344	1,3344
Предполагаемая температура остаточных газов, К	T _г	1070	1075	1092	1120	1150
Продолжительность горения, ° ПКВ	φ _г	50	56	62	68	75
Показатель характера сгорания	m	3	3	3	3	3
Коэффициент выделения теплоты	σ	1	1	1	1	1
Коэффициент использования теплоты	δ _i	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
Коэффициент эффективности сгорания топлива	ξ	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86

Таблица 7 – Термохимические характеристики топлива (бензин Аи-95)

Название характеристики, размерность	Условное обозначение	Значение характеристики
Массовое содержание Н	Н	0,14268
Массовое содержание С	С	0,84132
Массовое содержание О	О	0,004
Массовое содержание S	S	0,005
Массовое содержание N	N	0,007
Массовое содержание H ₂ O	H ₂ O	0
Нижшая теплота сгорания, МДж/кг	H _н	43237,518
Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива	Lo, кмоль воздуха/кг топлива	0,508
	Lo, кг воздуха/кг топлива	14,700
Количество компонента продуктов сгорания	Mc CO, кмоль CO/кг топлива	0,0701
	MH ₂ O, кмоль H ₂ O/кг топлива	0,0713
	MN ₂ , кмоль N ₂ /кг топлива	0,4023
	MO ₂ , кмоль O ₂ /кг топлива	0
Общее количество продуктов сгорания топлива,	M ₂ кмоль пр. сг./кг топлива	0,5438
Коэффициент изменения гор. смеси	μ ₀	1,0525

Для удобства расчетов цикла для трехцилиндрового двигателя на бензине представим данные в виде таблицы 8.

Таблица 8 – Расчет действительного цикла двигателя на бензине

Название параметра	Условное обозначение	Значение характеристики				
		800	2000	3500	5000	6000
Частота вращения	n , мин ⁻¹	800	2000	3500	5000	6000
Давление остаточных газов	P_r , МПа	0,1039	0,1058	0,1106	0,1180	0,1244
Температура подогрева	ΔT_N , К	10,5263	8,9474	6,9737	5,0000	3,6842
Средняя скорость движения заряда	$\omega_{вп}$, м/с	10,3289	25,8221	45,1887	64,5553	77,4664
Давление в конце впуска	P_a , МПа	0,0999	0,0992	0,0976	0,0950	0,0929
Коэффициент остаточных газов	γ_r	0,0345	0,0347	0,0359	0,0377	0,0404
Коэффициент наполнения	η_V	0,9170	0,9235	0,9177	0,9095	0,8724
Температура в конце впуска	T_a , К	329,2204	328,0322	327,6025	328,0334	329,9491
Удельный объем рабочего тела в конце наполнения	V_a , м ³ /кг	0,9031	0,9059	0,9198	0,9455	0,9733
Давление в конце сжатия	P_c , МПа	2,1560	2,1421	2,1075	2,0530	2,0059
Температура в конце сжатия	T_c , К	710,7006	708,2987	707,5989	708,5296	712,6675
Политропа расширения	n_2	1,1915	1,1920	1,1926	1,1936	0,5288
Удельный объем рабочего тела в момент воспламенения	V_y , м ³ /кг	0,0983	0,1041	0,1103	0,1215	0,1385
Давление рабочего тела в момент воспламенения	P_y , МПа	1,9248	1,7786	1,6548	1,4693	1,2530
Температура рабочего тела в момент воспламенения	T_y , К	690,7872	676,0505	665,9880	651,5465	633,3856
Общая удельная теплота сгорания топлива	q_z , кДж/кг	2289,5026	2288,9772	2286,2635	2282,3314	2276,5214
Давление в процессе сгорания	E_2 , МПа	50,7040	50,5370	49,7108	48,2775	46,7776
Степень расширения	δ	4,2832	3,9579	3,5753	3,3229	3,0967
Давление в конце процесса сгорания	P_z , МПа	3,5021	3,1636	2,7539	2,4447	2,1716
Температура в конце процесса сгорания	T_z , К	2565,3179	2515,6093	2461,5973	2417,0821	2372,0458
Давление в конце процесса расширения	P_b , МПа	0,6189	0,6138	0,6026	0,5831	0,5631
Температура в конце процесса расширения	T_b , К	1941,7034	1931,5954	1925,9770	1915,5981	1904,5549
Теоретическая индикаторная работа цикла	L_T , кДж	1,1299	1,1225	1,0886	1,0820	1,0565
Расчетное среднее индикаторное давление	P_iT , МПа	1,3902	1,3768	1,3150	1,2716	1,2061
Индикаторный коэффициент полезного действия	η_i	0,4415	0,4342	0,4173	0,4072	0,4026
Удельный индикаторный расход топлива	g_i , г/кВт*ч	188,5791	191,7640	199,5281	204,4817	206,7951
Давление механических потерь	P_m , МПа	0,0587	0,0958	0,1421	0,1884	0,2193
Средняя скорость поршня	$C_{п}$, м/с	2,1867	5,4667	9,5667	13,6667	16,4000
Среднее эффективное давление	P_e , МПа	1,3315	1,2810	1,1729	1,0831	0,9868
Механический КПД	η_m	0,9578	0,9304	0,8919	0,8518	0,8182
Эффективный КПД	η_e	0,4229	0,4040	0,3722	0,3468	0,3294
Удельный эффективный расход топлива	g_e , г/кВт*ч	196,8943	206,1012	223,7023	240,0555	252,7573
Эффективная мощность	N_e , кВт	8,8905	21,3839	34,2635	45,2022	49,4172
Часовой расход топлива	G_T , кг/ч	1,7505	4,4073	7,6648	10,8511	12,4906
Крутящий момент	M_e , Н*м	106,1229	102,1008	93,4835	86,3299	78,6499

По результатам расчетов построим индикаторные диаграммы в P-V координатах (рисунок 56) и внешнюю скоростную характеристику (рисунок б).

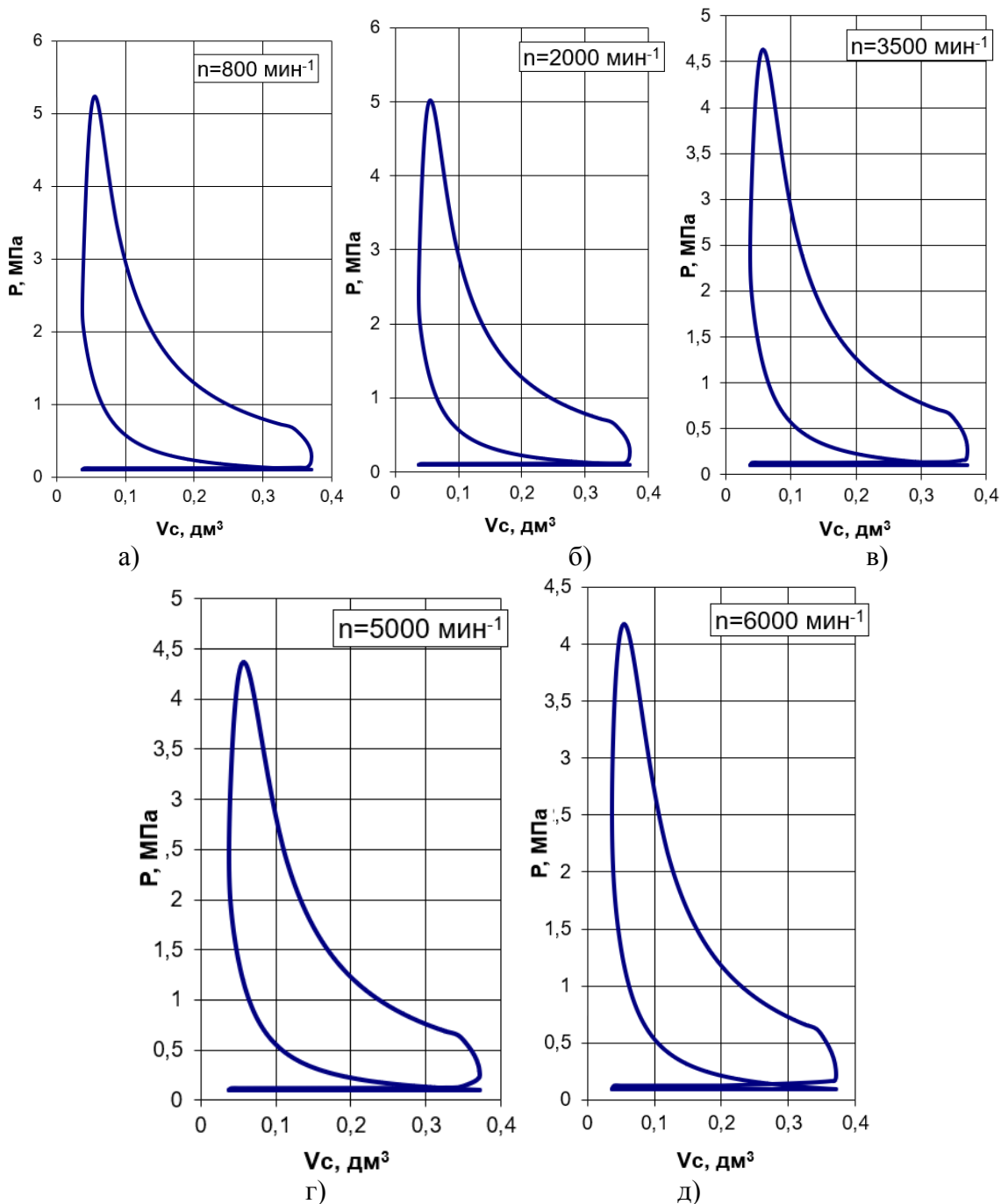


Рисунок 5 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах, для исследуемых частот вращения: (а) 800; (б) 2000; (в) 3500; (г) 5000 и (д) 6000 мин⁻¹.

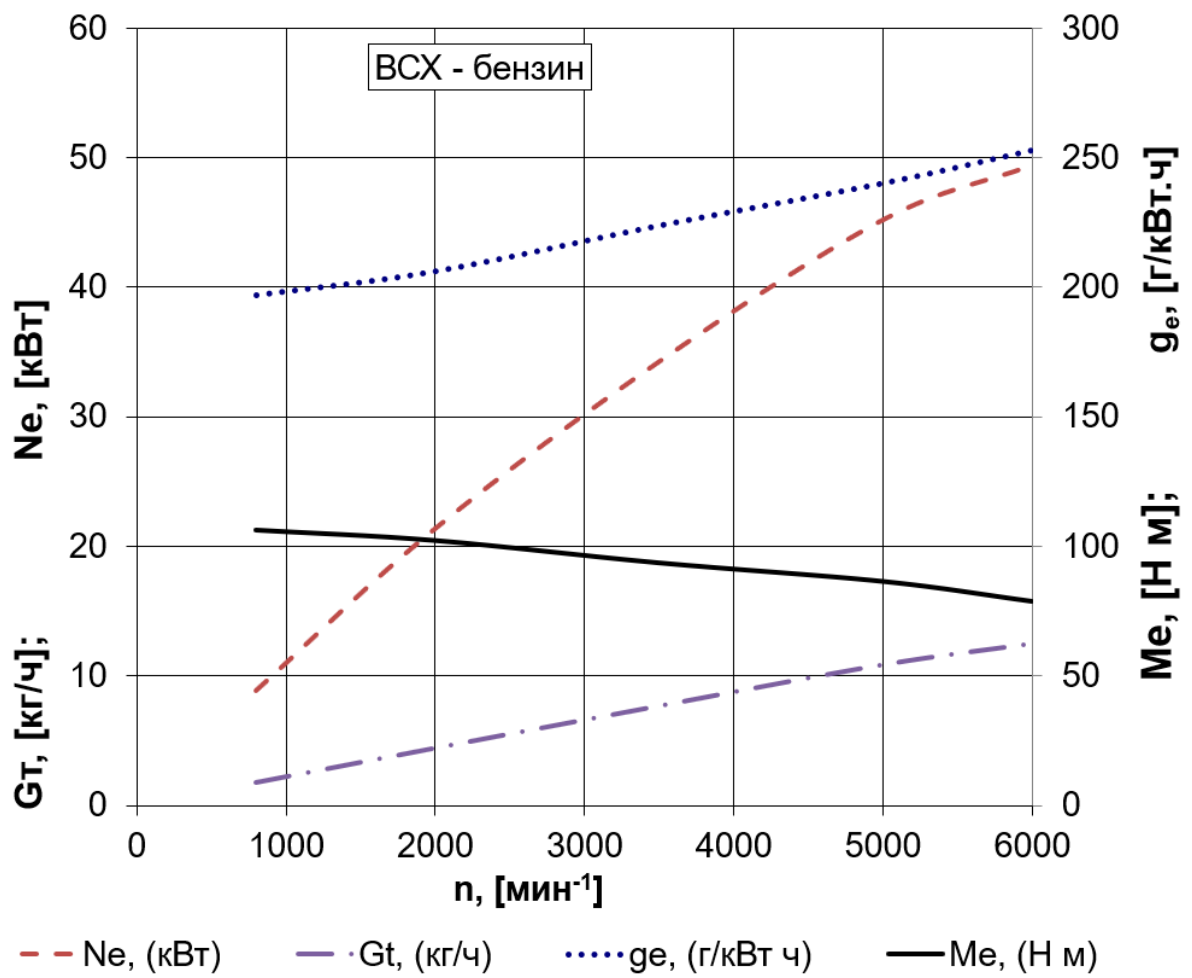


Рисунок 6 – Внешняя скоростная характеристика двигателя на бензине

Для удобства расчетов теплового баланса двигателя при работе на бензине представим данные в виде графика на рисунке 7.

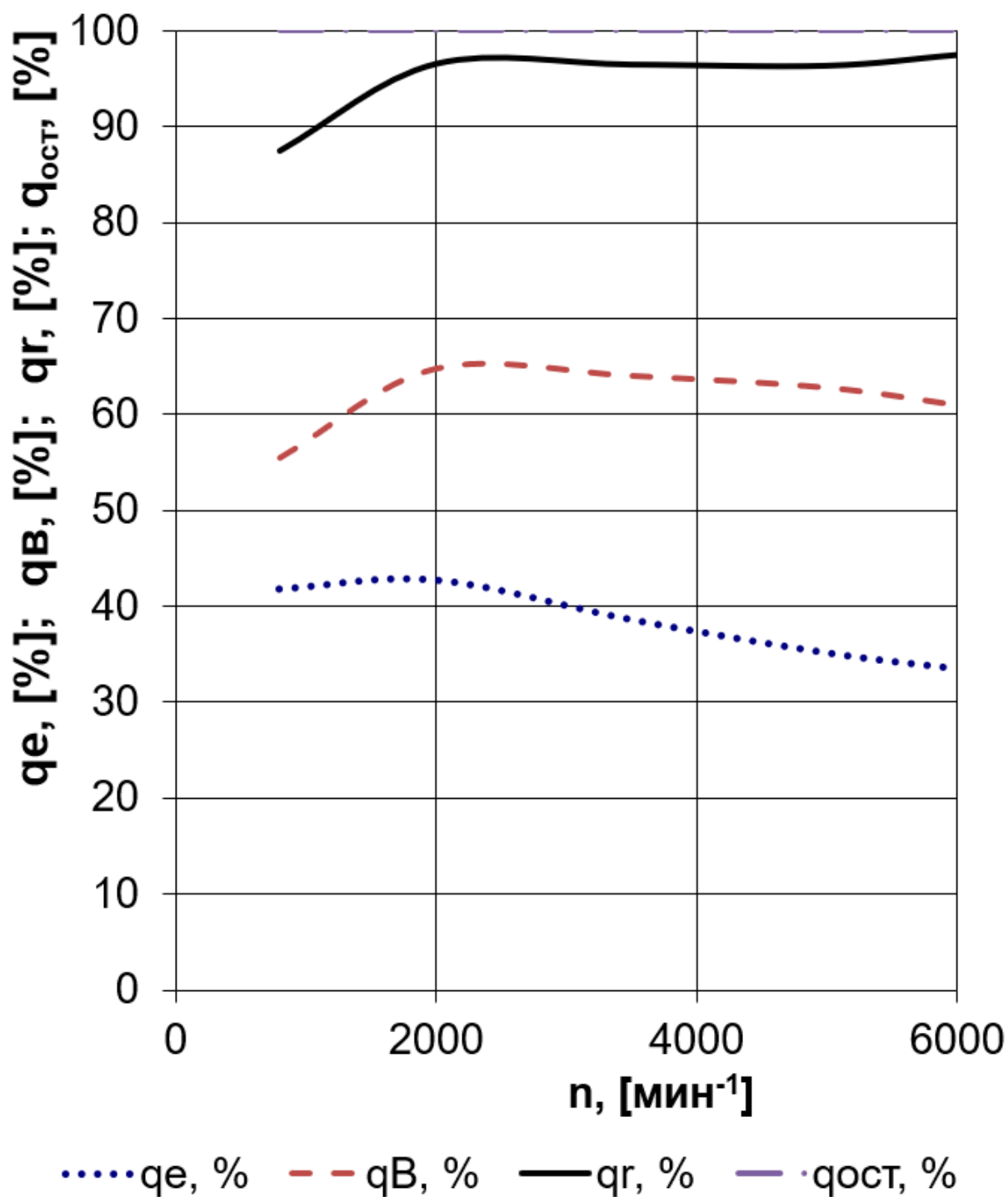


Рисунок 7 – Диаграмма внешнего теплового баланса двигателя на бензине

2.2 Тепловой расчет трехцилиндрового двигателя на метаноле

Для удобства анализа регулировочных характеристик трехцилиндрового двигателя на метаноле представим данные в виде таблицы

9. Для удобства анализа термохимических характеристик топлива метанол представим их в виде таблицы 10.

Таблица 9 – Регулировочные характеристики трехцилиндрового двигателя на метаноле

Название параметра, размерность	Условное обозначение	Значение характеристики				
		800	2000	3500	5000	6000
Частота вращения, мин ⁻¹	n	800	2000	3500	5000	6000
Угол опережения зажигания, ° ПКВ	Θ	11	18	20	23	26
Температура подогрева заряда в цилиндре ДВС, °С	ΔT _N	5	5	5	5	5
Действительная политропа сжатия	n _д	1,3341	1,3343	1,3344	1,3344	1,3344
Предполагаемая температура остаточных газов, К	T _г	1024	1018	1032	1055	1115
Продолжительность горения, ° ПКВ	φ _г	57	62	67	73	80
Показатель характера сгорания	m	3	3	3	3	3
Коэффициент использования теплоты	δ _i	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
Коэффициент эффективности сгорания топлива	ξ	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86

Таблица 10 – Термохимические характеристики топлива – метанол

Название характеристики, размерность	Условное обозначение	Значение характеристики
Массовое содержание H	H	0,1258
Массовое содержание C	C	0,3749
Массовое содержание O	O	0,4993
Массовое содержание S	S	0
Массовое содержание N	N	0
Молекулярная масса топлива,	m _г , кг/моль	32,042
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	H _н	20235,947
Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива	Lo, кмоль воздуха/кг топлива	0,226
	Lo, кг воздуха/кг топлива	6,552
Количество компонента продуктов сгорания	Mc CO, кмоль CO/кг топлива	0,0312
	MH ₂ O, кмоль H ₂ O/кг топлива	0,0629
	MN ₂ , кмоль N ₂ /кг топлива	0,1793
	MO ₂ , кмоль O ₂ /кг топлива	0
Общее количество продуктов сгорания топлива,	M ₂ кмоль пр. сг./кг топлива	0,2735
Коэффициент изменения гор. смеси	μ ₀	1,0615

Для удобства расчетов цикла трехцилиндрового двигателя на метаноле представим данные в виде таблицы 11.

Таблица 11 – Расчет цикла трехцилиндрового двигателя на метаноле

Название параметра	Условное обозначение	Значение характеристики				
		800	2000	3500	5000	6000
Частота вращения	n , мин ⁻¹	800	2000	3500	5000	6000
Давление остаточных газов	P_r , МПа	0,1039	0,1058	0,1106	0,1180	0,1244
Средняя скорость движения заряда в наименьшем сечении впускной системы	$\omega_{вп}$, м/с	10,3289	25,8221	45,1887	64,5553	77,4664
Давление в конце впуска	P_a , МПа	0,0999	0,0992	0,0976	0,0950	0,0929
Коэффициент остаточных газов	γ_r	0,0387	0,0389	0,0389	0,0410	0,0426
Коэффициент наполнения	η_v	0,8527	0,8700	0,8966	0,8887	0,8520
Температура в конце впуска	T_a , К	330,5460	328,9153	327,5527	327,9545	330,2981
Удельный объем рабочего тела в конце наполнения	V_a , м ³ /кг	0,9398	0,9414	0,9532	0,9797	1,0099
Политропа расширения	n_2	1,1978	1,1981	1,1980	1,1981	1,1986
Удельный объем рабочего тела в момент воспламенения	V_y , м ³ /кг	0,1041	0,1210	0,1287	0,1432	0,1602
Давление рабочего тела в момент воспламенения	P_y , МПа	1,8815	1,5329	1,4110	1,2375	1,0840
Температура рабочего тела в момент воспламенения	T_y , К	689,5130	653,0435	639,7756	623,9191	611,4161
Общая удельная теплота сгорания топлива	q_z , кДж/кг	2218,4387	2218,0748	2218,0347	2213,6517	2210,1455
Давление в процессе сгорания	E_2 , МПа	47,2127	47,1229	46,5387	45,1892	43,7707
Степень расширения	δ	3,6658	3,8570	3,5753	3,3229	3,0266
Давление в конце процесса сгорания	P_z , МПа	2,7620	2,8899	2,6010	2,3094	1,9992
Температура в конце процесса сгорания	T_z , К	2354,3883	2345,4203	2305,7353	2264,3085	2218,4580
Давление в конце процесса расширения	P_b , МПа	0,5827	0,5734	0,5653	0,5479	0,5301
Температура в конце процесса расширения	T_b , К	1820,9480	1794,9964	1791,6171	1785,0422	1780,5001
Теоретическая индикаторная работа цикла	L_T , кДж	1,0204	1,0956	1,0785	1,0539	1,0353
Расчетное среднее индикаторное давление	P_iT , МПа	1,2065	1,2931	1,2572	1,1952	1,1391
Индикаторный коэффициент полезного действия	η_i	0,4390	0,4612	0,4351	0,4173	0,4148
Удельный индикаторный расход топлива	g_i , г/кВт*ч	405,2248	385,7466	408,8820	426,3116	428,8543
Давление механических потерь	P_m , МПа	0,0587	0,0958	0,1421	0,1884	0,2193
Средняя скорость поршня	C_p , м/с	2,1867	5,4667	9,5667	13,6667	16,4000
Среднее эффективное давление	P_e , МПа	1,1478	1,1974	1,1151	1,0068	0,9198
Механический КПД	η_m	0,9513	0,9259	0,8870	0,8423	0,8075
Эффективный КПД	η_e	0,4177	0,4270	0,3859	0,3515	0,3350
Удельный эффективный расход топлива	g_e , г/кВт*ч	425,9519	416,6015	460,9873	506,0992	531,1116
Эффективная мощность	N_e , кВт	7,6641	19,9877	32,5760	42,0173	46,0631
Часовой расход топлива	G_T , кг/ч	3,2646	8,3269	15,0171	21,2649	24,4647
Крутящий момент	M_e , Н*м	91,4840	95,4340	88,8794	80,2472	73,3118

По результатам расчетов построим индикаторные диаграммы в P-V координатах (рисунок 8) и внешнюю скоростную характеристику (рисунок 9) для трехцилиндрового двигателя на метаноле.

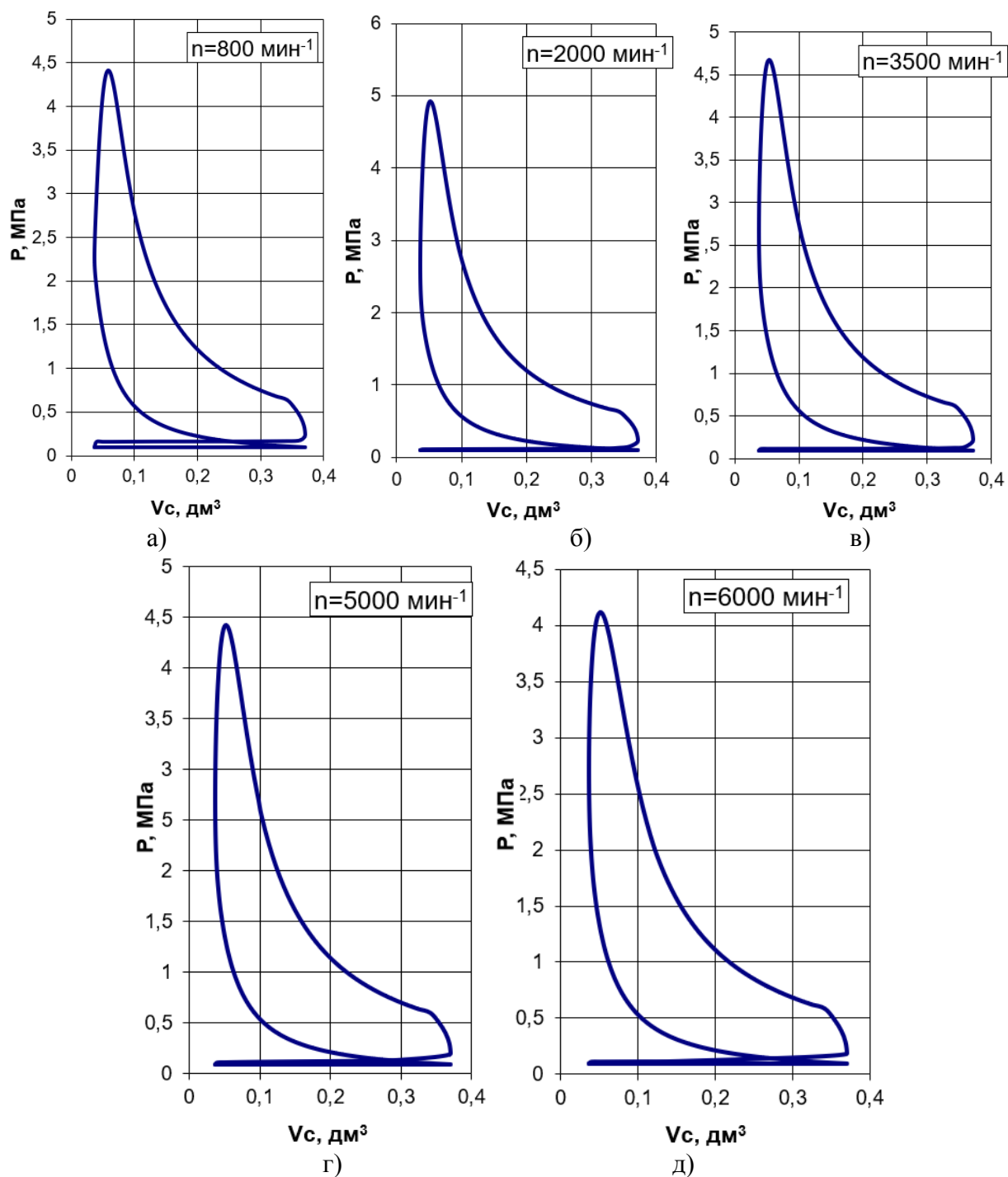


Рисунок 8 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах, для трехцилиндрового двигателя на метаноле: (а) 800; (б) 2000; (в) 3500; (г) 5000 и (д) 6000 мин⁻¹.

Для удобства расчетов теплового баланса трехцилиндрового двигателя на метаноле представим данные в виде графика (рисунок 10).

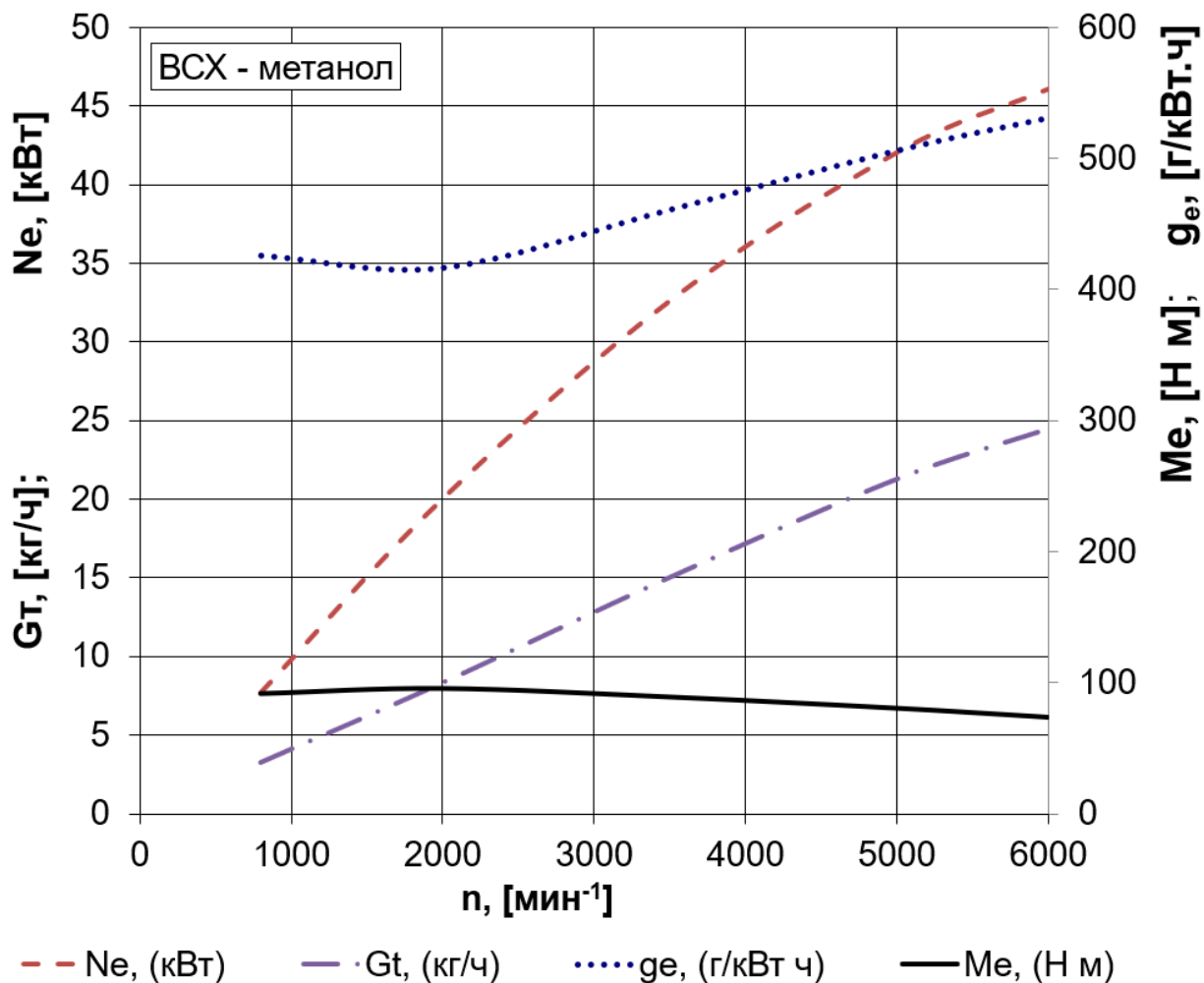


Рисунок 9 – Внешняя скоростная характеристика трехцилиндрового двигателя на метаноле

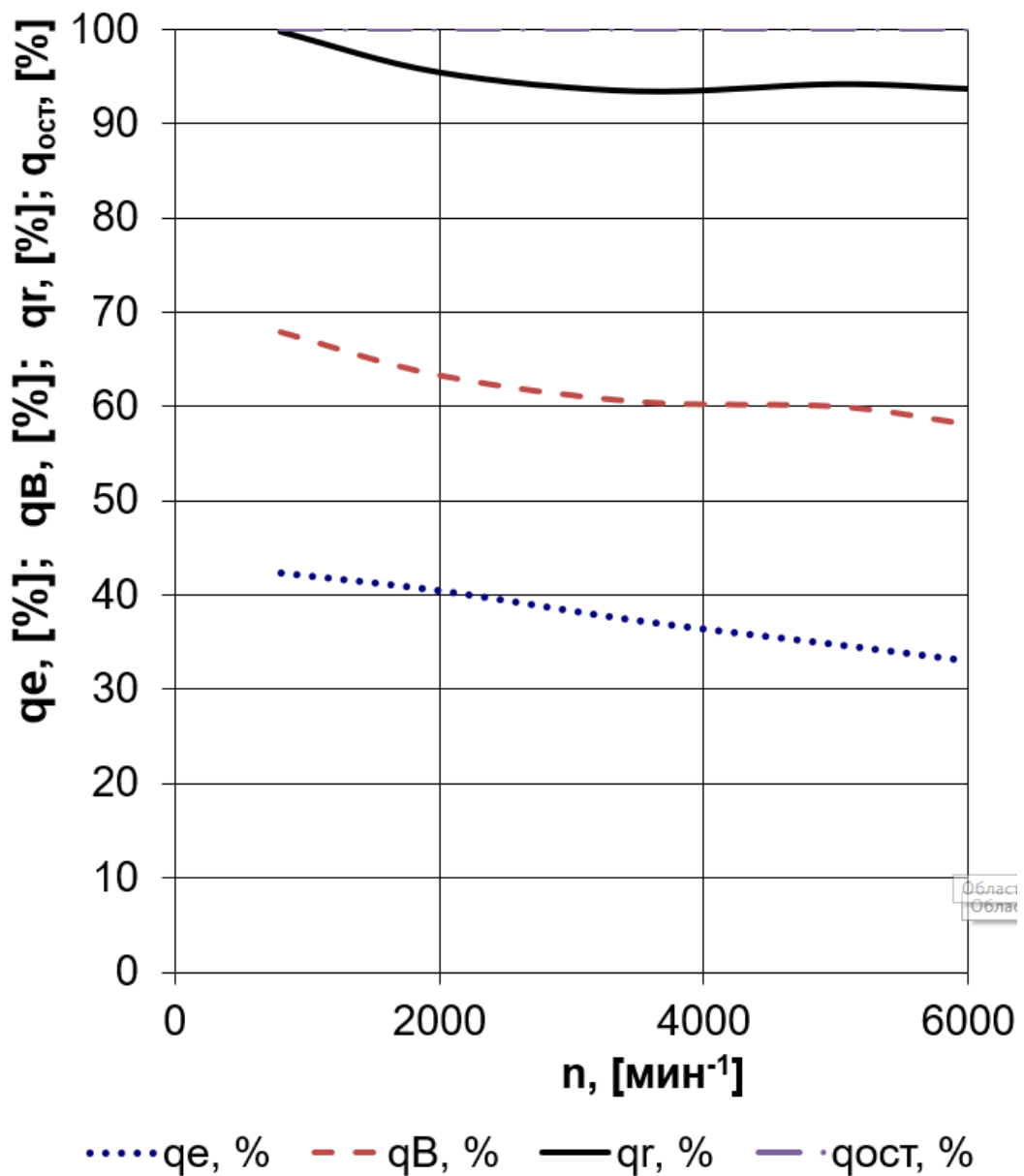


Рисунок 10 – Диаграмма внешнего теплового баланса трехцилиндрового двигателя на метаноле

Выводы по второму разделу

Проведенные расчеты показали некоторое улучшение эффективных показателей работы двигателя при переходе с бензина на альтернативное топливо – метанол.

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 41 мм, а длина шатуна 136,5 мм) проводился по известным методикам приведенным в [1,2], при частоте вращения коленчатого вала 6000 мин^{-1} .

Результаты расчета перемещения, скорости и ускорения поршня приведены на рисунках 11, 12 и 13.

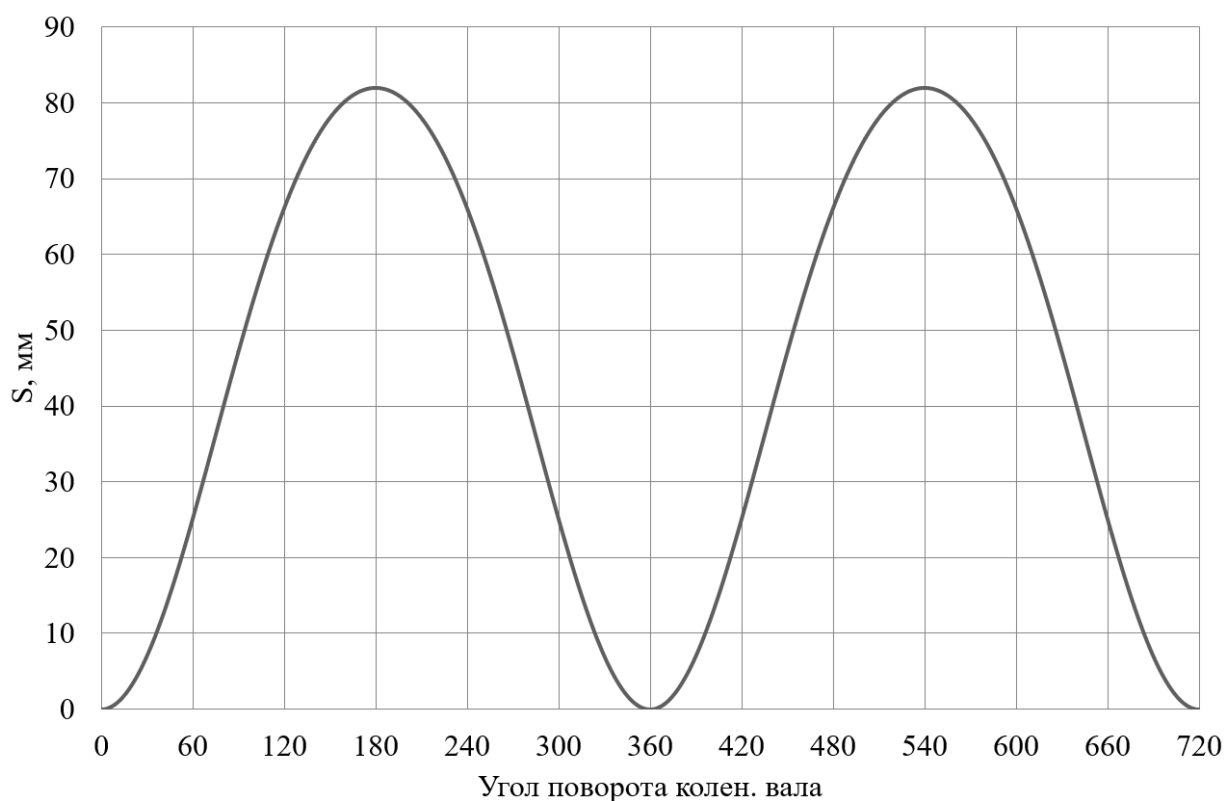


Рисунок 15 – Диаграмма изменения хода поршня

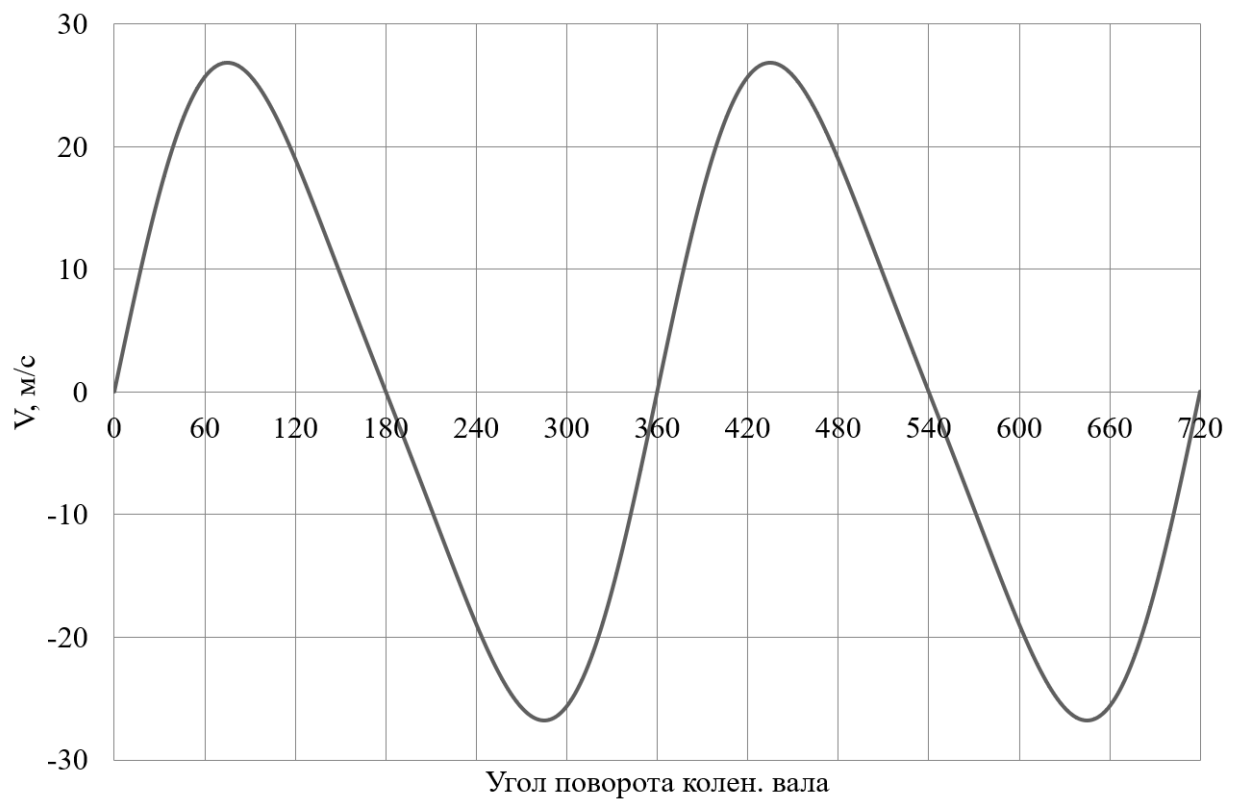


Рисунок 16 – Диаграмма изменения скорости поршня

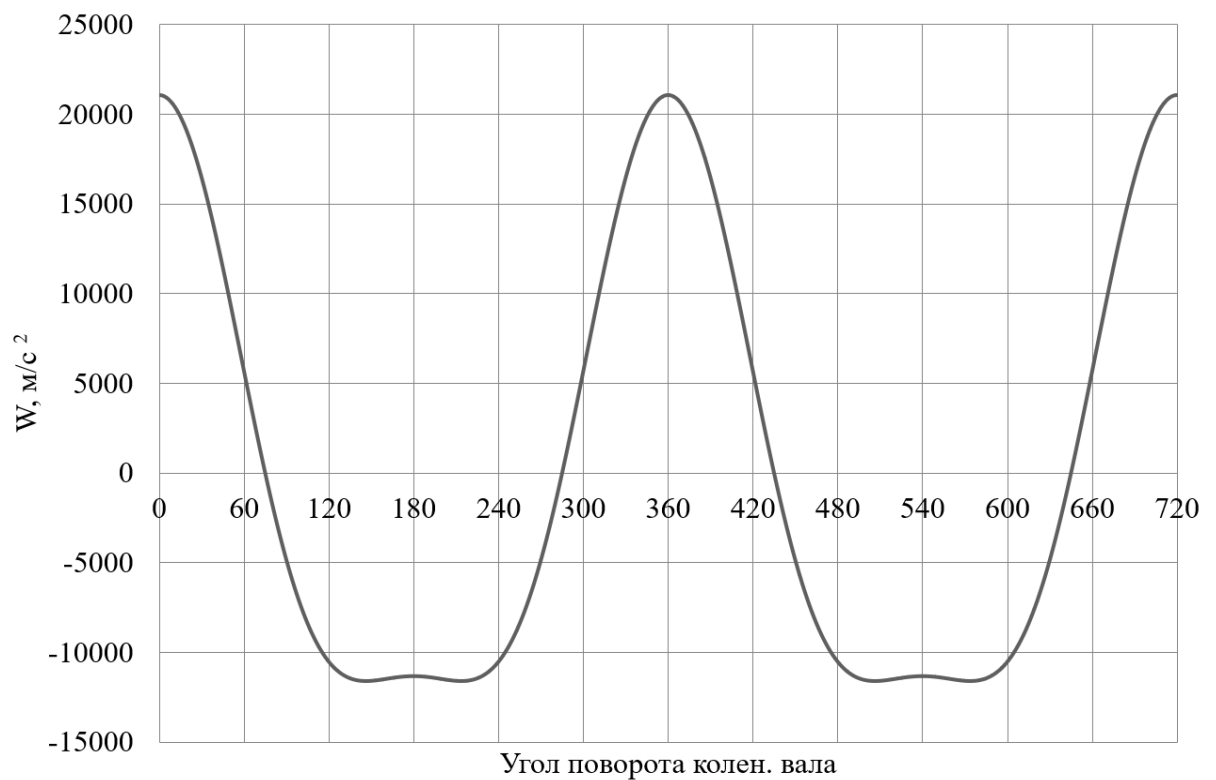


Рисунок 17 – Диаграмма изменения ускорения поршня

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

3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя

Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма проектируемого двигателя проводился при частоте вращения коленчатого вала 6000 мин^{-1} , при работе на бензине и метаноле, результаты приведение масс кривошипно-шатунного механизма по двух массовой схеме показаны в таблице 12.

Таблица 12 – Приведение масс кривошипно-шатунного механизма

Параметр	Величина
Площадь поршня, м^2	0,004072
Удельная масса поршня, $\text{кг}/\text{м}^2$	80
Масса поршневой группы, кг	0,32572
Удельная масса шатуна, $\text{кг}/\text{м}^2$	130
Масса шатуна, кг	0,5292955
Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца, кг	0,146
Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа, кг	0,384
Удельная масса одного колена вала, $\text{кг}/\text{м}^2$	140
Масса неуравновешенных частей одного колена вала, кг	0,57
Массы, совершающие возвратно-поступательное движение	0,47128
Массы, совершающие вращательное движение	0,95375
Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна, Н	-6211,26
Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа, Н	-9226,277
Центробежная сила инерции вращающихся масс, Н	-15437,54

Результаты расчета приведены в виде графиков. На рисунке 14 приведены силы инерции возвратно-поступательного движения.

В таблице 13 приведены силы, действующие на поршневой палец и крутящий момент двигателя на бензине.

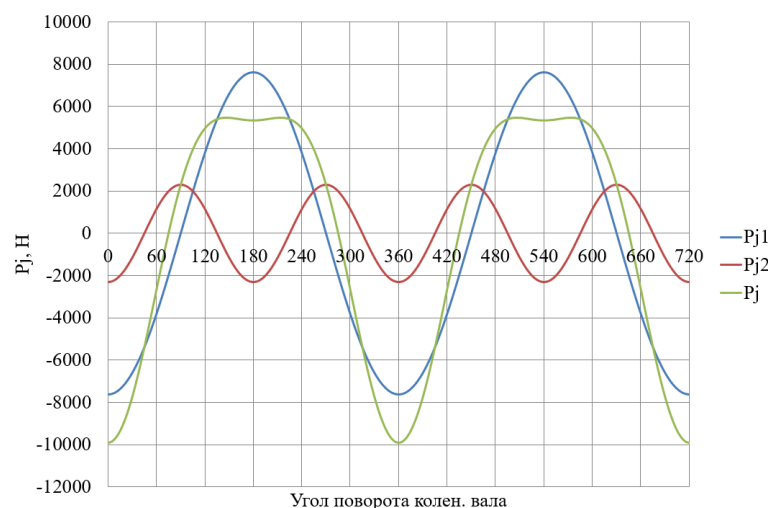


Рисунок 14 – Силы инерции возвратно-поступательного движения поршня и шатуна

Таблица 13 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец и крутящий момент двигателя на бензине

φ_{KB}	N, Н	K, Н	Z, Н	T, Н	Мкр.цл	φ_{KB}	N, Н	K, Н	Z, Н	T, Н	Мкр.цл
0	0	-9948	-9948	0	0	370	204	3911,7	3811,6	879,26	36,05
10	-506	-9708	-9459	-2182	-89,5	380	768,2	7477,6	6726,8	3265,8	133,9
20	-925	-9000	-8096	-3931	-161	390	1231	8199,2	6404,5	5119,5	209,9
30	-1182	-7870	-6147	-4914	-201	400	1261	6530,2	4097,9	5084,4	208,5
40	-1234	-6391	-4010	-4976	-204	410	1125	4890,7	2197,3	4369,3	179,1
50	-1072	-4659	-2093	-4163	-171	420	1154	4436,3	1142,4	4286,7	175,8
60	-727	-2794	-719,4	-2699	-111	430	1347	4773,4	300,17	4763,9	195,3
70	-260	-920,2	-57,87	-918,4	-37,7	440	1616	5462,4	-685,2	5419,3	222,2
80	247,5	836,87	-105	830,26	34,04	450	1873	6235,7	-1873	5947,8	243,9
90	712,4	2371,7	-712,4	2262,2	92,75	460	2047	6919,1	-3163	6153,7	252,3
100	1068	3610,2	-1651	3210,8	131,6	470	2093	7416,2	-4400	5969,7	244,8
110	1275	4518,9	-2681	3637,5	149,1	480	2002	7695,5	-5449	5434,2	222,8
120	1328	5106,5	-3616	3605,9	147,8	490	1789	7775,2	-6234	4646,4	190,5
130	1247	5417,5	-4344	3237,4	132,7	500	1488	7706,5	-6749	3720,6	152,5
140	1066	5520,5	-4834	2665,2	109,3	510	1074	7153,2	-6662	2605,7	106,8
150	825,1	5493,8	-5116	2001,2	82,05	520	588,8	5731,6	-5559	1396,6	57,26
160	556	5412,5	-5249	1318,9	54,07	530	288,6	5532,9	-5492	675,27	27,69
170	278,4	5337,4	-5298	651,41	26,71	540	6E-13	5380,9	-5381	2E-12	8E-14
180	2E-13	5307,9	-5308	7E-13	3E-14	550	-280	5373,8	-5334	-655,8	-26,9
190	-279	5339,9	-5300	-651,7	-26,7	560	-560	5449	-5285	-1328	-54,4
200	-557	5422,5	-5259	-1321	-54,2	570	-831	5530,5	-5151	-2015	-82,6
210	-829	5517,1	-5138	-2010	-82,4	580	-1073	5557,5	-4867	-2683	-110
220	-1074	5564	-4873	-2686	-110	590	-1255	5454,8	-4374	-3260	-134
230	-1263	5490,1	-4402	-3281	-135	600	-1338	5144	-3642	-3632	-149
240	-1358	5219,8	-3696	-3686	-151	610	-1286	4556,7	-2704	-3668	-150
250	-1323	4688,4	-2782	-3774	-155	620	-1079	3648,2	-1668	-3245	-133
260	-1141	3857,4	-1764	-3431	-141	630	-724	2409,8	-723,8	-2299	-94,2
270	-819	2726,9	-819,1	-2601	-107	640	-259	874,86	-109,7	-867,9	-35,6
280	-398	1344,3	-168,6	-1334	-54,7	650	249,1	-882,4	-55,49	880,66	36,11
290	54,68	-193,7	-12,18	193,35	7,927	660	716,9	-2756	-709,7	2663,1	109,2
300	453,6	-1744	-449	1684,9	69,08	670	1064	-4622	-2077	4129,4	169,3
310	717,6	-3119	-1401	2786,3	114,2	680	1227	-6354	-3987	4946,9	202,8
320	789,9	-4091	-2567	3185,3	130,6	690	1176	-7833	-6119	4891,1	200,5
330	661,5	-4405	-3441	2750,4	112,8	700	920,8	-8963	-8063	3914,8	160,5
340	397,5	-3869	-3481	1689,8	69,28	710	504,4	-9671	-9424	2173,9	89,13
350	130,5	-2502	-2438	562,49	23,06	720	1E-12	-9948	-9948	5E-12	2E-13
360	2E-15	-26,1	-26,1	6E-15	3E-16	Мкр.ц.Суммарный Н*м					70,60

В таблице 14 приведены силы, действующие на поршневой палец и крутящий момент двигателя на метаноле.

Таблица 14 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец и крутящий момент двигателя на метаноле

Ф _{кв}	N, Н	K, Н	Z, Н	T, Н	Мкр.ц1	Ф _{кв}	N, Н	K, Н	Z, Н	T, Н	Мкр.ц1
0	0	-9948	-9948	0	0	370	224,3	4299,6	4189,6	966,45	39,62
10	-506	-9708	-9459	-2182	-89,5	380	758	7378,9	6637,9	3222,7	132,1
20	-925	-9000	-8096	-3931	-161	390	1169	7784	6080,2	4860,2	199,3
30	-1182	-7870	-6147	-4914	-201	400	1196	6194,4	3887,1	4822,9	197,7
40	-1234	-6391	-4010	-4976	-204	410	1073	4661,9	2094,5	4164,9	170,8
50	-1072	-4659	-2093	-4163	-171	420	1046	4021,4	1035,6	3885,7	159,3
60	-727	-2794	-719,4	-2699	-111	430	1252	4437,1	279,02	4428,3	181,6
70	-260	-920,2	-57,87	-918,4	-37,7	440	1533	5181,6	-649,9	5140,7	210,8
80	247,5	836,87	-105	830,26	34,04	450	1801	5995	-1801	5718,2	234,4
90	712,4	2371,7	-712,4	2262,2	92,75	460	1984	6708	-3067	5965,9	244,6
100	1068	3610,2	-1651	3210,8	131,6	470	2040	7227,4	-4288	5817,7	238,5
110	1275	4518,9	-2681	3637,5	149,1	480	1957	7523,5	-5327	5312,7	217,8
120	1328	5106,5	-3616	3605,9	147,8	490	1752	7616,1	-6107	4551,3	186,6
130	1247	5417,5	-4344	3237,4	132,7	500	1459	7557	-6618	3648,4	149,6
140	1066	5520,5	-4834	2665,2	109,3	510	1053	7010,2	-6529	2553,6	104,7
150	825,1	5493,8	-5116	2001,2	82,05	520	563,7	5487	-5322	1337	54,82
160	556	5412,5	-5249	1318,9	54,07	530	281,7	5400,6	-5360	659,12	27,02
170	278,4	5337,4	-5298	651,41	26,71	540	6E-13	5370,9	-5371	2E-12	8E-14
180	2E-13	5307,9	-5308	7E-13	3E-14	550	-282	5400,6	-5360	-659,1	-27
190	-279	5339,9	-5300	-651,7	-26,7	560	-563	5475,9	-5311	-1334	-54,7
200	-557	5422,5	-5259	-1321	-54,2	570	-835	5557,6	-5176	-2024	-83
210	-829	5517,1	-5138	-2010	-82,4	580	-1078	5584,7	-4891	-2696	-111
220	-1074	5564	-4873	-2686	-110	590	-1261	5482,3	-4396	-3276	-134
230	-1263	5490,1	-4402	-3281	-135	600	-1345	5171,8	-3662	-3652	-150
240	-1358	5219,8	-3696	-3686	-151	610	-1294	4584,6	-2720	-3690	-151
250	-1323	4688,4	-2782	-3774	-155	620	-1087	3676,2	-1681	-3270	-134
260	-1141	3857,4	-1764	-3431	-141	630	-732	2437,8	-732,2	-2325	-95,3
270	-819	2726,9	-819,1	-2601	-107	640	-267	902,87	-113,2	-895,7	-36,7
280	-398	1344,2	-168,6	-1334	-54,7	650	241,2	-854,5	-53,73	852,82	34,97
290	54,69	-193,8	-12,18	193,38	7,929	660	709,7	-2728	-702,6	2636,3	108,1
300	453,6	-1744	-449	1684,9	69,08	670	1057	-4595	-2064	4104,8	168,3
310	717,6	-3119	-1401	2786,4	114,2	680	1221	-6326	-3970	4925,7	202
320	789,9	-4091	-2567	3185,4	130,6	690	1172	-7806	-6098	4874,2	199,8
330	661,6	-4405	-3441	2750,5	112,8	700	918,1	-8937	-8039	3903	160
340	413,9	-4029	-3625	1759,8	72,15	710	503	-9644	-9398	2167,9	88,88
350	130,7	-2507	-2442	563,41	23,1	720	1E-12	-9948	-9948	5E-12	2E-13
360	-0	346,12	346,12	-8E-14	-0	Мкр.ц.Суммарный Н*м					67,06

В таблице 15 приведены силы, действующие на шатунную и коренные шейки коленчатого вала двигателя на бензине.

Таблица 15 – Силы, действующие на шатунную и коренные шейки коленчатого вала двигателя на бензине

φ _{кв}	Рш.ш., Н	Рк.ш1(4), Н	Рк.ш2(3), Н	φ _{кв}	Рш.ш., Н	Рк.ш1(4), Н	Рк.ш2(3), Н
0	16159,69	12692,982	20782	370	2555,692	5829,5797	20765
10	15821,61	12496,067	20765	380	3306,264	4651,4316	20752
20	14837,61	11929,884	20752	390	5123,16	5191,4671	20680
30	13299,79	11068,625	20680	400	5506,112	6213,6731	20484
40	11368,3	10037,136	20484	410	5933,191	6971,2858	20093
50	9289,545	9009,19	20093	420	6638,439	7462,0128	19454
60	7437,816	8190,4481	19454	430	7591,852	7934,6579	18557
70	6336,046	7761,3002	18557	440	8770,935	8504,5595	17475
80	6370,566	7782,3343	17475	450	10036,53	9151,9326	16393
90	7283,852	8153,7982	16393	460	11213,84	9796,1664	15616
100	8492,185	8693,5562	15616	470	12175,52	10358,318	15481
110	9607,702	9240,1526	15481	480	12864,25	10790,883	16164
120	10467,65	9695,7231	16164	490	13284,51	11082,112	17521
130	11040,35	10022,23	17521	500	13483,61	11248,1	19151
140	11362,74	10223,233	19151	510	13134,1	11126,2	20575
150	11503,06	10325,556	20575	520	11852,64	10521,371	21394
160	11536,29	10364,462	21394	530	11722,27	10469,987	21412
170	11527,22	10372,653	21412	540	11592,2	10409,24	20425
180	11519,14	10372,711	20425	550	11563,48	10390,749	18273
190	11529,65	10373,867	18273	560	11572,46	10382,402	16126
200	11546,17	10369,364	16126	570	11539,05	10343,217	15309
210	11525,87	10336,752	15309	580	11398,42	10240,457	15394
220	11404,74	10243,511	15394	590	11075,47	10038,788	15386
230	11108,8	10054,494	15386	600	10501,79	9711,2708	15247
240	10570,65	9742,6356	15247	610	9640,026	9254,1615	15437
250	9752,876	9303,0717	15437	620	8521,076	8705,2241	16138
260	8681,409	8769,9286	16138	630	7306,052	8161,9924	17226
270	7496,025	8231,6765	17226	640	6380,308	7785,7412	18449
280	6517,775	7831,516	18449	650	6328,328	7759,0186	19577
290	6226,447	7725,4657	19577	660	7415,678	8182,7005	20475
300	6870,081	7987,8238	20475	670	9259,665	8997,2022	21098
310	8106,397	8533,8694	21098	680	11334,84	10022,33	21468
320	9338,525	9142,1831	21468	690	13264,68	11052,105	21451
330	10036,16	9538,7594	21451	700	14801,74	11912,386	20886
340	9838,058	9496,722	20886	710	15785,41	12478,073	20843
350	8667,926	8942,3906	20843	720	16159,69	12692,982	20782
360	6237,361	7731,8192	20782				

В таблице 16 приведены силы, действующие на шатунную и коренные шейки коленчатого вала двигателя на метаноле.

Таблица 16 – Силы, действующие на шатунную и коренные шейки коленчатого вала двигателя на метаноле

$\varphi_{кв}$	Рш.ш., Н	Рк.ш1(4), Н	Рк.ш2(3), Н	$\varphi_{кв}$	Рш.ш., Н	Рк.ш1(4), Н	Рк.ш2(3), Н
0	16159,69	12692,982	20777	370	2240,823	5644,7091	20778
10	15821,61	12496,067	20778	380	3250,81	4685,5955	20765
20	14837,61	11929,884	20765	390	4862,018	5272,1595	20693
30	13299,79	11068,625	20693	400	5353,692	6258,4383	20497
40	11368,3	10037,136	20497	410	5856,114	6988,9829	20105
50	9289,545	9009,19	20105	420	6472,016	7458,4887	19465
60	7437,816	8190,4481	19465	430	7402,8	7896,0535	18568
70	6336,046	7761,3002	18568	440	8573,37	8444,4293	17484
80	6370,566	7782,3343	17484	450	9843,249	9080,9559	16399
90	7283,852	8153,7982	16399	460	11030,63	9721,153	15618
100	8492,185	8693,5562	15618	470	12003,59	10282,925	15479
110	9607,702	9240,1526	15479	480	12702,73	10716,763	16158
120	10467,65	9695,7231	16158	490	13131,77	11009,807	17513
130	11040,35	10022,23	17513	500	13337,87	11177,586	19141
140	11362,74	10223,233	19141	510	12993,25	11057,028	20563
150	11503,06	10325,556	20563	520	11610,13	10401,086	21457
160	11536,29	10364,462	21457	530	11590,22	10404,092	21401
170	11527,22	10372,653	21401	540	11582,2	10404,237	20239
180	11519,14	10372,711	20239	550	11590,22	10404,092	18083
190	11529,65	10373,867	18083	560	11599,13	10395,631	16171
200	11546,17	10369,364	16171	570	11565,59	10356,242	15471
210	11525,87	10336,752	15471	580	11424,73	10253,16	15499
220	11404,74	10243,51	15499	590	11101,39	10051,001	15437
230	11108,79	10054,493	15437	600	10526,97	9722,7425	15291
240	10570,65	9742,634	15291	610	9663,886	9264,5024	15427
250	9752,871	9303,0694	15427	620	8542,424	8713,8442	16094
260	8681,402	8769,9257	16094	630	7322,505	8168,0576	17164
270	7496,017	8231,6733	17164	640	6387,628	7788,2822	18378
280	6517,768	7831,5137	18378	650	6322,775	7757,3654	19504
290	6226,45	7725,467	19504	660	7399,434	8177,0105	20402
300	6870,109	7987,8339	20402	670	9237,666	8988,3774	21026
310	8106,465	8533,8967	21026	680	11310,18	10011,421	21398
320	9338,659	9142,242	21398	690	13238,8	11039,928	21382
330	10036,4	9538,8743	21382	700	14775,29	11899,486	20766
340	9992,135	9571,643	20766	710	15758,72	12464,805	20777
350	8671,967	8944,3987	20777	720	16159,69	12692,982	20777
360	5865,146	7545,7116	20777				

На рисунке 15 приведено сравнение суммарной силы, действующую на шатунную шейку в полярных координатах. А на рисунке 16 приведено сравнение суммарных сил, действующих на 1-ю коренную шейку в полярных координатах.

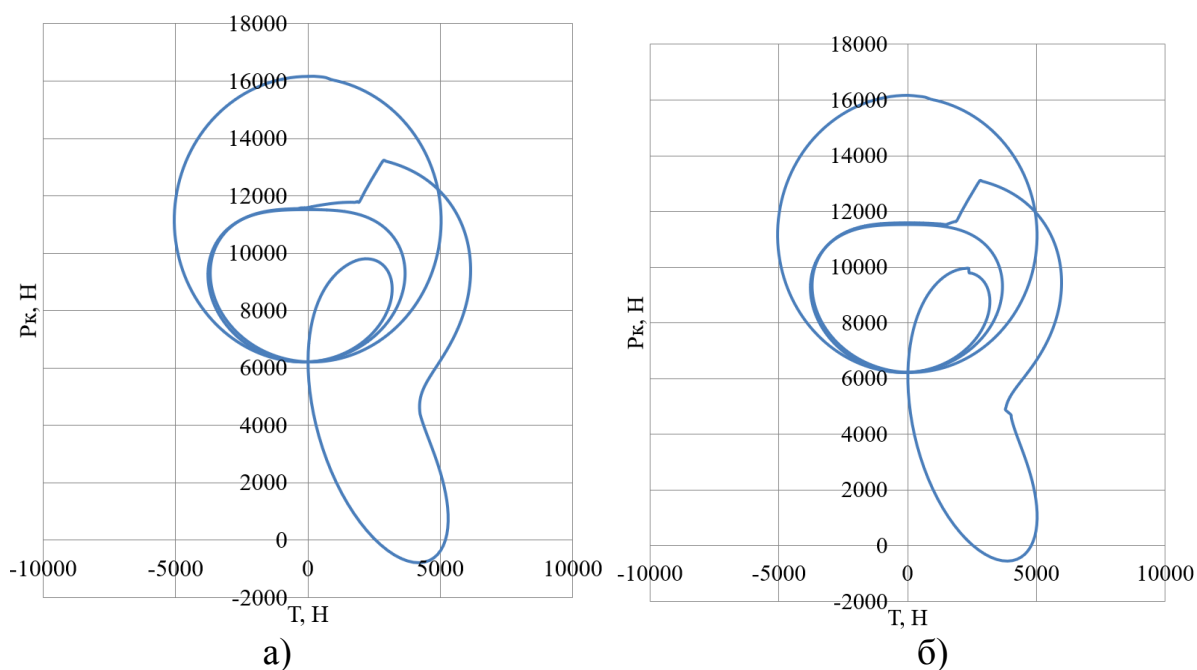


Рисунок 15 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку в полярных координатах: (а) двигатель на бензине; (б) двигатель на метаноле

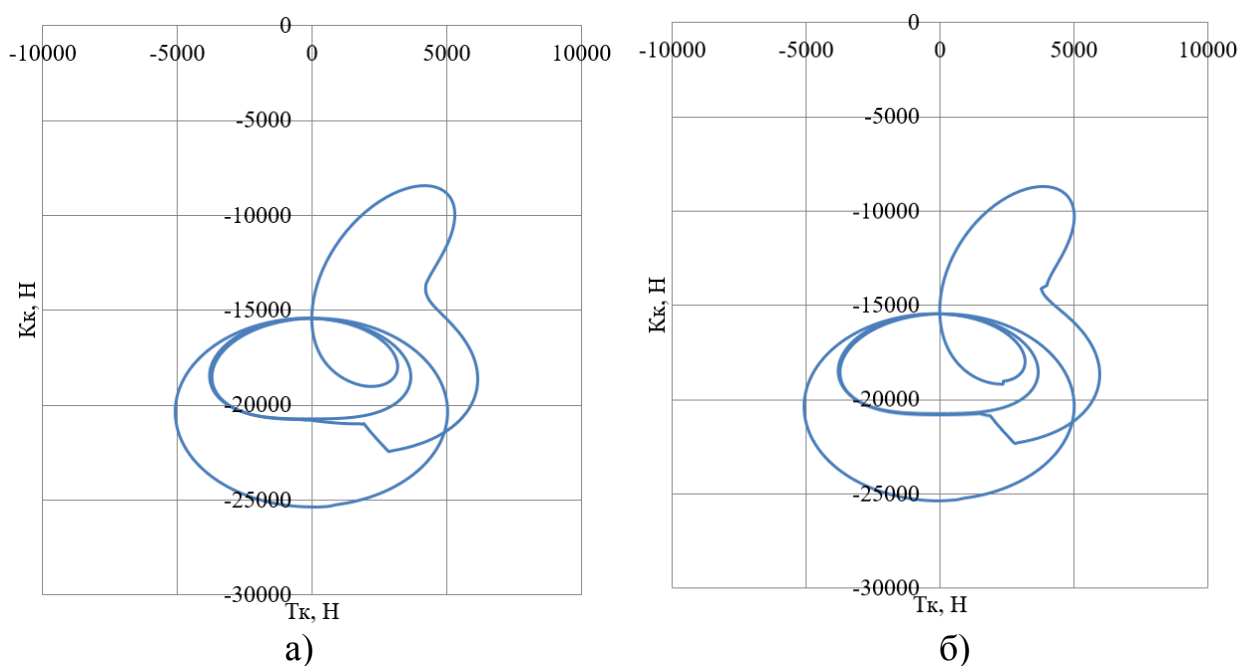


Рисунок 16 – Суммарные силы, действующие на 1-ю коренную шейку в полярных координатах: (а) двигатель на бензине; (б) двигатель на метаноле

Выводы по 3-му разделу

Переход на альтернативное топливо (метанол) позволяет снизить нагрузки на кривошипно-шатунный механизм.

4 Анализ токсичности отработавших газов при работе трехцилиндрового двигателя на бензине и метаноле

Анализ токсичности отработавших газов при работе трехцилиндрового двигателя на бензине и метаноле проводился по модели, представленной на рисунке 17, выполненной с использованием ведущего на рынке программного обеспечения для моделирования двигателей WAVE Ricardo 17.1. Реализована прогнозирующая модель горения, использующая квазиразмерный процесс распространения пламени. Трехмерная модель формы камеры сгорания используется для расчета площади распространения пламени. Особое внимание при проверке модели уделялось давлению в цилиндре во время газообмена и сгорания для оценки производительности впускной и выпускной систем, а также прогнозирующей модели сгорания.

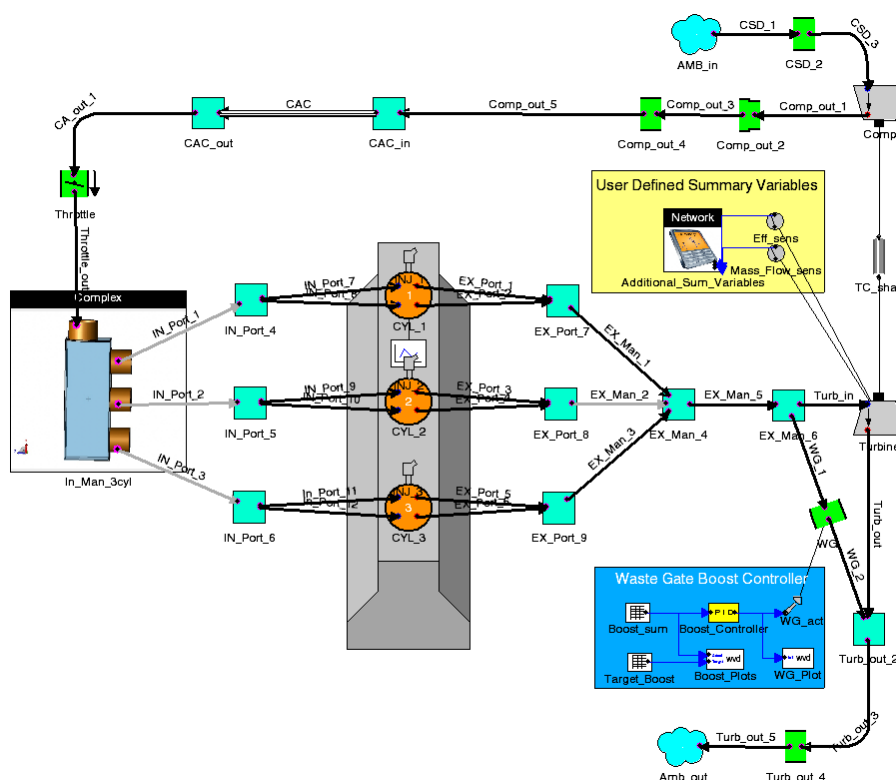


Рисунок 17 – Структура модели виртуального трехцилиндрового двигателя на бензине и метаноле

Также проведен расчет скоростных характеристики двигателя при работе на бензине и метаноле, представлены в таблицах 17 и 18.

Таблица 17 – Скоростные характеристики трехцилиндрового двигателя при работе на бензине

Скорость двигателя	rpm	6000	5499	5000	4499	3999	3499	3000	2500	1999	1499	1379
Массовый расход воздуха	kg/hr	107.166	102.787	96.3481	87.5255	78.5145	67.2302	57.3769	48.382	41.6485	35.7478	33.4876
Обратный поток (закрытие)	%	0.910708	1.32805	2.81989	2.45842	1.19677	0.865526	0.554181	1.99289	1.63682	0.213816	0.707027
Обратный поток (перекрытие)	%	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	-0
Начало горения	deg	-8.66221	-7.44002	-8.09617	-7.86055	-4.69895	-4.16034	-2.21851	-2.01995	-0.0506935	1.07046	2.21253
Максимальная скорость повышения давления	bar/deg	2.25256	2.25602	2.36676	2.4755	2.73537	2.75908	2.85763	2.92359	3.01926	2.93024	3.00187
Массовый расход топлива	kg/hr	7.8332	7.76602	7.69871	6.66583	5.83324	5.16658	4.49998	3.66653	2.99994	2.48331	2.33328
GMEP	bar	20.1132	21.0081	21.6756	21.9752	22.1455	21.6672	21.3523	21.193	20.9123	20.5142	20.434
Скорость теплопередачи	W	11278.3	10611.7	9772.33	9125.73	8427.68	7402.94	6506.35	5919.28	5150.96	4163.75	3939.58
IMEP	bar	18.4713	19.4883	20.3281	21.0349	21.5087	21.3328	21.2151	21.1397	21.0463	20.7927	20.7561
Перекрытие клапана	deg	-21	-19	-20	-11	4	9	9	24	39	49	49
Максимальное давление	bar	78.6539	79.6693	82.188	82.7782	83.3081	81.5353	79.9385	78.7927	76.7808	74.2127	73.2494
PMEP	bar	-2.12899	-1.95489	-1.70962	-1.24475	-0.928861	-0.553107	-0.288777	-0.219968	-0.0897281	0.127684	0.191623
Объемный коэффициент наполнения	-	0.873212	0.899195	0.905864	0.934393	0.977398	0.985535	1.0113	1.06754	1.13292	1.3261	1.35422
Объемный коэффициент наполнения (только воздух)	-	0.873214	0.899203	0.905878	0.934403	0.977399	0.985537	1.0113	1.06754	1.13292	1.3261	1.35422
Остаточная газовая фракция	%	4.54388	4.01024	3.69833	3.17139	2.47723	2.26605	2.11874	1.37148	0.426546	0.0856372	0.0709644
Продолжительность от 0% до 10% сжигания массы топлива	deg	14.7969	14.6744	15.5682	15.4338	12.9066	12.6128	12.332	13.4382	12.8726	12.802	12.9107
Продолжительность между от 0% до 2% сжигания массы топлива	deg	8.82943	8.75825	9.57798	9.49432	7.57571	7.40192	7.35908	8.38295	8.02984	7.98608	8.16
Продолжительность между от 0% до 5% сжигания массы топлива	deg	11.8152	11.7169	12.597	12.488	10.2321	9.99852	9.84795	10.9399	10.4794	10.4222	10.5709
Продолжительность от 0% до 90% сжигания массы топлива	deg	38.8023	38.4795	38.5734	38.2376	34.9096	34.1161	32.3349	32.4408	31.0744	30.9036	30.4124
Время сжигания 1% массы топлива	deg	-1.56417	-0.398501	-0.29909	-0.129632	1.34694	1.74845	3.69708	4.84615	6.52655	7.61197	8.93389
Продолжительность сжигания от 10% до 90% массы топлива	deg	24.0054	23.805	23.0052	22.8038	22.0031	21.5033	20.0029	19.0026	18.2018	18.1016	17.5017
Время сжигания 10% массы топлива	deg	6.13464	7.23443	7.47203	7.57328	8.20759	8.45245	10.1135	11.4183	12.8219	13.8724	15.1232
Время сжигания 50% массы топлива	deg	18.0006	19.0006	19.0005	19.0005	19.0005	19.0005	20.0005	21.0004	22.0004	23.0004	24.0004
Время сжигания 90% массы топлива	deg	30.1401	31.0395	30.4772	30.3771	30.2107	29.9557	30.1164	30.4208	31.0237	31.9741	32.6249
Время сжигания 99% массы топлива	deg	37.221	37.8873	36.8278	36.7532	36.4862	36.1287	35.6264	35.4727	35.8465	36.7023	37.1149
Время максимального давления	deg	23.37	24.6921	25.3125	25.143	24.9046	25.1969	26.3303	27.2775	28.3992	29.5418	30.5732
Объемный КПД	-	1.53924	1.61055	1.66063	1.67619	1.69157	1.65537	1.64822	1.66779	1.79461	2.0538	2.09124

Таблица 18 – Скоростные характеристики трехцилиндрового двигателя при работе на метаноле

Скорость двигателя	rpm	6000	5500	5000	4500	4000	3500	3000	2500	1999	1500	1000
Массовый расход воздуха	kg/hr	108.577	105.316	99.8963	90.6334	81.4214	70.1655	60.1649	51.3249	43.8593	34.752	31.892
Обратный поток (закрытие)	%	0.799055	1.02929	2.16387	1.97989	0.969574	0.736104	0.47777	1.79066	1.91675	0.220914	0.667778
Обратный поток (перекрытие)	%	-0	-0	-0	-0	0.0101184	-0	-0	-0	-0	-0	-0
Начало горения	deg	-8.66221	-7.44002	-8.09617	-7.86055	-4.69895	-4.16034	-2.21851	-2.01995	-0.0506935	1.07046	2.21253
Макс. скорость повышения давления	bar/deg	0.997974	1.03556	1.21453	1.18385	1.28876	1.40121	1.5278	1.49542	1.62314	1.82232	1.89189
Массовый расход топлива	kg/hr	7.83324	7.76633	7.69931	6.66605	5.83327	5.16665	4.49998	3.66657	2.99993	2.48332	2.3333
GMEP	bar	11.5518	12.4579	13.5875	13.1881	13.0102	13.1497	13.2072	12.769	12.7506	13.6475	13.6952
Скорость теплопередачи	W	5917.2	5726.65	5565.59	4845.01	4261.69	3840.1	3418.57	2945.56	2513.41	2292.53	2199.59
IMEP	bar	9.72005	10.7228	12.0124	11.9495	12.0339	12.4698	12.711	12.3273	12.5314	13.6912	13.7904
Перекрытие клапана	deg	-21	-19	-20	-11	4	9	9	24	39	49	49
Максимальное давление	bar	56.7374	58.4186	62.1492	60.7573	60.1274	59.7588	58.9809	57.2422	55.7497	55.771	54.9366
PMEP	bar	-2.18655	-2.05542	-1.85054	-1.45139	-1.16359	-0.828947	-0.606634	-0.551358	-0.371209	-0.0700447	-0.004121
Объемный коэффициент наполнения	-	0.884291	0.917703	0.935502	0.96375	1.00969	1.02475	1.05608	1.12778	1.18575	1.3634	1.3877
Объемный коэффициент наполнения (только воздух)	-	0.884293	0.917709	0.935513	0.96376	1.00969	1.02475	1.05609	1.12778	1.18575	1.3634	1.3877
Остаточная газовая фракция	%	8.18326	7.17377	6.31942	5.90118	4.9125	4.30548	3.75438	2.52501	0.924149	0.212492	0.183928
Продолжительность от 0% до 10% сжигания массы топлива	deg	14.7957	14.6729	15.5696	15.4342	12.905	12.6124	12.3316	13.4378	12.8724	12.8018	12.9104
Продолжительность между от 0% до 2% сжигания массы топлива	deg	8.83246	8.75434	9.57491	9.49196	7.57302	7.40115	7.35882	8.38205	8.02943	7.98569	8.15983
Продолжительность между от 0% до 5% сжигания массы топлива	deg	11.8139	11.7155	12.5959	12.4886	10.2299	9.99806	9.84821	10.94	10.4793	10.422	10.5705
Продолжительность от 0% до 90% сжигания массы топлива	deg	38.8037	38.4795	38.573	38.2382	34.9096	34.1159	32.3351	32.4411	31.0745	30.9035	30.4124
Время сжигания 1% массы топлива	deg	-1.56889	-0.403702	-0.297801	-0.131794	1.345	1.74782	3.69619	4.84568	6.5267	7.61167	8.9337
Продолжительность сжигания от 10% до 90% массы топлива	deg	24.008	23.8067	23.0034	22.804	22.0046	21.5035	20.0035	19.0033	18.2021	18.1017	17.5019
Время сжигания 10% массы топлива	deg	6.13347	7.23286	7.47345	7.57361	8.20604	8.45204	10.1131	11.4179	12.8218	13.8723	15.123
Время сжигания 50% массы топлива	deg	18.0006	19.0006	19.0005	19.0005	19.0005	19.0005	20.0005	21.0004	22.0004	23.0004	24.0004
Время сжигания 90% массы топлива	deg	30.1415	31.0395	30.4768	30.3776	30.2106	29.9555	30.1166	30.4211	31.0238	31.974	32.6249
Время сжигания 99% массы топлива	deg	37.8113	38.5948	36.9834	36.739	36.7962	36.0023	35.536	35.2981	35.4873	35.8475	36.3283
Время максимального давления	deg	21.7349	22.8465	23.5003	23.4509	23.5156	23.8327	25.1386	26.3261	27.4849	28.7937	29.8947
Объемный КПД	-	1.5595	1.65018	1.72178	1.7357	1.75419	1.72765	1.72831	1.76925	1.88987	1.99659	1.9916

На рисунке 18 представлено среднее индикаторное давление при работе на бензине и метаноле.

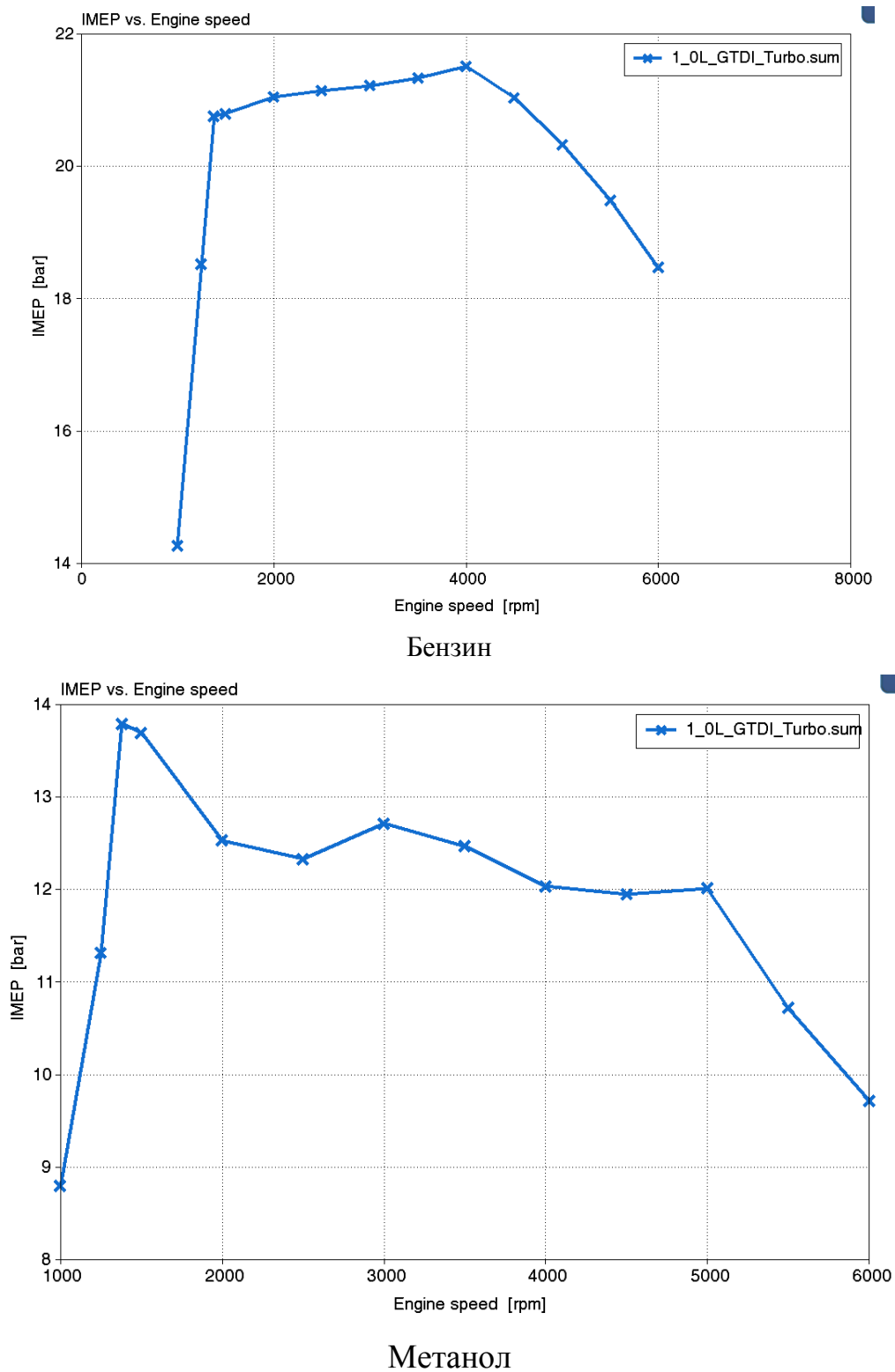
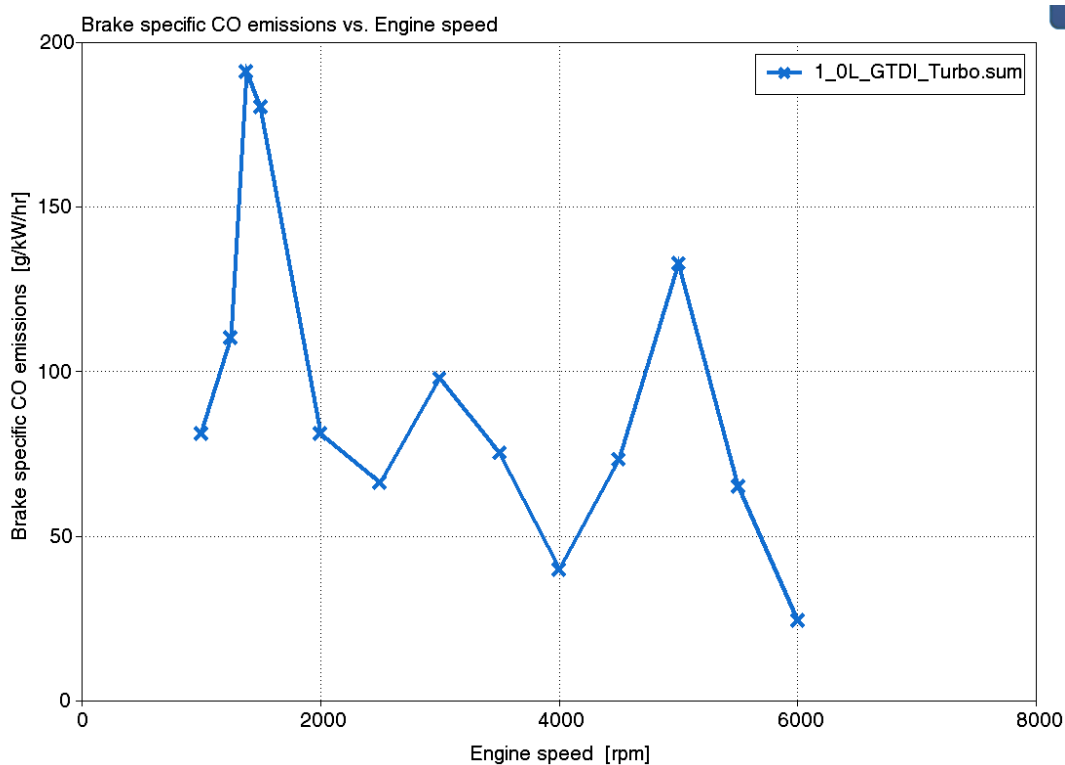
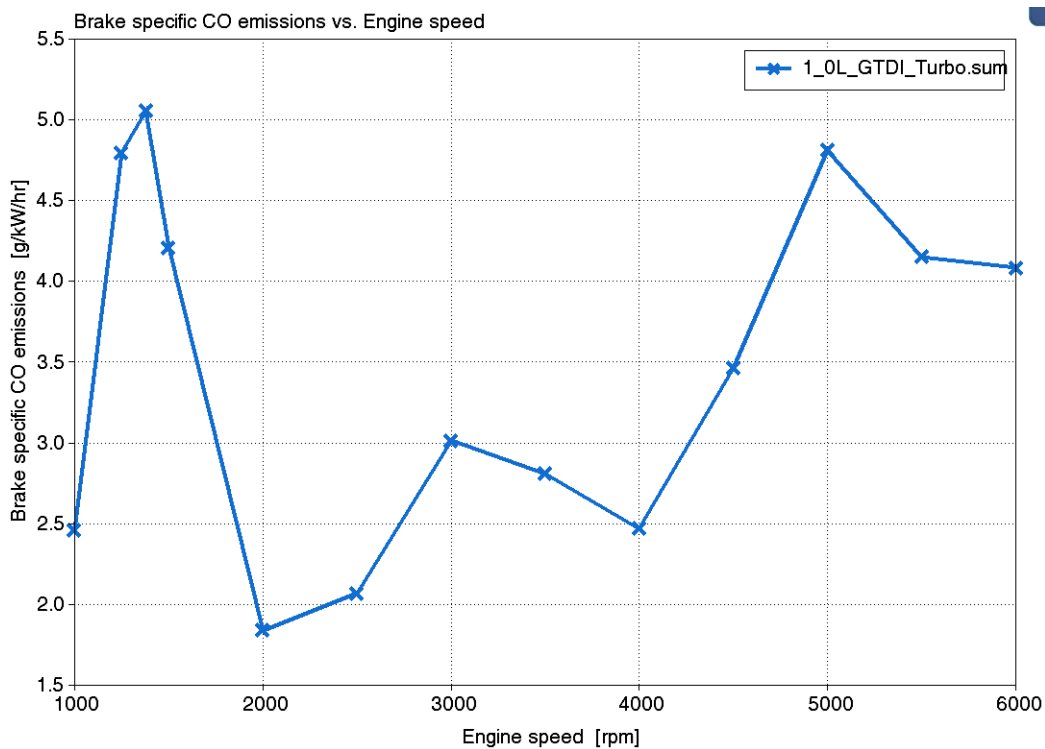


Рисунок 18 – Среднее индикаторное давление при работе на бензине и метаноле

На рисунке 19 представлена зависимость удельных выбросов по CO в г/кВт ч от частоты вращения при работе на бензине и метаноле.



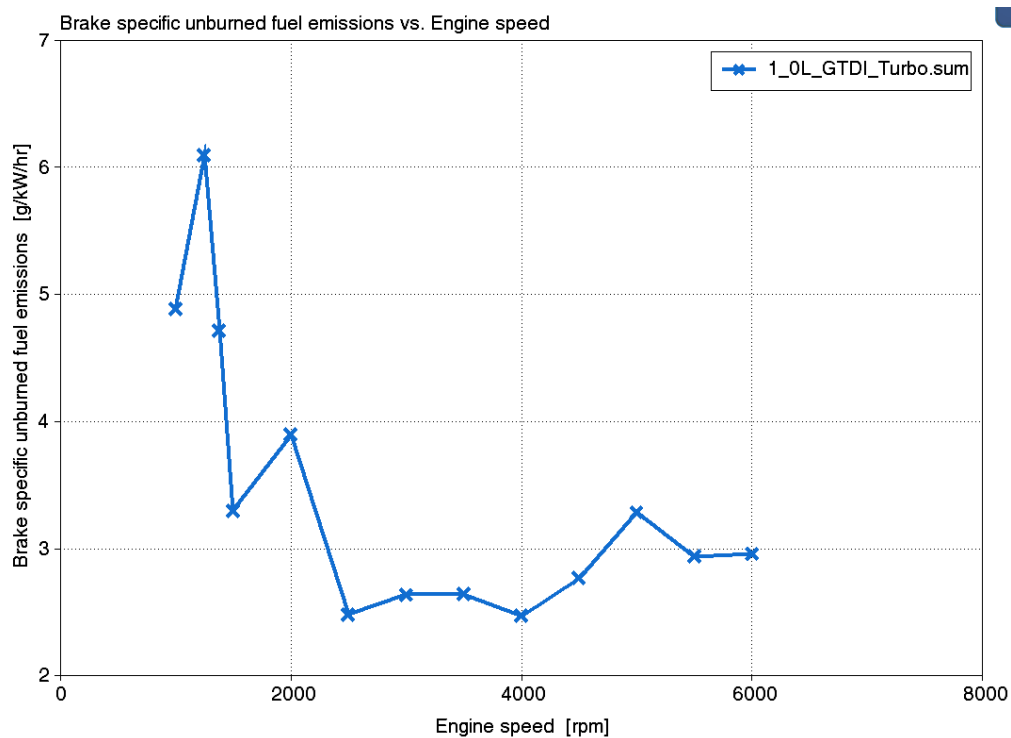
Бензин



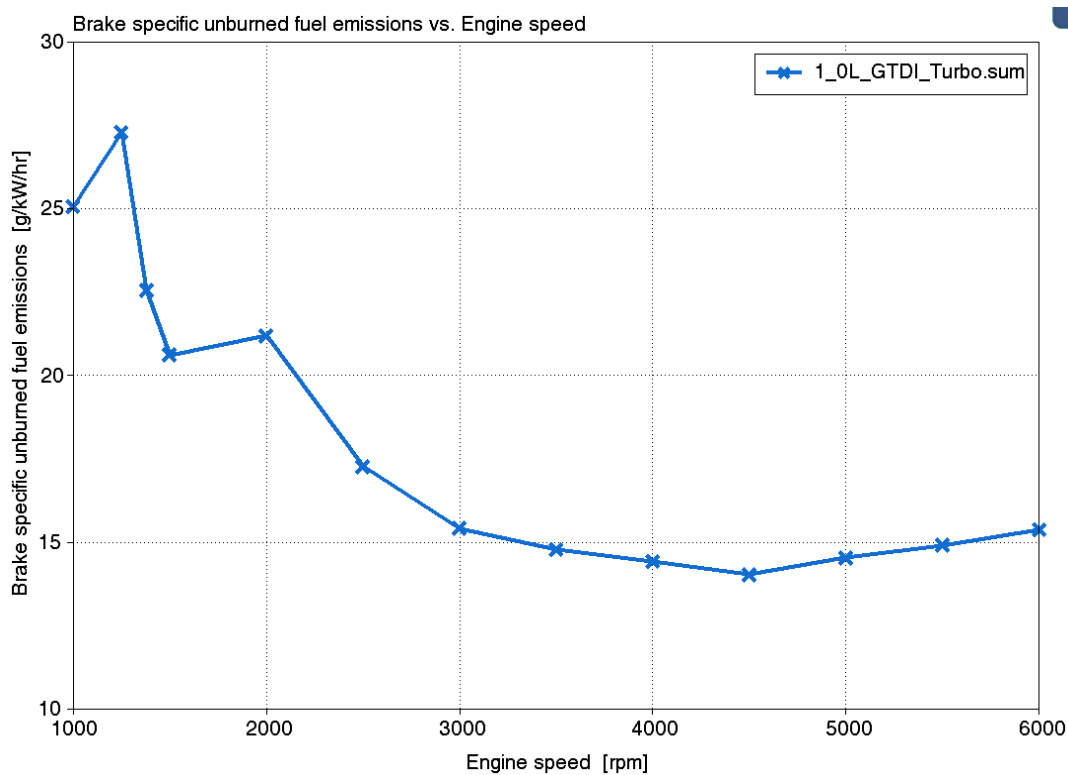
Метанол

Рисунок 19 – Зависимость удельных выбросов по CO в г/кВт ч от частоты вращения при работе на бензине и метаноле.

На рисунке 20 представлена зависимость удельных выбросов по СН в г/кВт ч от частоты вращения при работе на бензине и метаноле.



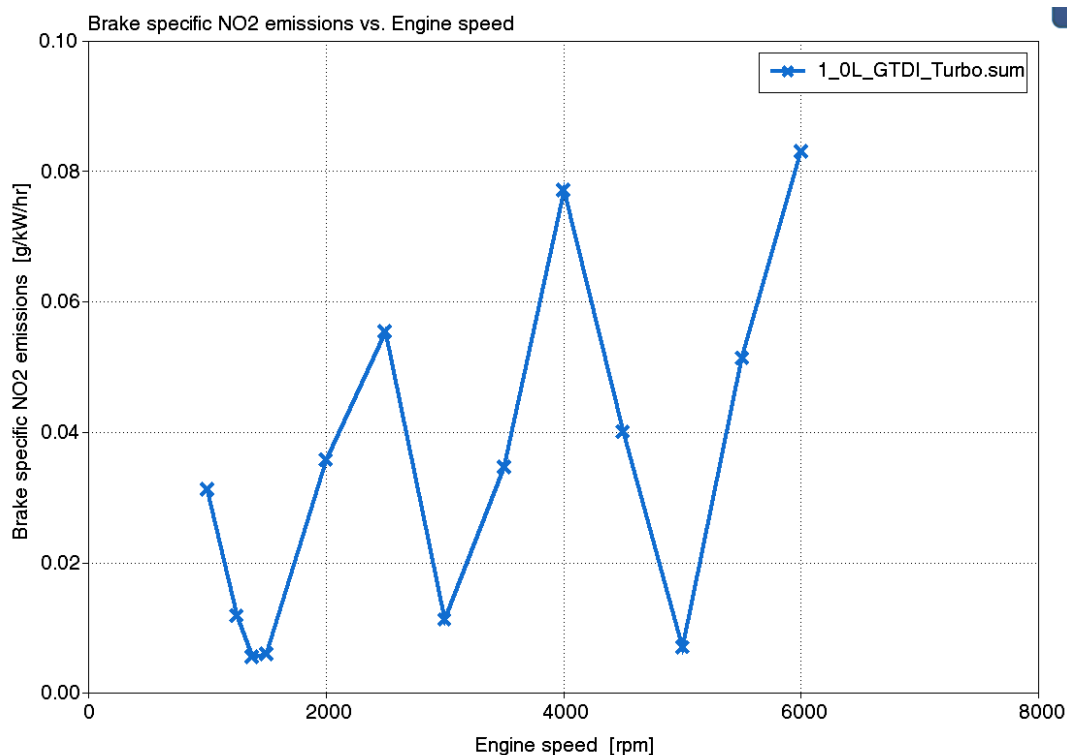
Бензин



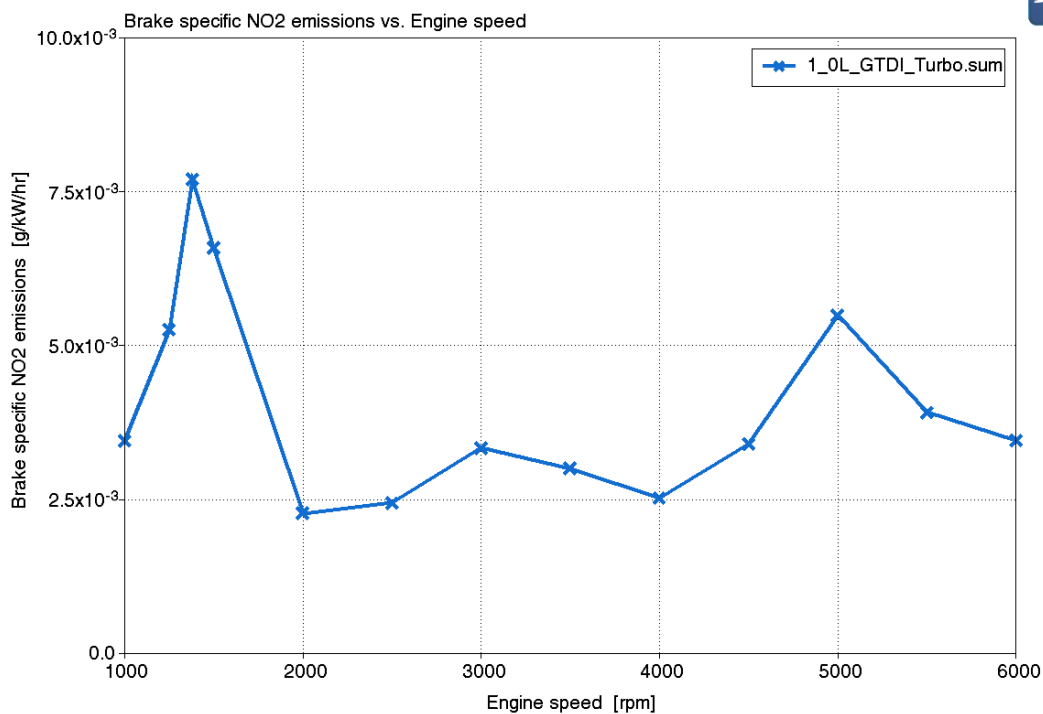
Метанол

Рисунок 20 – Зависимость удельных выбросов по СН в г/кВт ч от частоты вращения при работе на бензине и метаноле.

На рисунке 21 представлена зависимость удельных выбросов по NO₂ в г/кВт ч от частоты вращения при работе на бензине и метаноле.



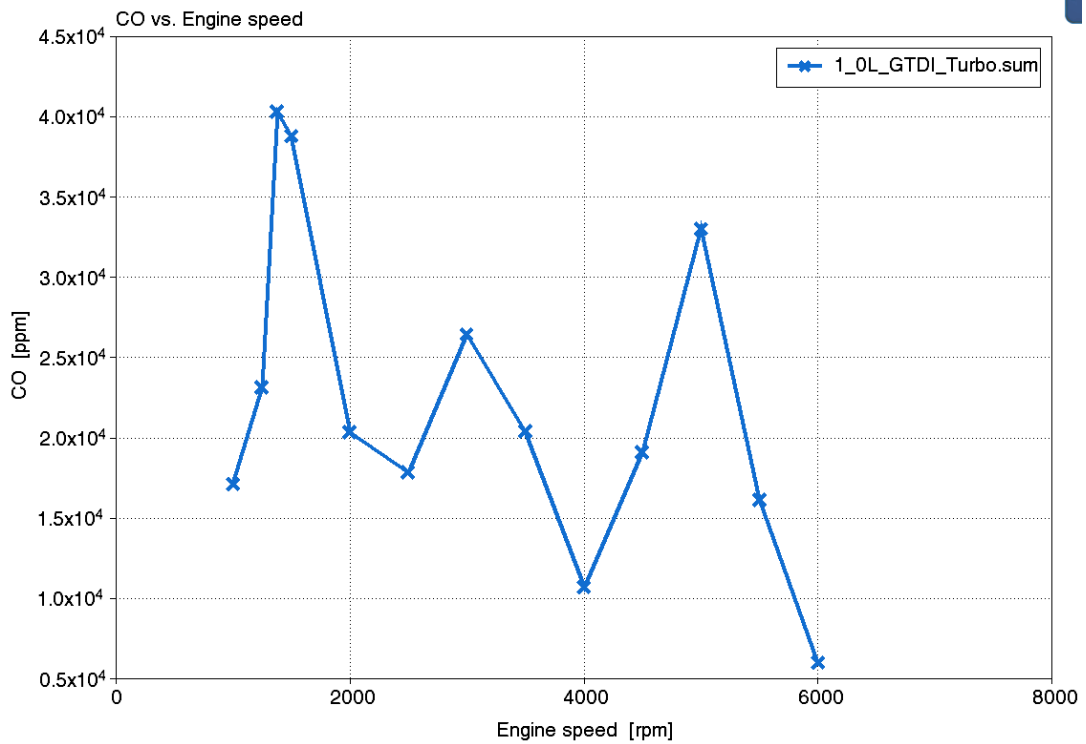
Бензин



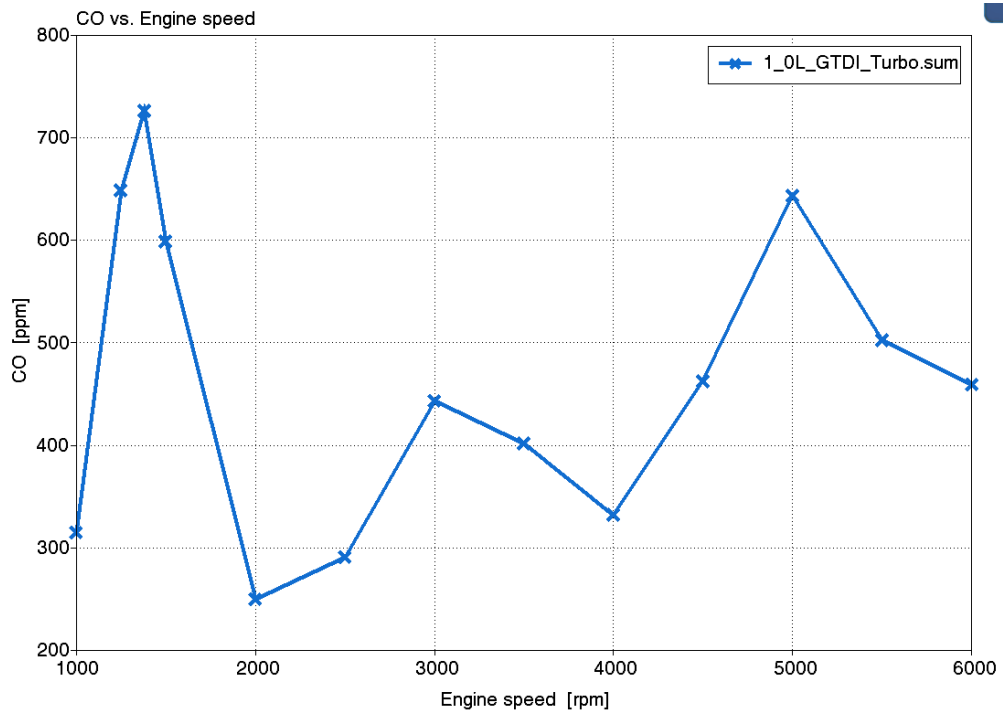
Метанол

Рисунок 21 – Зависимость удельных выбросов по NO₂ в г/кВт ч от частоты вращения при работе на бензине и метаноле.

На рисунке 22 представлена зависимость концентрации CO в мил⁻¹ (ppm) от частоты вращения при работе на бензине и метаноле.



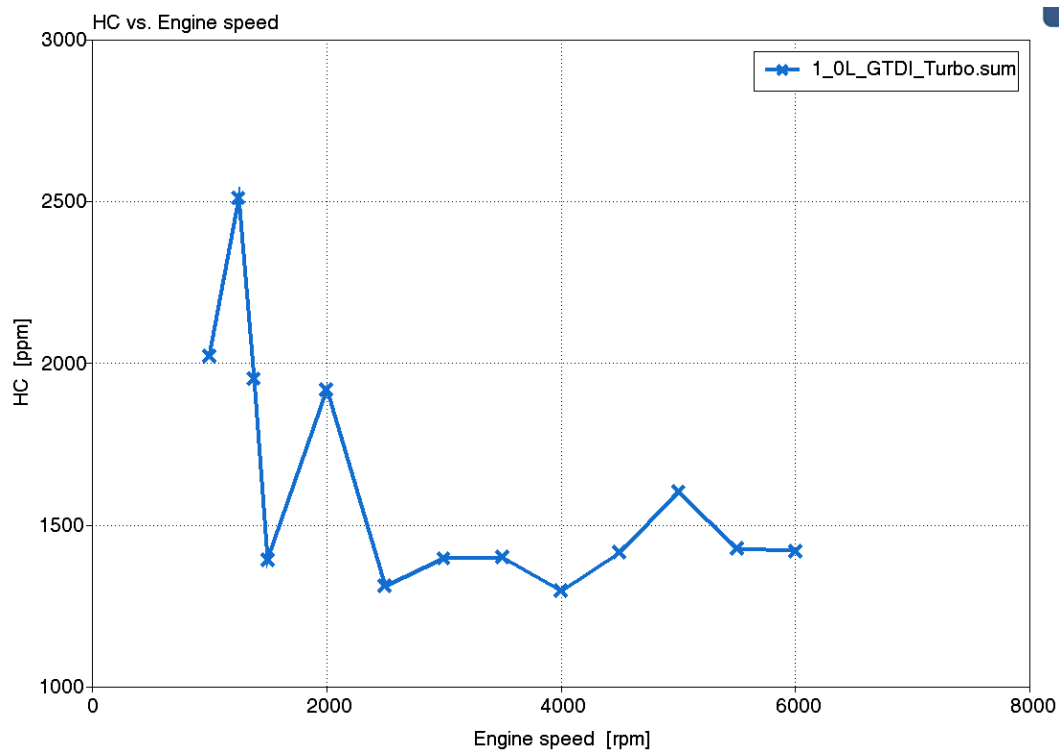
Бензин



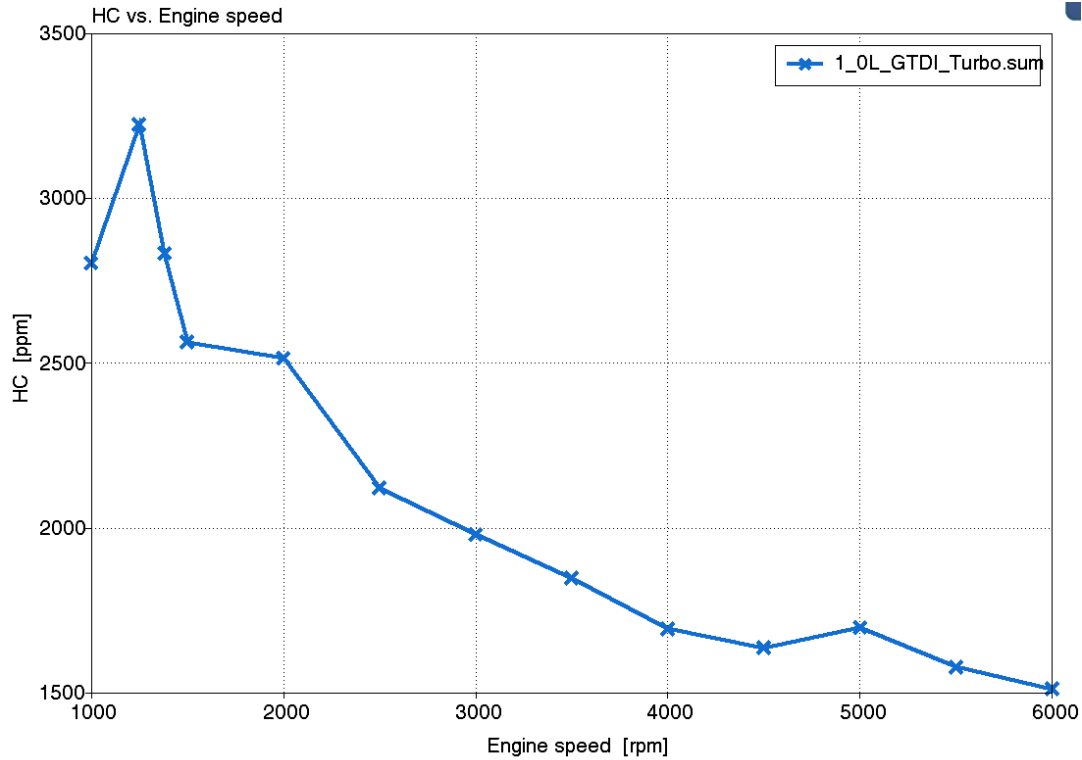
Метанол

Рисунок 22 – Зависимость концентрации CO в мил⁻¹ (ppm) от частоты вращения при работе на бензине и метаноле.

На рисунке 23 представлена зависимость концентрации СН в мил⁻¹ (ppm) от частоты вращения при работе на бензине и метаноле.



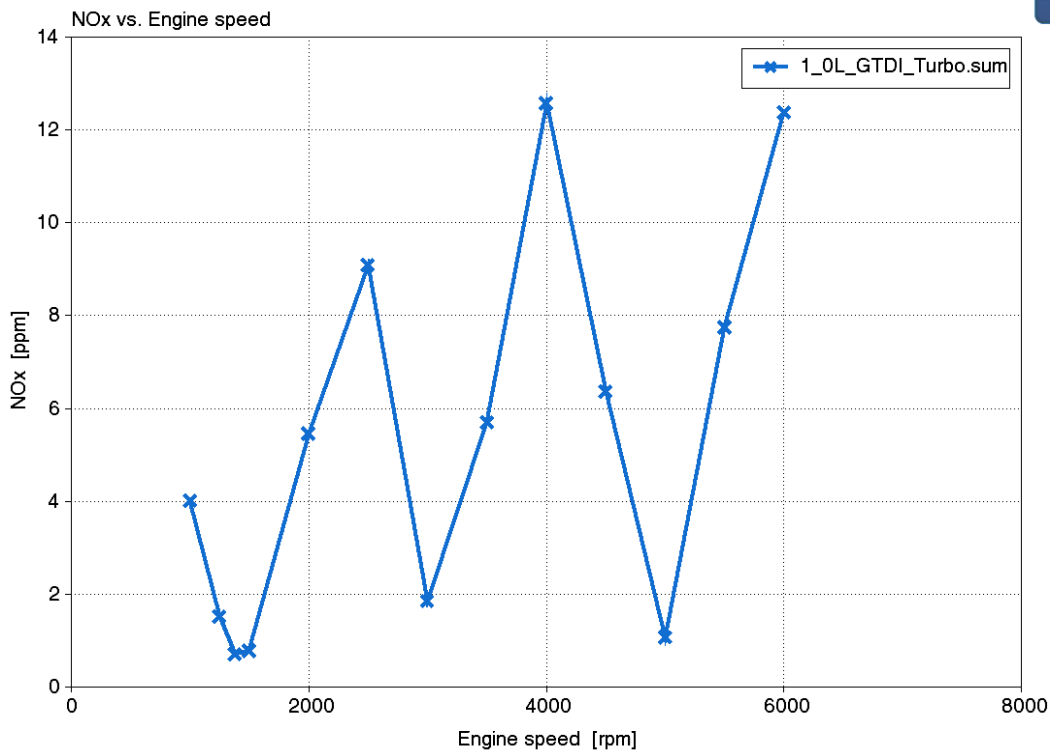
Бензин



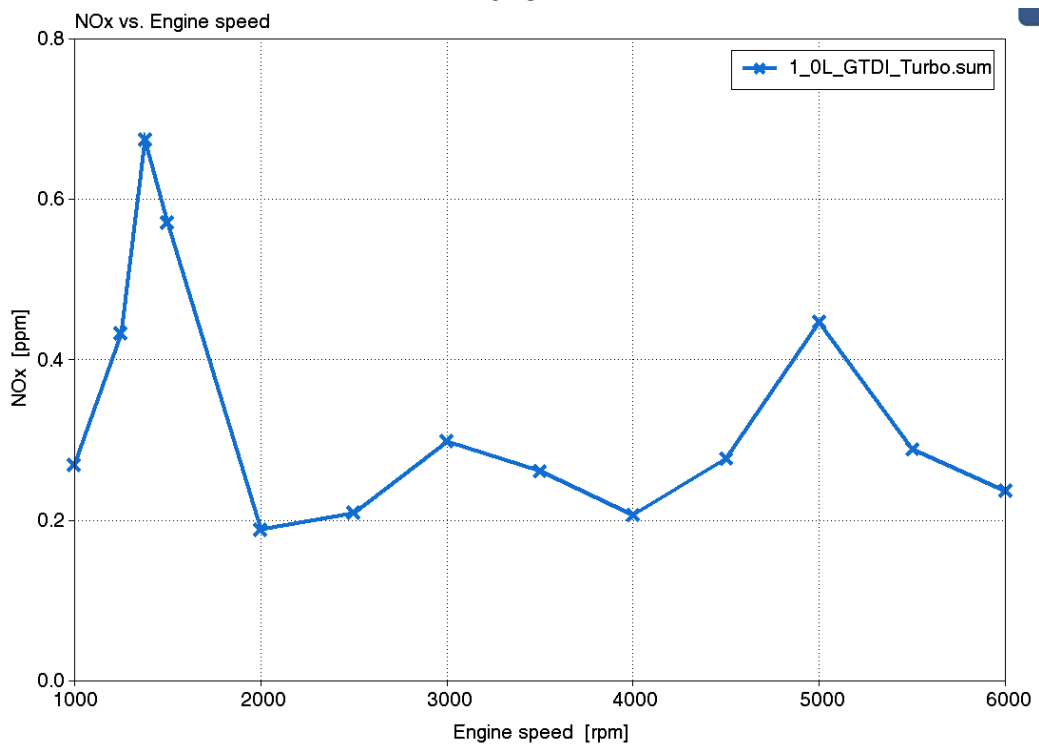
Метанол

Рисунок 23 – Зависимость концентрации СН в мил⁻¹ (ppm) от частоты вращения при работе на бензине и метаноле.

На рисунке 24 представлена зависимость концентрации NO в мил⁻¹ (ppm) от частоты вращения при работе на бензине и метаноле.



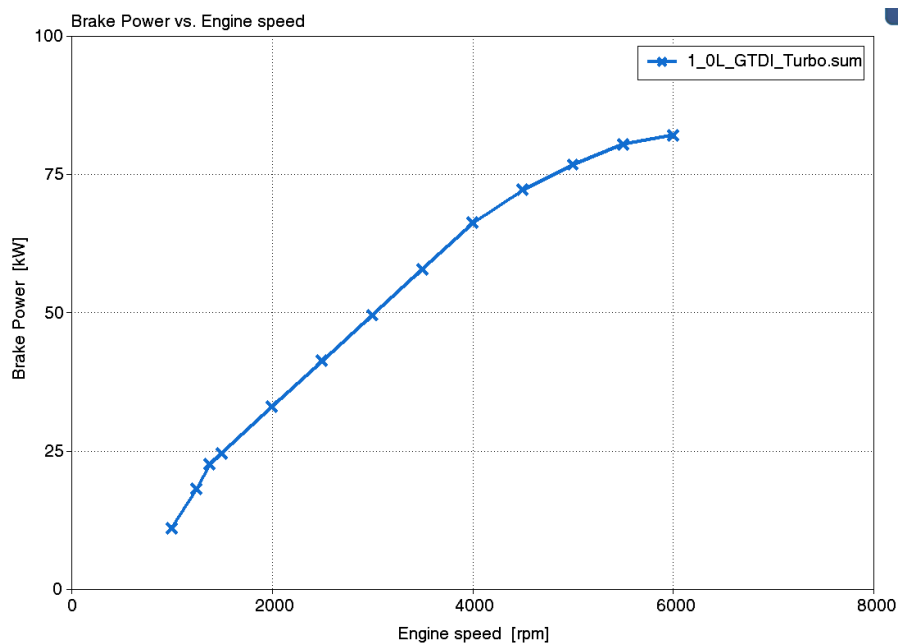
Бензин



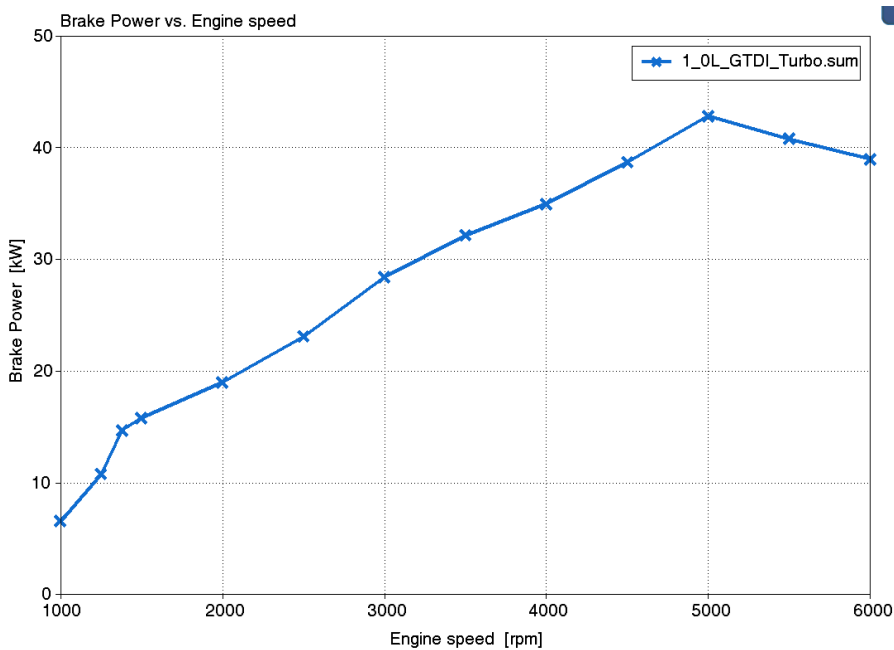
Метанол

Рисунок 24 – Зависимость концентрации NO в мил⁻¹ (ppm) от частоты вращения при работе на бензине и метаноле.

На рисунке 25 представлена эффективная мощность в кВт при работе на бензине и метаноле.



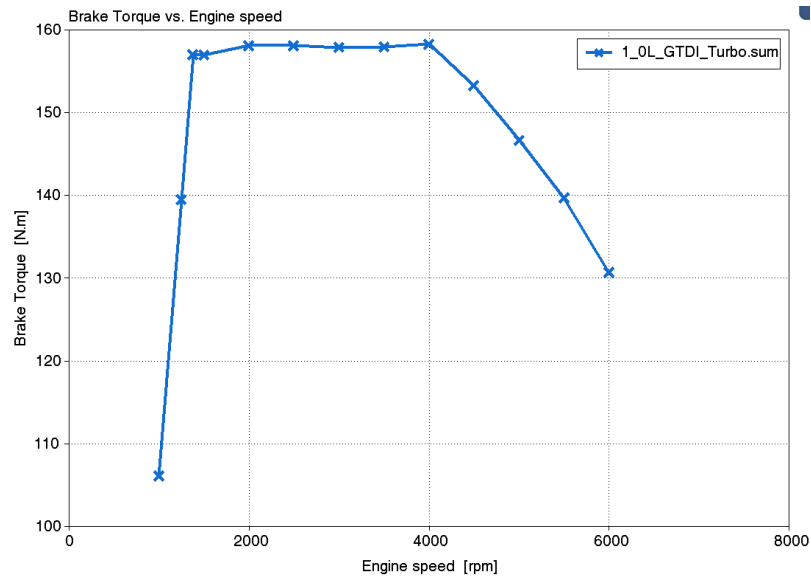
Бензин



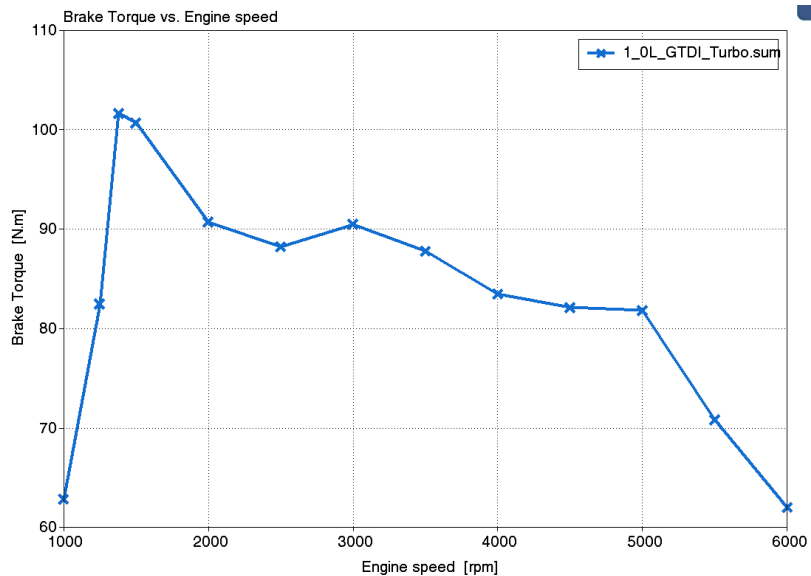
Метанол

Рисунок 25 – Средняя эффективная мощность в кВт при работе на бензине и метаноле.

На рисунке 26 представлен средний эффективный крутящий момент двигателя в (Н м) при работе на бензине и метаноле.



Бензин



Метанол

Рисунок 25 – Средний эффективный крутящий момент двигателя в (Н м) при работе на бензине и метаноле.

Выводы по 4-му разделу

В ходе стационарного моделирования концепция была оптимизирована для достижения наилучших характеристик и эффективности с учетом реальных ограничений, таких как температура и давление в камере сгорания, и т. д. В результате была получена полная скоростная характеристика двигателя. Представленные результаты наглядно показывают, что альтернативное топливо метанол снижают мощностные показатели на 10-15%. При этом токсичность отработавших газов улучшается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе проведен анализ рабочего процесса в трехцилиндровом двигателе при работе на бензине и метаноле. Получены основные выводы по работе:

1. Метанол — это вариант топлива будущего, так как он достаточно дешево получается через конверсию метана, с выходной ценой почти в 2 раза ниже, чем бензин, при этом нет необходимости в создании второй топливной системы и размещать газ на борту автомобиля.
2. Представленные результаты наглядно показывают, что применение альтернативного топлива – метанол для двигателя с искровым зажиганием позволяет снизить токсичность двигателя, как по продуктам неполного сгорания, так и по оксидам азота, но при этом снижаются эффективные показатели работы двигателя.

Выводы по первому разделу

- По вопросам применения альтернативных видов топлива, следует отметить, что наиболее перспективными считаются спирты для двигателей с искровым зажиганием. Для газов имеются существенные ограничения по применению вследствие значительного увеличения массы хранения топлива и стоимости системы топливоподачи. Но можно отметить, как перспективные это сжатый природный газ и водород.
- При использовании альтернативных топлив необходимо учитывать необходимость адаптации рабочего процесса на изменение свойств горения нового топлива.

Выводы по 2-му разделу

- Проведенные расчеты показали некоторое улучшение эффективных показателей работы двигателя при переходе с бензина на альтернативное топливо – метанол.

Выводы по 3-му разделу

- Переход на альтернативное топливо (метанол) позволяет снизить нагрузки на кривошипно-шатунный механизм.

Выводы по 4-му разделу

- В ходе стационарного моделирования концепция была оптимизирована для достижения наилучших характеристик и эффективности с учетом реальных ограничений, таких как температура и давление в камере сгорания, и т. д. В результате была получена полная скоростная характеристика двигателя. Представленные результаты наглядно показывают, что альтернативное топливо метанол снижают мощностные показатели на 10-15%. При этом токсичность отработавших газов улучшается.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Adnan N Ahmed, Zuhair H Obeid and Alauldinn H Jasim Experimental investigation for optimum compression ratio of single cylinder spark ignition engine / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 454 (2018) 012003
2. Antriebskonzepte für heute und morgen. Motorentechnische Zeitschrift MTZ, 09:630–631, 2013.
3. Helmut Eichlseder and Andreas Wimmer. Potential of IC-engines as minimum emission propulsion system. Atmospheric Environment, 37:5227–5236, 2003.
4. Lutz Eckstein, Rene Gobbels, and Roland Wohlecker. Benchmarking of the Electric Vehicle Mitsubishi i-MiEV. ATZ worldwide, 12:48–53, 2011.
5. R.A.B. Semin. A Technical Review of Compressed Natural Gas as an Alternative Fuel for Internal Combustion Engines. Am. J. Engg. & Applied Sci, 1:302–311, 2008.
6. Wolfgang Warnecke, John Karanikas, Bruce Levell, Carl Mesters, Jörg Adolf, Jens Schreckenber Max Kofod, and Karsten Wildbrand. Natural Gas - A bridging technology for future mobility? In 34. Internationales Wiener Motorensymposium, 25 - 26, April, 2013.
7. David Serrano and Bertrand Lecointe. Exploring the Potential of Dual Fuel Diesel-CNG Combustion for Passenger Car Engine. In Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress, Beijing, China, 27-30 November 2012.
8. Tobias Ott, Florian Zurbriggen, Christopher Onder, and Lino Guzzella. Cycle-averaged efficiency of hybrid electric vehicles. Institution of Mechanical Engineering Part D, Journal of Automobile Engineering, 227:78–86, 2012.
9. Tobias Ott, Christopher Onder, and Lino Guzzella. Hybrid-Electric Vehicle with Natural Gas-Diesel Engine. Energies, 6:3571–3592, 2013.

10. Norman Brinkman, Michael Wang, Trudy Weber, and Thomas Darlington. Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions, 2005.
11. T. Ishiyama, J. Kang, Y. Ozawa, and T. Sako. Improvement of Performance and Reduction of Exhaust Emissions by Pilot-Fuel-Injection Control in a Lean-Burning Natural-Gas Dual-Fuel Engine. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 5:243–253, 2012.
12. Thorsten Schmidt, Christian Weiskirch, Stefan Lieske, and Holger Manz. Modern industrial engines emission calibration and engine management. ATZ off highway, 9:24–35, 2010.
13. Bernhard Schneeweiss and Philipp Teiner. Hardware-in-the-Loop-Simulation am Motorenprüfstand für realitätsnahe Emissions- und Verbrauchsanalysen. Automobiltechnische Zeitschrift ATZ, 5:76–79, 2010.
14. Gerhard Henning, Tobias Goëdecke, and Angsar Damm. Neue Getriebe für die neuen Kompakten. ATZ, 9:70–73, 2012.
15. Chasse and A. Sciarretta. Supervisory control of hybrid powertrains: An experimental benchmark of offline optimization and online energy management. Control Engineering Practice, 19:1253–1265, 2011.
16. Heffel, J. W. (2003). "NOx emission and performance data for a hydrogen fueled internal combustion engine at 1500 rpm using exhaust gas recirculation." International Journal of Hydrogen Energy, 28(8), pp. 901-908.
17. Lipman, T., and Hwang, R. (2003). "Hybrid electric and fuel cell vehicle technological innovation: hybrid and zero-emission vehicle technology links." Proceedings of the 2003 20th International Electric Vehicle Symposium and Exposition, Long Beach, CA.
18. Burke, A. (2005). "Hybrid vehicles: design approaches, component options, and potential fuel economy improvements." Institute of Transportation Studies, University of California at Davis.

19. Atwood, P., Gurski, S., Nelson, D. (2001). "Degree of hybridization modeling of a fuel cell hybrid electric sport utility vehicle." SAE Paper 2001-01-0236.
20. Miller, J. (2006). "Hybrid Electric Vehicle Propulsion System Architectures of the e-CVT Type." IEEE Transactions on Power Electronics, 21(3), pp. 756-767.
21. Service, R. F. (2004). "The hydrogen backlash." Science, 305(5686), Aug 13, pp. 958-961.
22. Romm, J. J. (2004). The Hype About Hydrogen: Fact and Fiction in the Race to Save the Climate, Island Press, Washington, D.C.
23. Zhang, Y., Lin, H., Zhang, B., and Mi, C. (2006). "Performance Modeling and Optimization of a Novel Multi-mode Hybrid Powertrain." Journal of Mechanical Design, 128, pp. 79-89.
24. Adamchak F., Adede A., 2013. LNG as a marine fuel, 17th International conference and exhibition on Liquefied Natural Gas (LNG 17), Houston
25. Adom F., Dunn J.B., Elgowainy A., Han J., Wang M., Chang R., Perez H., Sellers J., Billings R., 2013. Life Cycle Analysis of Conventional and Alternative Marine Fuels in GREET.
26. Agostini A., Giuntoli J., Boulamanti A., 2013. Carbon accounting of forest bioenergy - Conclusions and recommendations from a critical literature review. JRC Technical reports, EUR 25354 EN, ISBN 978-92-79-25100-9.
27. Anselmo A., Sullivan J., 2015. DME: The Best Fuel, Period. Dimethyl Ether: The Future of Electricity, Heat and Transportation. ChemBioPower Ltd. Available at: www.chembiopower.com/s/CBP-WhitePaper-v5.pdf
28. Bell Performance, 2013. Fuel Storage and Diesel Generator Problems: Fuel Microbes, Available at: <http://www.bellperformance.com/bell-performs-blog/diesel-generator-problems-fuel-microbes>
29. Bengtsson S., Andersson K., Fridell E., 2011. A comparative life cycle assessment of marine fuels; liquefied natural gas and three other fossil fuels.

- Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. 225, pp. 97–110
30. Corvus, 2015. Corvus Energy Announces Investment from Statoil Technology Invest.
 31. Cowie A., Berndes G., Smith T., 2013. On the timing of greenhouse gas mitigation benefits of forest-based bioenergy, IEA Bioenergy; ExCo 2013:04
 32. Deniz C., Kilic A., Civkaroglu G., 2010. Estimation of shipping emissions in Candarli Gulf, Turkey. Environmental Monitoring and Assessment. Vol.171, pp.219–228.
 33. DNV GL, 2014. Alternative fuels for shipping. DNV GL Strategic Research & Innovation Position Paper 1-2014.
 34. Florentinus A., Hamelinck C., van den Bos A., Winkel R., Cuijpers M., 2012. Potential of biofuels for shipping - Final Report. Prepared by Ecofys for European Maritime Safety Agency (EMSA).
 35. Landalv I., Gebart R., Marke B., Granberg F., Furusjo E., Lownertz P., Öhrman O.G.W., Sørensen E. L., Salomonsson P., 2014. Two years experience of the BioDME project – a complete wood to wheel concept. Environmental Progress and Sustainable Energy. Vol.33, pp. 744–750.
 36. Lin C.Y., 2013. Effects of biodiesel blend on marine fuel characteristics for marine vessels. Energies. Vol.6, pp.4945–4955
 37. O’Dowd C., 2012. Aerosol in Global Atmosphere. In Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Robert A. Meyers (Ed). pp 111-148. Springer New York
 38. Petzold A., Lauer P., Fritsche U., Hasselbach J., Lichtenstern M., Schlager H., Fleischer F., 2011. Operation of marine diesel engines on biogenic fuels: modification of emissions and resulting climate effects. Environmental Science and Technology. Vol. 45, pp.10394– 10400.
 39. Sherrard A., 2015. Poly-gen flash pyrolysis praised for rapid roll-out. Bioenergy International 78(2). Pp 18-19

40. Thomson H., Corbett J. J., Winebrake J.J., 2015. Natural gas as a marine fuel. *Energy Policy* 87 pp 153–167
41. K. Ahn, A.G. Stefanopoulou and M. Jankovic, “Estimation of Ethanol Content in Flex-Fuel Vehicles Using an Exhaust Gas Oxygen Sensor: Model, Tuning and Sensitivity,” In proceedings of ASME 2008 Dynamic Systems and Control Conference, October, 2008, Ann Arbor, MI, USA.
42. Jiang, S., and Nutter, D., “Implementation of Model-Based Calibration for a Gasoline Engine”, SAE 2012-01-0722, 2012
43. Guerrier, M. and Cawsey, P., “The Development of Model Based Methodologies for Gasoline IC Engine Calibration,” SAE Technical Paper 2004-01-1466, 2004
44. Vibe, I.I., "Semi-empirical expression for combustion rate in engines", Proceedings of Conference on piston engines, USSR Academy of sciences, Moscow, pp. 186-191, 1956.
45. Wiebe I.I., "Brennverlauf und Kreisprozeb von Ver-brennungsmotoren". In VEB- Verlag Technik, Berlin, 1970.
46. Lindström, F., Ångström, H., Kalghatgi, G., and Möller, C., "An Empirical SI Combustion Model Using Laminar Burning Velocity Correlations," SAE Technical Paper, 2005-01-2106, 2005
47. Longwic, R., "Modelling the Combustion Process in the Diesel Engine with the Use of Neural Networks," SAE Technical Paper 2008-01-2446, 2008, doi:10.4271/2008- 01-2446.
48. Maass, B., Deng, J., and Stobart, R., "In-Cylinder Pressure Modelling with Artificial Neural Networks," SAE Technical Paper 2011-01-1417, 2011, doi:10.4271/2011-01-1417.
49. Cavina N. and Suglia R., “Spark Advance Control based on a Grey Box Model of the Combustion Process”, SAE 2005-01-3760, 2005
50. Heywood J. B., “Internal Combustion Engines Fundamentals”, McGraw and Hill, 1988

51. Boiarciuc A. and Floch A., "Evaluation of a 0D Phenomenological SI Combustion Model", SAE 2011-01-1894, 2011
52. Prucka R., "An Experimental Characterization of a High Degree of Freedom Spark- Ignition Engine to Achieve Optimized Ignition Timing Control", Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, 2008
53. Schmid, A., Grill, M., Berner, H., Bargende, M. et al., "Development of a Quasi- Dimensional Combustion Model for Stratified SI-Engines," SAE Int. J. Engines 2(2):48-57, 2010
54. Rakopoulos, C., Michos, C., and Giakoumis, E., "Thermodynamic Analysis of SI Engine Operation on Variable Composition Biogas-Hydrogen Blends Using a Quasi- Dimensional, Multi-Zone Combustion Model," SAE Int. J. Engines 2(1):880-910, 2009
55. Tan, Z. and Reitz, R., "Modeling Ignition and Combustion in Spark-ignition Engines Using a Level Set Method," SAE Technical Paper 2003-01-0722, 2003.
56. Конструирование двигателей внутреннего сгорания : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности "Двигатели внутреннего сгорания" направления подготовки "Энергомашиностроение" / Н. Д. Чайнов, Н. А. Иващенко, А. Н. Краснокутский, Л. Л. Мягков ; под ред. Н. Д. Чайнова. - 3-е изд. - Москва : Машиностроение, 2023. - 495 с.
57. Автомобиль. Устройство. Автомобильные двигатели : учебное пособие / А. В. Костенко, А. В. Петров, Е. А. Степанова [и др.]. - Изд. 3-е, стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2023. - 436 с.
58. Петров, А. И. Техническая термодинамика и теплопередача : учебник / А. И. Петров. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2023. - 428 с.
59. Баширов, Р. М. Автотракторные двигатели : конструкция, основы теории и расчета : учебник / Р. М. Баширов. - Изд. 4-е, стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2022. - 336 с.

60. Вальехо М. П. Расчет кинематики и динамики рядных поршневых двигателей : учебное пособие / М. П. Вальехо, Н. Д. Чайнов. - Москва : ИНФРА-М, 2022. - 259 с.
61. Суркин, В. И. Основы теории и расчёта автотракторных двигателей : курс лекций : учеб. пособие / В. И. Суркин. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - Санкт-Петербург : Лань, 2022. - 304 с.
62. Крюков, К. С. Теория и конструкция силовых установок : учеб. пособие / К. С. Крюков. - Москва : ИНФРА-М, 2021. - 211 с.
63. Курасов, В. С. Теория двигателей внутреннего сгорания : учеб. пособие / В. С. Курасов, В. В. Драгуленко. - Москва : ИНФРА-М, 2021. - 86 с.
64. Гоц А. Н. Динамика двигателей : курсовое проектирование : учеб. пособие / А. Н. Гоц. - 3-е изд., испр. и доп. - Москва : ИНФРА-М, 2020. - 175 с.
65. Вибе, И.И. Уточненный тепловой расчет двигателя [Текст] / И.И. Вибе// М. Машиностроение, 1971. - с.282