

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 Применение спиртовых топлив для повышения экономических и экологических характеристик поршневых двигателей

Студент

М.С. Мосейченко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент Д.А. Павлов

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

Тольятти 2023

## АННОТАЦИЯ

К заводам, выпускающим автомобили и к их продукции, применяются требования по уровню вредных выбросов. Поэтому важной характеристикой современных двигателей внутреннего сгорания является токсичность отработавших газов.

Таким образом, анализ возможностей использования дизельного топлива с добавкой этанола - актуальная задача для бакалаврской работы. Целью этой работы является оценка влияния добавки этанола в дизельное топливо в поршневых двигателях внутреннего сгорания. Поэтому в работе представлены результаты проектирования дизельного двигателя с системой подачи этанола в двигатель наряду с основным топливом. Эта система помогает улучшить его экономические и экологические показатели. Добавление этанола в дизельное топливо может привести к уменьшению выбросов вредных веществ в атмосферу, что положительно сказывается на экологии.

Бакалаврская работа включает в себя пояснительную записку и графическую часть. Пояснительная записка состоит из аннотации, введения, 4 разделов, заключения с основными результатами и выводами, а также содержит 22 рисунка и список использованных источников. Объем основного текста работы 58 страниц. Графическая часть состоит из 6 листов, включающих 6 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.....	7
1 Этанол как добавка к дизельному топливу, его свойства и перспективы.....	10
2 Тепловой расчет проектируемого двигателя .....	23
3 Кинематический и динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя .....	32
3.1 Кинематический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя.....	32
3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя	34
4 Анализ влияния вида топлива (дизель, дизель с добавкой этилового спирта) на рабочий процесс ДВС .....	47
4.1 Влияния вида топлива (дизель, дизель с добавкой этилового спирта) на максимальную температуру и давление цикла .....	47
4.2 Влияния вида топлива (дизель, дизель с добавкой этилового спирта) на эффективные показатели цикла .....	50
Заключение .....	53
Список используемых источников .....	54

## ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития энергетического сектора характеризуется недостатком нефти, колебаниями мировых цен на нефтепродукты и увеличивающимся спросом на альтернативные источники топлива для автомобильного транспорта. Это связано с быстрым ростом мирового автопарка и необходимостью обеспечения его непрерывной подачей топлива. Альтернативные источники топлива стали приоритетом в энергетической политике многих стран. Среди них - биотопливо, водород, электромобили и другие. Преимущества альтернативных источников топлива включают экологическую чистоту, уменьшение зависимости от нефти и снижение затрат на топливо. Однако необходимо учитывать, что производство и использование альтернативных источников топлива также имеют свои недостатки и ограничения. В целом, развитие альтернативных источников топлива - это важный шаг в направлении устойчивого развития и снижения негативного воздействия на окружающую среду. Но это требует совместных усилий со стороны правительств, бизнеса и общества в целом.

Двигатели должны выполнять определенную норму по выбрасыванию токсичных веществ в окружающую среду, однако в результате мы получаем двигатели, не выдающие той мощности, на которую они способны.

С точки зрения улучшения экологии есть несколько вариантов решения проблемы: электродвигатели, либо альтернативные варианты топлива для имеющихся двигателей внутреннего сгорания.

Вопреки распространенному мнению об экологичности электромобилей они не являются таковыми, поскольку производство литий-ионных аккумуляторов довольно токсично, не говоря об их утилизации. Также стоит упомянуть небольшой запас хода и большую массу электромобилей в сравнении с автомобилями с ДВС.

Существует альтернатива бензину в виде водородного топлива, на которое можно с небольшими переделками перевести большинство ДВС.

Однако, синтез чистого водорода в настоящее время крайне дорог, в результате чего такой вид топлива не может претендовать на широкое распространение.

Самым дешевым вариантом снижения вредных выбросов является модификация топлива, применяемого на автомобилях с привычными нам ДВС. Реальную замену традиционным дизельным топливам из нефтяного сырья могут дать алифатические спирты.

«Из большого числа алифатических спиртов в качестве моторных топлив нашли применение только метанол и этанол. Это обстоятельство обусловлено значительными объемами их производства - десятки миллионов тонн, высокими детонационными свойствами, возможностью экономии нефтяных ресурсов при условии производства этих спиртов из альтернативных источников сырья» [18].

«Привлекательность спиртовых топлив заключается в возможности их получения из различных источников углеводородного сырья, будь то природный газ, уголь, сланцы, а также органические ресурсы, такие как картофель, кукуруза, другие сельскохозяйственные культуры, растительные отходы, водоросли и прочие. Одним из преимуществ спиртовых топлив является также наличие атомов кислорода в их молекулах, что существенно улучшает экологические показатели выбросов отработавших газов внутреннего сгорания» [5].

«Среди спиртовых вариантов наиболее привлекательным для использования в двигателях внутреннего сгорания является этанол. Это обусловлено его благоприятными экологическими характеристиками и возможностью получения из разнообразного сырья. Для производства этанола (биоэтанола) используют сахарную свеклу, тростник, кукурузу, пшеницу, картофель, топинамбур и другие сельскохозяйственные культуры. На сегодняшний день основной объем биоэтанола производится в Северной и Южной Америке, при этом США и Бразилия являются лидерами, причем большая часть производства этанола приходится на США» [21]. Бразилия, в

свою очередь, предпочитает использовать сахарный тростник, а в США - кукурузу. Производство из тростника оказывается экономически более выгодным, чем из кукурузы. Однако, несмотря на привлекательность этанола, следует также учесть его недостатки. Основным из них является низкая воспламеняемость. «Еще одной негативной стороной является высокая испаряемость, что требует предусмотреть системы для обеспечения удаления паровых пробок в системе питания. Высокая скрытая теплота испарения также вызывает местное понижение температуры смеси в цилиндре на 150-200 К. Меньшая вязкость приводит к изменению формы распыла факела, увеличению протекания через форсунки и плунжерные пары, а также ухудшает условия смазки плунжерных пар, что может вызывать прихваты и задиры. Более низкая теплота сгорания требует увеличения объема цикловой подачи в 2,3-2,8 раза, что требует изменения настроек топливной системы. Кроме того, этанол обладает повышенной коррозионной активностью, поэтому требуется использование устойчивых материалов. При использовании этанола в дизельных двигателях, благодаря большему содержанию кислорода и более стабильным характеристикам спиртового топлива, дымность и токсичность отработавших газов существенно снижаются. Однако процесс сгорания, экономичность и мощностные показатели в значительной степени зависят от способа подачи спиртового топлива, и в литературе не существует однозначной оценки его влияния на рабочий процесс. Особые трудности возникают с пусковыми характеристиками, работой на низких нагрузках и частотах вращения, а также и при работе на неустановившихся и переходных режимах» [4].

Таким образом, использование этанола и других спиртовых топлив в качестве альтернативы нефтепродуктам имеет свои преимущества и ограничения, и требует учета технических и эксплуатационных особенностей, а также дальнейших исследований и разработок для оптимизации и эффективного использования в различных типах двигателей.

## **1 Этанол как добавка к дизельному топливу, его свойства и перспективы**

В условиях роста населения и использования двигателей внутреннего сгорания, потребление природных ресурсов превышает их возобновление, что приводит к уменьшению запасов ископаемых топлив и увеличению цен на нефть и нефтепродукты. Из-за этого исследования альтернативных видов топлива для двигателей внутреннего сгорания имеют большую важность. Среди перспективных альтернативных видов топлива находятся водород, природный газ, растительные масла и сложные эфиры, биотопливо, получаемое из отходов, метанол, этанол, изопропанол и другие. Применение растительных масел, сложных эфиров и спиртов имеет экономические преимущества, особенно для стран, которые имеют развитое сельское хозяйство и ограниченные природные ресурсы. Но применение смесей спиртов с дизельным топливом может иметь трудности и недостатки, такие как низкая растворимость, расслоение смеси, необходимость в гомогенизаторах и эмульгаторах, сниженная теплотворная способность, цетановое число и кинематическая вязкость.

«В настоящее время двигатель внутреннего сгорания остается основным типом привода для большинства мобильных и стационарных установок. Но все более увеличивающийся парк ДВС требует и возрастания добычи и производства топлива. Переход к дизельным двигателям, являющимся более экономичными, позволяет лишь частично решить топливную проблему. Использование альтернативных топлив ставит перед нами задачу предсказания физико-химических свойств новых топлив или стандартного нефтяного топлива при применении присадок и добавок» [20].

Выбросы выхлопных газов оказывают различное физиологическое воздействие и воздействие на окружающую среду, что является существенным стимулом для принятия более строгого законодательства по



контролю за этими выбросами. Выбросы НС могут вызывать различные негативные последствия для окружающей среды.

«Состав отработавших газов зависит от сорта топлива, присадок к нему, режима работы двигателя, его технического состояния, условий движения автомобиля и др. Больше всего ядовитых веществ автомобиль выбрасывает в окружающую среду при трогании с места и торможении. В составе отработавших газов автомобилей наибольший удельный вес по объему имеет окись углерода (до 10 %), окислы азота (до 0,8 %), несгоревшие углеводороды (до 3 %), альдегиды (до 0,2 %) и сажа. Так, при сжигании 1000 л топлива бензиновые двигатели выбрасывают в окружающую среду с отработавшими и картерными газами 200 кг окиси углерода, 25 кг углеводородов, 20 кг окислов азота, 1 кг сажи и 1 кг сернистых соединений. Если токсичность окиси углерода принять за единицу, то токсичность окислов азота равна 10, а углеводородов – 0,65» [17].

«Одним из способов уменьшения вредного воздействия автотранспорта на окружающую среду, наряду с поиском оптимальных конструкторских решений, является применение экологически чистых топлив и масел. В настоящее время ежегодное потребление автомобильных бензинов в нашей стране превысило 40 млн. т, дизельных топлив – 78 млн. т, и рост производства и потребления автомобильных топлив в обозримом будущем будет продолжаться, поэтому улучшение их свойств является приоритетной задачей. Для совершенствования экологических свойств автомобильных топлив в мировой химмотологической практике, наряду с другими методами, используются оксигенаты – высокооктановые синтетические добавки, вырабатываемые из альтернативного сырья. Введение оксигенатов увеличивает полноту сгорания углеводородов топлива и уменьшает токсичность отработавших газов. В частности, оксигенаты позволяют уменьшить стехиометрическое соотношение топлива и воздуха в зоне сгорания, что приводит к уменьшению образования оксида углерода (II) и

суммарных углеводов. Однако применение оксигенатов в избыточных количествах может привести к ухудшению мощностных и экономических характеристик двигателя, а также к несовместимости их с материалами топливной системы автомобиля. Введение оксигенатов более актуально для бензинов, так как повышает их детонационную стойкость. В качестве оксигенатов могут применяться диалкиловые эфиры: метил-трет-бутиловый (МТБЭ), этил-трет-бутиловый (ЭТБЭ), диизопропиловый (ДИИПЭ), – а также моноспирты с температурой кипения, соответствующей фракционному составу бензинов: этанол, изо-пропанол, трет-бутанол. Применение метанола в качестве топлива сопровождается повышенным износом ЦПГ, вызванным попаданием его капель на стенки цилиндра и разрушением смазывающей пленки масла» [13]. «Также применение метанола, который привлекает внимание исследователей своей обширной сырьевой базой, ограничивается его высокой токсичностью, летучестью, гигроскопичностью. Химическая структура метанола ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) содержит кислород, который отделяется от обычного топлива и вызывает износ, разрушение и коррозию компонентов двигателя. Поэтому компоненты двигателя, контактирующие с топливом, необходимо модернизировать. Поскольку текущая цена на топливо растет с каждым днем, ее необходимо снижать, применяя другое топливо без изменения эксплуатационных затрат. Детали двигателя (топливный насос, клапаны двигателя, седла клапанов двигателя, топливо и масляные уплотнения) необходимы для совместимости с метанолом.

Но есть и преимущества использования метанола как добавки к основному топливу. Он увеличивает тепловую эффективность, следовательно, увеличивает использование энергии. Он производит больше углеводов и снижает выбросы оксидов углерода и сажи в выхлопных газах, чем обычное топливо. Таким образом, он имеет такие преимущества, как устойчивость, энергетическая безопасность и качество воздуха [26].

Одним из наиболее распространенных оксигенатов является этанол, в настоящее время все ведущие автомобилестроительные фирмы допускают

применение в своих двигателях бензинов с содержанием этанола до 10%. В то же время добавки оксигенатов к дизельным топливам изучены недостаточно, что связано, прежде всего, с низкими цетановыми числами этих соединений. Изучалось влияние добавок некоторых гидроксильных соединений и диалкиловых эфиров на токсичность отработавших газов дизельных двигателей и выбросы суммарных углеводородов, оксида углерода (II), сажи» [1].

Изопропиловый спирт - это бесцветный изомер пропилового спирта, который легко воспламеняется и находит применение в различных бытовых и коммерческих продуктах, включая спирт для протирания, чистящие средства и дезинфицирующие средства для рук. Он также используется для производства различных органических соединений, таких как сложные эфиры, ацетон, кетен и топлива с высоким октановым числом.

В молекуле изопропилового спирта или изопропанола, изопропильная группа прямо связана с гидроксильной группой. Этот спирт обычно производят путем добавления пропена в концентрированную серную кислоту, а затем разбавлением полученной смеси водой. Изопропиловый спирт менее токсичен, чем этанол, но более токсичен, чем этиленгликоль или метанол.

До середины двадцатого века присадки к дизельному топливу использовались редко. Дизельные двигатели являются универсальными и надежными, и подходящее топливо может быть получено из смеси компонентов, полученных при атмосферной дистилляции нефти. Когда нефтеперерабатывающие предприятия переключались на производство бензина, дизельное топливо иногда дополняли крекинг - бензином, полученным в процессе переработки бензина. Постепенно содержание серы в топливе снижалось, но в зависимости от источника нефти могла потребоваться дополнительная переработка. С увеличением спроса на топливо, изменением структуры спроса и ужесточением технических

требований изменились процессы переработки, а вместе с ними и использование присадок к дизельному топливу.

Биодизельное топливо является одним из перспективных видов биотоплива и широко исследовано. Оно имеет множество преимуществ, таких как высокое содержание кислорода и отсутствие серы. Однако его использование приводит к увеличению выбросов  $\text{NO}_x$  и незначительному увеличению расхода топлива. Одной из альтернатив биотопливу является использование спирта в качестве источника энергии. Спирты (метанол, этанол, бутанол, изопропиловый спирт и т.д.), по-видимому, являются хорошей альтернативой двигателям с искровым зажиганием и многообещающей присадкой для дизельных двигателей. Спирты, такие как метанол и этанол, имеют высокое октановое число, содержание кислорода и более низкое соотношение углерода и водорода по сравнению с ископаемыми топливами. Добавление спирта в биодизель может уменьшить уровень выбросов  $\text{NO}_x$ , который является одним из наиболее значимых недостатков использования биодизеля за счет охлаждающего эффекта спирта, который снижает температуру на торце цилиндра и улучшает тепловую эффективность двигателя.

Было проведено множество исследований по применению биодизельного топлива в дизельных двигателях, которые подтвердили положительное влияние биодизельного топлива на сокращение выбросов загрязняющих веществ дизельными двигателями. Этанол является подходящим топливом для бензиновых двигателей благодаря высокому октановому числу, которым он обладает. Однако, чистый этанол нельзя применять в дизельных двигателях, но его можно использовать в смесях с дизельным топливом.

Существует термин "E-Diesel" или "eDiesel", который используется для обозначения смесей этанола и дизельного топлива. Также иногда такие смеси могут называться "оксигенированным дизельным топливом", но этот термин не совсем точен, так как дизельные смеси, содержащие биодизельное

топливо на основе метилового эфира или любую другую добавку, содержащую кислород, также могут быть отнесены к кислородсодержащему дизельному топливу.

«Этанол – одноатомный спирт с формулой  $C_2H_5OH$  или  $CH_3-CH_2-OH$  (эмпирическая формула  $C_2H_6O$ ), второй представитель гомологического ряда одноатомных спиртов (первый – метанол), при стандартных условиях летучая горючая бесцветная прозрачная жидкость. Существует два основных способа получения этанола: микробиологический (спиртовое брожение) и синтетический (гидратация этилена). Спирт, полученный брожением (поступает из брагоректификационной установки), не является безводным, содержание этанола в нем достигает 95,6 %. Смесь 95,57 % этанола и 4,43 % воды является азеотропной, это значит, что компоненты не разделяются при перегонке» [3].

«Для более полного удаления воды прибегают к нагреванию спирта с водоотнимающими веществами – оксидом кальция (негашеная известь  $CaO$ ) или безводной сернокислой медью (медный купорос  $Cu$ ). Нашел применение метод тройных нераздельно кипящих смесей. К ректификату добавляется бензол  $C_6H_6$ . При перегонке такой смеси сначала отходит пар, содержащий 18,5 % (масс.) этилового спирта, 74 % бензола и 7,5 % воды. С этим паром уходит вся вода, а затем перегоняется абсолютный (безводный) спирт. Абсолютный спирт – это этиловый спирт, практически не содержащий воды. Он кипит при температуре 78,39 °С, в то время как спирт-ректификат, содержащий не менее 4,43 % воды, при 78,15 °С» [19].

«Этанол способствует снижению образования парниковых газов, выбросов котельных и автомобильных выхлопов, токсических веществ и аэрозолей в атмосферу. Это эквивалентно исчезновению 1 миллиона автомобилей с дорог каждый год» [16].

«Биоэтанол производится с использованием различных технологий. Около 7 % этанола вырабатывается химическим синтезом (преимущественно из природного газа), 93 % этанола производится с использованием процесса

брожения биомассы. При этом 60 % спирта получают из сахара и 40 % — из зерна. Современное мировое производство этанола составляет 32 млн т в год, из них 4 млн т приходится на пищевой этанол, 8 млн т — на этанол для химической промышленности и 20 млн т — на топливный этанол. В то же время мировая потенциальная потребность в этом спирте достигает 2 млрд т в год» [3]. Биоэтанол, получаемый из биоразлагаемых материалов, таких как сахарный тростник, патока или корень маниоки, имеет более низкую себестоимость производства и безвреден для окружающей среды. Благодаря высокой концентрации кислорода этанол обладает преимуществом, заключающимся в минимизации выбросов сажи.

Производство топливного этанола, в основном на основе кукурузы, выросло примерно со 175 миллионов галлонов в 1980 году до более чем 1,63 миллиарда галлонов в 2000 году. В настоящее время в Соединенных Штатах насчитывается 62 предприятия по производству этанола, расположенных в двадцати различных штатах, хотя большая часть производства (примерно 90%) встречается на Среднем Западе и северо-центральных штатах Индиана, Иллинойс, Айова, Миннесота и Небраска. Общая мощность по производству этанола в США составляет более двух миллиардов галлонов в год (по состоянию на конец 2000 года), а в 2001 году годовой объем производства, как ожидается, составит около 2 миллиардов галлонов.

Чтобы получить альтернативное топливо на основе спиртов, различия в физических и химических свойствах между спиртами и обычным топливом должны быть сведены к минимуму. Процесс включает в себя три стадии: дегидратацию спирта, олигомеризацию и гидрирование. Одним из преимуществ этих этапов является то, что они были использованы в коммерчески значимых масштабах [7].

Спирты смешиваются во всех пропорциях с водой из-за гидроксильной группы -ОН. О низкой летучести свидетельствуют высокая температура кипения и высокая температура вспышки. Спирты горят без светящегося пламени и почти не выделяют сажи, особенно метанол. Склонность к

образованию сажи увеличивается с молекулярной массой. Поэтому метанол производит меньше сажи, чем этанол [25].

Есть существенные отличия в характеристиках горения углеводородов и спиртов. У спиртов пределы воспламеняемости более расширенные, а также они имеют большую скорость пламени. Также спирты вырабатывают большее количество молей продукта на моль отработанного топлива, благодаря чему появляется гораздо более высокое давление [23].

Спирты возможно смешать во всех пропорциях с водой благодаря гидроксильной группе  $-OH$ . О низкой летучести говорит высокая температура вспышки и высокая температура кипения.

«Сгорание спирта с участием воздуха возможно активизировать интенсивным источником локализованной энергии, например, искрой или пламенем. Также смесь возможно воспламенить, прилагая энергию при помощи тепла и давления, в частности, при такте сжатия поршневого двигателя [28]».

Энергия смеси достигает уровня, достаточного для воспламенения, происходящего после короткого периода задержки, называемого задержкой воспламенения, между внезапным нагревом смеси и началом воспламенения (образованием фронта пламени, который распространяется с высокой скоростью по всей смеси). Высокая скрытая теплота испарения спиртов охлаждает воздух, поступающий в камеру сгорания двигателя, тем самым увеличивая плотность воздуха и массовый расход. Это приводит к повышению объемного КПД и снижению температуры сжатия. Вместе с низким уровнем температуры сгорания эти эффекты также улучшают тепловой КПД на 10% [22].

Спирты практически не выделяют сажу и горят без светящегося пламени. Подверженность к образованию сажи возрастает с увеличением молекулярной массы. Соответственно, этанол производит больше сажи, чем метанол [25].

Цетановое число является наиболее важным фактором для оценки способности этанола к воспламенению. Цетановое значение чистого этанола составляет 8, что делает цетановое значение смеси дизельного топлива и этанола ниже, чем у чистого дизельного топлива. Это в дальнейшем приведет к ухудшению показателей сгорания и снижению выбросов выхлопных газов.

Минимальное цетановое число для дизельного топлива равно 40. Типичное дизельное топливо имеет цетановое число 45-50. Как упоминалось выше, этанол обладает низким цетановым показателем, поэтому увеличение концентрации этанола в дизельном топливе приводит к пропорциональному снижению цетанового числа.

Из вышесказанного следует, что добавление этанола к дизельному топливу приводит к различным физико-химическим изменениям свойств дизельного топлива, особенно к снижению вязкости, теплотворной способности и цетанового числа. Поэтому были разработаны различные методы, чтобы сделать дизельный двигатель совместимым со свойствами топлив на основе этанола.

Энергетическое содержание топлива оказывает непосредственное влияние на выходную мощность двигателя. Заявлено, что общее содержание энергии в смесях этанола и дизельного топлива должно составлять не менее 90-95% от содержания энергии в дизельном топливе, чтобы существующие двигатели могли выдавать достаточную мощность. Энергетическое содержание этанольных дизельных смесей снижается примерно на 2% при каждом добавлении 5% этанола по объему, при условии, что любая добавка, включенная в смесь, имеет такое же энергетическое содержание, как и дизельное топливо [24].

Спирты могут быть добавлены в дизельный двигатель в качестве дополнительного топлива различными способами, такими как смешивание, фумигация, топливная эмульсия на спиртовой основе и двойной впрыск. В режиме смешивания спирт и базовое топливо предварительно смешиваются и впрыскиваются в цилиндр. В то время как в режиме фумигации спирт



впрыскивается во впускной коллектор и смешивается с поступающим воздухом. При способе получения топливной эмульсии на спиртовой основе для смешивания топлив используется эмульгатор (химическая добавка, стабилизирующая эмульсию), чтобы избежать несмешиваемости и разделения. При методе двойного впрыска для работы двигателя необходима отдельная система впрыска топлива. Среди этих методов смешивание и фумигация являются наиболее распространенными и широко используемыми методами добавления спирта [4].

Чтобы топливо могло гореть в дизельном двигателе, оно должно обладать высоким цетановым числом, то есть способностью к самовоспламенению при высоких температурах и давлениях. Бензин, дизельное топливо и спирт сильно отличаются друг от друга по своему цетановому числу и способности к самовоспламенению. Высокое цетановое число обуславливает короткий период задержки воспламенения, в то время как низкое цетановое число - длительный период задержки.

Цетановое число спирта ниже, чем у дизельного топлива, поэтому его использование в дизельных двигателях не рекомендуется. Однако, можно добавить некоторые вещества, такие как нитрогликоль, которые повысят цетановое число спиртов. Это уменьшит склонность к детонации дизеля, сократив период задержки воспламенения. Однако, если период задержки воспламенения слишком короткий, то это может привести к уменьшению скорости выделения тепла, что не является желательным.

«При организации процесса сгорания спиртов в цилиндрах дизеля возникает проблема их воспламенения, поскольку спиртовые топлива имеют низкие цетановые числа. Воспламенение спиртов в условиях КС дизеля возможно с помощью дополнительно установленной свечи зажигания или накаливания. Эффективное воспламенение спиртовых топлив в дизелях достигается при подаче в КС запальной дозы дизельного топлива» [15].

Исследования авторов [21] показывают, что в дизелях использование топлив на основе этанола приводит к повышению экономичности. Но

отрицательной стороной применения данного спирта в качестве топлива является тот факт, что этанол имеет низкую плотность и вязкость. Из-за этого происходит самовоспламенение спирта в КС дизеля. А это может вызвать серьезные проблемы.

Спирты, используемые в качестве альтернативного топлива, вызывают износ металлических компонентов. Износ компонентов двигателя является серьезной проблемой. Были проведены многочисленные исследования, чтобы изучить их чувствительность. Применение спиртов в качестве топлива в двигателе внутреннего сгорания увеличивает износ компонентов двигателя. Это связано с образованием продуктов сгорания, вызывающих коррозию, что приводит к уменьшению толщины масляных пленок. Промежуточный продукт сгорания, такой как муравьиная кислота, способствует износу гильзы цилиндра двигателя и узла поршневых колец.

Спирты, контактирующие с черными металлами, вызывают большую коррозию, чем обычное топливо. Обычно коррозия возникает из-за примесей, таких как муравьиная кислота, уксусная кислота и хлориды. Загрязняющие вещества, такие как хлорид-ион, муравьиная кислота, присутствующая в спиртах, вызывают усиленную коррозию. Этилацетат, уксусная кислота и ион хлорида вместе более подвержены коррозии, чем один из них. Образование муравьиной кислоты и уксусной кислоты в спиртовом топливе является обычным явлением во время горения и усиливает их коррозионную активность. Метанол или этанол, абсорбирующие воду, делают их электропроводными, а любые загрязнения, содержащие ионы, увеличивают их проводимость, что усиливает электрохимическую и гальваническую коррозию.

Этанол и абсорбированная вода увеличивают электропроводность спирта, что приводит к усилению коррозии. Муравьиная кислота – это продукт сгорания спирта, который снижает температуру коррозии ниже точки росы выхлопных газов двигателя. Такие металлы, как магний, алюминий и свинец, более подвержены воздействию спирта, вызывающего

коррозию. Загрязнения в спиртовом топливе усиливают коррозию системы обращения с топливом, а также вызывают коррозию продуктов сгорания. Основным результатом коррозии является гидратированный хлорид железа, который усиливает образование ржавчины.

Для защиты металлических поверхностей применяют анодирование. Это электрохимический процесс, при котором металлические поверхности превращаются в анодный оксид, а он в свою очередь является коррозионностойким и очень прочным. Таким образом, эти покрытия можно использовать для двигателей, работающих на спирте.

«Переход с углеводородных топлив на спиртовые требует регулировки системы топливоподачи, в частности, соотношения воздух–топливо. Это значения для спиртовых топлив значительно ниже из-за наличия кислорода в последних, изменения степени сжатия и других параметров двигателя.

Но эти недостатки можно устранить, применяя специальные меры:

Устранение возможности контакта с водой и водяными парами или проведение осушки спиртов перед заправкой в автомобиль; оба варианта чрезвычайно трудно реализуемы в больших масштабах; можно использовать стабилизирующие добавки или соразтворители, гомогенизирующие систему дизель–вода–спирт; также рекомендуется вводить спирт в дизель непосредственно перед заправкой автомобиля; в качестве стабилизаторов дизельно-спиртовых смесей предлагается использовать алифатические спирты  $C_3$ – $C_{12}$  нормального и разветвлённого строения, фенолы, алкилацетаты, простые и сложные эфиры и их металлоорганические производные, кетоны, амины, ПАВ, а также гликоли и их эфиры, альдегиды, кетали, ацетали, алкилкарбонаты, карбоновые кислоты и смеси указанных соединений; добавка стабилизаторов препятствует расслоению спиртосодержащего топлива до температуры минус  $40^{\circ}\text{C}$ ; хорошим и при этом дешёвым стабилизатором являются сивушные масла, обеспечивающие гомогенность топлива при температуре выше минус  $25^{\circ}\text{C}$ » [27];

«Использование металлов или различных покрытий, не подвергающихся коррозии при контакте со спиртовыми топливами, или введение в спиртовые топлива специальных антикоррозионных присадок (ингибиторов коррозии); и тот и другой методы борьбы с коррозионной агрессивностью спиртовых топлив ухудшают экономические показатели их применения;

Замена резинотехнических и пластмассовых изделий, подвергающихся воздействию спиртов, на материалы, стойкие к такому воздействию;

Разработка каталитических нейтрализаторов отработавших газов, способных обеспечить окисление альдегидов, кислот и других продуктов неполного сгорания спиртовых топлив до воды и диоксида углерода.

Несмотря на такое значительное количество недостатков, этанол нашёл своё применение в качестве добавок к топливу [27]».

Этанол был использован в Германии и Франции еще в 1894 году зарождающейся в то время промышленностью двигателей внутреннего сгорания. Бразилия использует этанол в качестве топлива с 1925 года. К тому времени производство этанола было в 70 раз больше, чем производство и потребление бензина. Были времена, когда стремление к альтернативам бензину было более энергичным, в основном продиктованным стратегическими и экономическими причинами. Интересно отметить, что в Бразилии интенсивное употребление этанола наблюдалось в 1930, 1940, 1950, 1958 и 1973 годах. К сожалению, нефть всегда считалась в изобилии, почти безграничной по доступности. Оно было дешевым и универсальным, поэтому промышленность всегда была очень заинтересована в интенсивном использовании этого, казалось бы, чудодейственного топлива. Все усилия по разработке были направлены на использование бензина, и поэтому двигатели были разработаны для этого топлива [6].

## 2 Тепловой расчет проектируемого двигателя

Задание на бакалаврскую работу заключается в проведении теплового расчета, который позволит оценить потенциал работы двухтопливного автомобильного двигателя. Для этого необходимо произвести сравнение результатов расчета для двух видов топлива (таблица 2): дизельного топлива и дизельного топлива, в которое добавлен этанол.

Основные характеристики дизельного двигателя ВАЗ 341, принятого для расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики двигателя

Тип	4-тактный двухтопливный с воспламенением от сжатия
Число и расположение цилиндров	4 – рядно
Диаметр цилиндров, мм	76
Ход поршня, мм	84
Длина шатуна, мм	168
Рабочий объем, л	1.524
Степень сжатия	23
Номинальная частота вращения коленчатого вала, об/мин	3000
Максимальная частота вращения коленчатого вала, об/мин	4800
Минимальная частота вращения коленчатого вала при режиме холостого хода, об/мин	800
Номинальная мощность при частоте вращения коленчатого вала 5000 об/мин, кВт (л.с.)	39(53)
Максимальный крутящий момент, Нм	96

При расчете тепловых процессов в двигателе часто используется методика Гринивецкого – Мазинга [2,9,10,11,14]. Расчет включает в себя определение основных параметров двигателя, характеризующих цикл в общем, и оценку мощностных и экономических показателей. Тепловой расчет проводится с учетом рекомендаций, описанных в учебниках. Полученные результаты представляются в виде графиков и таблиц. Эта методика позволяет оценить эффективность теплообмена и определить необходимые параметры для корректной работы системы.

При работе двигателя существует ограничение на максимальный коэффициент избытка воздуха, который не должен превышать 1,4 из-за требований к токсичности отработавших газов. Поэтому при расчете параметров рабочего тела используются результаты для каждого вида топлива, независимо от частоты вращения двигателя (таблица 2).

Зададим атмосферные условия:

$p_0 = 0,1$  (МПа):  $T_0 = 293$  (К).

Примем температуру остаточных газов:

$T_r = 850 - 950$  (К).

«Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг дизельного топлива» [2]:

$$L_0 = \frac{1}{208} \cdot \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} \right) \quad (1)$$

$$l_0 = \frac{1}{0.23} \cdot \left( \frac{8}{3} \cdot C + 8H \right) \quad (2)$$

«Количество горючей смеси» [2]:

$$M_1 = \alpha \cdot L_0 \quad (3)$$

«Количество отдельных компонентов продуктов сгорания дизельного топлива» [2]:

$$M_{CO_2} = \frac{\frac{m}{100} \cdot C + \left(1 - \frac{m}{100}\right)}{12} \quad (4)$$

$$M_{H_2O} = \frac{\frac{m}{100} \cdot H + \left(1 - \frac{m}{100}\right)}{2} \quad (5)$$

$$M_{O_2} = 0.208 \cdot (\alpha - 1) \cdot L_0 \quad (6)$$

$$M_{N_2} = 0.792 \cdot \alpha \cdot L_0 \quad (7)$$

«Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг смеси этанола и дизельного топлива» [2]:

$$L_0 = \frac{m}{100} \cdot L_{0Д} + \left(1 - \frac{m}{100}\right) \cdot L_{0Э} \quad (8)$$

$$l_0 = \frac{m}{100} \cdot l_{0Д} + \left(1 - \frac{m}{100}\right) \cdot l_{0Э} \quad (9)$$

«Количество отдельных компонентов продуктов сгорания смеси этанола и дизельного топлива» [2]:

$$M_{CO_2} = \frac{\frac{m}{100} \cdot C_D + \left(1 - \frac{m}{100}\right) \cdot C_E}{12} \quad (10)$$

$$M_{H_2O} = \frac{\frac{m}{100} \cdot H_D + \left(1 - \frac{m}{100}\right) \cdot H_E}{2} \quad (11)$$

$$M_{O_2} = 0.208 \cdot (\alpha - 1) \cdot L_0 \quad (12)$$

$$M_{N_2} = 0.792 \cdot \alpha \cdot L_0 \quad (13)$$

Таблица 2 – Результаты расчета параметров рабочего тела

$L_0$ , кмоль возд/кг топл	$l_0$ , кг возд/кг топл	$M_1$ , кмоль гор.см./кг топл.	$M_{CO_2}$ , кмоль CO <sub>2</sub> /кг топл.	$M_{H_2O}$ , кмоль H <sub>2</sub> O/кг топл.	$M_{N_2}$ , кмоль N <sub>2</sub> /кг топл.	$M_{O_2}$ , кмоль O <sub>2</sub> /кг топл.	$M_2$ , кмоль пр.сг./кг топл.
Дизельное топливо							
0,5	14,47	0,7	0,07	0,06	0,55	0,0416	0,73
ДТ+20% этанола							
0,47	13,59	0,66	0,07	0,06	0,52	0,0391	0,69

Температура подогрева заряда  $\Delta T = 20$ .

«Потери давления на впуске» [2]:

$$\Delta p_0 = \frac{2.8 \cdot A_n^2 \cdot n^2 \cdot \rho_0 \cdot 10^{-6}}{2} \quad (14)$$

«Давление в конце впуска» [2]:

$$p_a = p_0 - \Delta p_a \quad (15)$$

«Давление остаточных газов» [2]:

$$p_r = p_0 \cdot [1.035 + A_p \cdot 10^{-8} \cdot (n)^2] \quad (16)$$

«Коэффициент остаточных газов» [2]:

$$\gamma_r = \frac{\frac{T_0 + \Delta T_0}{T_r} \cdot p_r}{\varepsilon^* p_a - p_r} \quad (17)$$

«Температура в конце впуска» [2]:

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma \cdot T_r}{1 + \gamma_r} \quad (18)$$

«Рассчитаем коэффициент наполнения при условии, что максимально возможный коэффициент дозарядки» [2]:  $\phi_{\text{доз}} = 1,1$ :

$$\eta_V = \frac{\frac{T_0}{T_0 + \Delta T} \cdot 1}{\frac{\varepsilon - 1}{P_0}} \cdot (\phi_{\text{доз}} \cdot \varepsilon \cdot P_a - P_r) \quad (19)$$

Анализ результатов расчета процесса впуска (таблица 3) показал небольшие изменения температуры в конце впуска при работе на дизеле и дизеле с добавкой спирта.

Таблица 3 – Результаты расчета процесса впуска

$n, \text{ мин}^{-1}$	$\Delta p_a, \text{ Мпа}$	$p_a, \text{ Мпа}$	$T_r, \text{ К}$	$p_r, \text{ Мпа}$	$\gamma_r$	$T_a, \text{ К}$	$\eta_V$
Дизельное топливо							
900	0.0003	0.1	850	0.1039	0.0186	341.93	0.877
2000	0.0014	0.1	900	0.1055	0.0177	336.98	0.881
3000	0.0032	0.1	920	0.108	0.0178	332.48	0.876
4800	0.0082	0.09	950	0.115	0.019	324.86	0.85
ДТ+20% этанола							
900	0.0003	0.1	850	0.1039	0.0186	341.93	0.877
2000	0.0014	0.1	900	0.1055	0.0177	336.98	0.881
3000	0.0032	0.1	950	0.108	0.0173	332.67	0.876
4800	0.0082	0.09	980	0.115	0.018	325.16	0.85

«Коэффициент молекулярного изменения рабочей смеси» [2]:

$$\mu = \frac{\mu_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r} \quad (20)$$

«Давление в конце сжатия» [2]:

$$p_c = p \cdot \varepsilon^{n_1} \quad (21)$$

«Температура в конце сжатия» [2]:

$$T_c = T_a \cdot \varepsilon^{n_1 - 1} \quad (22)$$

При анализе результатов расчета параметров двигателя в момент окончания сжатия и начала воспламенения (таблица 4) было обнаружено незначительное увеличение коэффициента молекулярного изменения рабочей смеси и снижение давления в конце процесса сжатия.



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

$n, \text{мин}^{-1}$	$\mu$	$n_l$	$P_c, \text{МПа}$	$T_c, \text{К}$
Дизельное топливо				
900	1.044	1.375	7.43	1110
2000	1.044	1.376	7.37	1100
3000	1.044	1.377	7.26	1080
4800	1.044	1.378	6.91	1060
ДТ+20% этанола				
900	1.046	1.375	7.43	1110
2000	1.046	1.376	7.37	1100
3000	1.046	1.376	7.24	1080
4800	1.046	1.377	6.89	1060

«Степень повышения давления» [2]:

$$\lambda = 1.6$$

«Теоретическое максимальное давление в процессе сгорания» [2]:

$$p_z = p_c \cdot \lambda \quad (23)$$

«Действительное максимальное давление в процессе сгорания» [2]:

$$p'_z = 0.9 \cdot p_z \quad (24)$$

«Степень предварительного расширения» [2]:

$$\rho = \frac{\mu \cdot T_z}{\lambda \cdot T_c} \quad (25)$$

«Степень последующего расширения» [2]:

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho} \quad (26)$$

«Давление и температура в конце процесса расширения» [2]:

$$P_b = \frac{P_z}{\delta^{n_2}} \quad (27)$$

$$T_b = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}} \quad (28)$$

«Проверка ранее выбранной температуры отработавших газов и погрешность расчета» [2]:

$$T'_r = \frac{T_b}{\sqrt[3]{\frac{P_b}{P_r}}} \quad (29)$$

$$\Delta = \frac{100 \cdot (T'_r - T_r)}{T_r} \quad (30)$$

При анализе результатов расчета процесса расширения и выпуска отработавших газов было обнаружено, что при использовании смеси дизельного топлива и этанола происходит снижение температуры отработавших газов и температуры в конце процесса сгорания. Кроме того, замечено снижение степени последующего расширения, что свидетельствует о повышении эффективности использования тепла.

Таблица 5 – Результаты расчета процесса расширения и выпуска

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$T_z'$ , К	$P_z'$ , МПа	$\delta$	$m_2$	$P_b'$ , МПа	$T_b'$ , К	$T_r'$ , К	$\Delta$ , %
Дизельное топливо								
900	2703.9	10.7	14.44	1.254	0.42	1372.24	862.92	1.52
2000	2776	10.61	13.91	1.254	0.43	1422.44	887.37	-1.4
3000	3014.8	10.46	12.68	1.25	0.49	1597.51	967.93	4.08
4800	2823.6	9.95	13.27	1.25	0.44	1479.51	948.29	-0.18
ДТ+20% этанола								
900	2678.5	10.7	14.56	1.254	0.41	1356.59	855.92	0.7
2000	2749	10.61	14.02	1.254	0.43	1405.67	879.95	-2.23
3000	2899.4	10.42	13.13	1.25	0.46	1523.28	937.26	-1.34
4800	2792.9	9.92	13.36	1.25	0.43	1460.92	940.03	-4.08

«Среднее индикаторное давление» [2]:

$$p_i = p_{II} + p'_i \quad (31)$$

«Индикаторный коэффициент полезного действия» [2]

$$\eta_i = \frac{p_i \cdot l_0 \cdot \alpha}{H_u \cdot \rho_0 \cdot \eta_v} \cdot 1000 \quad (32)$$

«Удельный индикаторный расход топлива» [2]:

$$g_i = \frac{3600}{\eta_i \cdot H_u} \cdot 10^3 \quad (33)$$

При анализе результатов расчета индикаторных показателей рабочего цикла (таблица 6) было замечено увеличение индикаторного расхода топлива при использовании смеси дизельного топлива и этанола.

Таблица 6 – Результаты расчета индикаторных показателей рабочего цикла

$n, \text{мин}^{-1}$	$P_i, \text{Мпа}$	$\eta_i$	$g_i, \text{г/кВт*ч}$
Дизельное топливо			
900	0.82	0.38	225.34
2000	0.85	0.39	219.52
3000	0.92	0.42	200.8
4800	0.84	0.4	213.83
ДТ+20% этанола			
600	0.82	0.38	241.8
2500	0.84	0.39	235.61
4000	0.89	0.41	222.09
5000	0.83	0.4	230.08

«Средняя скорость поршня» [2]:

$$v_n = \frac{S \cdot n}{30} \quad (34)$$

«Среднее давление механических потерь» [2]:

$$P_M = 0.089 + 0.118 \cdot v_{П.ср.} \quad (35)$$

«Среднее эффективное давление» [2]:

$$P_e = P_i - P_M \quad (36)$$

«Механический коэффициент положительного действия» [2]:

$$\eta_M = \frac{P_e}{P_i} \quad (37)$$

«Эффективный коэффициент положительного действия» [2]:

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_M \quad (38)$$

«Удельный эффективный расход топлива» [2]:

$$g_e = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_e} \cdot 1000 \quad (39)$$

«Расчетная эффективная мощность» [2]:

$$N_e = \frac{P_e \cdot V_d \cdot n}{30 \cdot \tau} \quad (40)$$

«Эффективный крутящий момент» [2]:

$$M_e = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot N_e}{\pi \cdot n} \quad (41)$$

«Количество топлива, сжигаемое за один час работы» [2]:

$$G_T = N_e \cdot g_e \quad (42)$$

При анализе результатов расчета эффективных показателей рабочего цикла (таблица 7) было обнаружено небольшое увеличение эффективного и часового расхода топлива, а также снижение эффективной мощности.

Таблица 7 – Результаты расчета эффективных показателей рабочего цикла

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$V_{п.ср.}$ , м/с	$p_m$ , Мпа	$p_e$ , Мпа	$\eta_m$	$\eta_e$	$g_e$ , г/(кВт.ч)	$N_e$ , кВт	$M_e$ , Н.м	$G_T$ , кг/ч
Дизельное топливо									
900	2.52	0.12	0.7	0.86	0.32	263.36	8.05	85.36	2.12
2000	5.6	0.16	0.69	0.82	0.32	268.67	17.6	84.01	4.73
3000	8.4	0.19	0.73	0.8	0.34	252.25	27.98	89.05	7.06
4800	13.44	0.25	0.59	0.71	0.28	303.2	36.12	71.85	10.95
ДТ+20% этанола									
900	2.52	0.12	0.7	0.85	0.33	282.97	7.97	84.57	2.26
2000	5.6	0.16	0.69	0.82	0.32	288.9	17.42	83.17	5.03
3000	8.4	0.19	0.7	0.79	0.33	281.82	26.66	84.86	7.51
4800	13.44	0.25	0.58	0.7	0.28	327.72	35.57	70.77	11.66

«Общее количество теплоты» [2]:

$$Q_0 = \frac{H_u \cdot G_T}{3.6} \quad (43)$$

«Теплота, эквивалентная эффективной работе за 1 секунду» [2]:

$$Q_e = 1000 \cdot N_e \quad (44)$$

$$q_e = \frac{Q_e \cdot 100}{Q_0} \quad (45)$$

Теплота, передаваемая охлаждающей среде при

$n$ , об/мин	900	2000	3000	4800
$m$	0.55	0.63	0.63	0.63

$$Q_s = 0.5 \cdot i \cdot (D \cdot 0.1)^{1+2 \cdot m} \cdot n^m \cdot \frac{H_u}{\alpha \cdot H_u} \quad (46)$$

$$q_s = \frac{Q_s \cdot 100}{Q_0} \quad (47)$$

«Теплота, унесенная с отработавшими газами» [2]:

$$Q_r = G_T \cdot [M_2 \cdot (mc''_p + 8.315) \cdot t_r - M_1 \cdot (mc_p + 8.315) \cdot t_0] \quad (48)$$

$$q_r = \frac{Q_r \cdot 100}{Q_0} \quad (49)$$

«Потери теплоты, которые не были учтены» [2]:

$$Q_{ост} = Q_0 - (Q_e + Q_s + Q_r) \quad (50)$$

$$q_{ост} = \frac{Q_{ост} \cdot 100}{Q_0} \quad (51)$$

Таблица 8 – Результаты расчета теплового баланса

п, мин <sup>-1</sup>	Q <sub>0</sub> , Дж/с	Q <sub>в</sub> , Дж/с	q <sub>в</sub> , %	Q <sub>в</sub> , Дж/с	q <sub>в</sub> , %	Q <sub>г</sub> , Дж/с	q <sub>г</sub> , %	Q <sub>ост</sub> , Дж/с	q <sub>ост</sub> , %
<b>Дизельное топливо</b>									
900	24976.5	8045.1	32.21	4260.3	17.06	7982.5	31.96	4688.6	18.77
2000	55726.2	17595.5	31.57	16795.4	30.14	19879.2	35.67	1456.1	2.61
3000	83190.5	27977.1	33.63	21683.4	26.06	31018.5	37.29	2511.5	3.02
4800	129089.6	36117.8	27.98	29155.6	22.59	49511.7	38.35	14304.5	11.08
<b>ДТ+20% этанола</b>									
900	24509	7971	32.52	4260.3	17.38	7995	32.62	4282.7	17.47
2000	54683.2	17419.4	31.86	16795.4	30.71	19910.3	36.41	558.2	1.02
3000	81633.5	26658.1	32.66	21683.4	26.56	31957	39.15	1335	1.64
4800	126673.6	35572	28.08	29155.6	23.02	51646.9	40.77	10299	8.13

### 3 Кинематический и динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя

#### 3.1 Кинематический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя

Был проведен кинематический расчет для центрального кривошипно-шатунного механизма проектируемого двигателя (радиус кривошипа 41 мм, а длина шатуна 168 мм) при частоте вращения коленчатого вала, равной 4800 мин<sup>-1</sup>.

«Перемещение поршня» [2]:

$$S_x = r \cdot \left[ (1 - \cos \phi) + \frac{\lambda}{4} \cdot (1 - \cos \phi) \right] \quad (52)$$

«Скорость поршня» [2]:

$$V_{II} = \omega \cdot r \cdot \left( \sin \phi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\phi \right) \quad (53)$$

«Ускорение поршня» [2]:

$$J = \omega^2 \cdot r \cdot (\cos \phi + \lambda \cos 2\phi) \quad (54)$$

Таблица 9 — Результаты кинематического расчета

$\phi$ , град	$S$ , м	$V$ , м/с	$J$ , м/с <sup>2</sup>
0	0	0	13264.7
30	6.94	12.84	10516.6
60	24.98	20.57	3979.4
90	47.33	21.11	-2652.9
120	66.98	16	-6632.4
150	79.69	8.27	-7863.6
180	84	-	-7958.8
210	79.69	-8.27	-7863.6
240	66.98	-16	-6632.4
270	47.33	-21.11	-2652.9
300	24.98	-20.57	3979.4
330	6.94	-12.84	10516.6
360	0	-	13264.7

Результаты расчета перемещения, скорости и ускорения поршня приведены на рисунках 1 – 3.

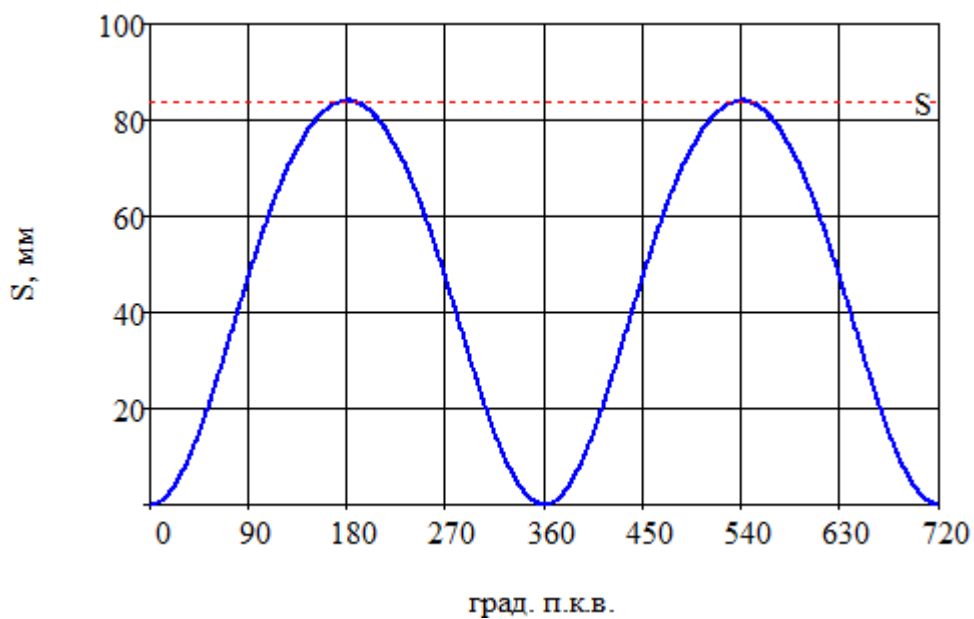


Рисунок 1 – Диаграмма изменения хода поршня

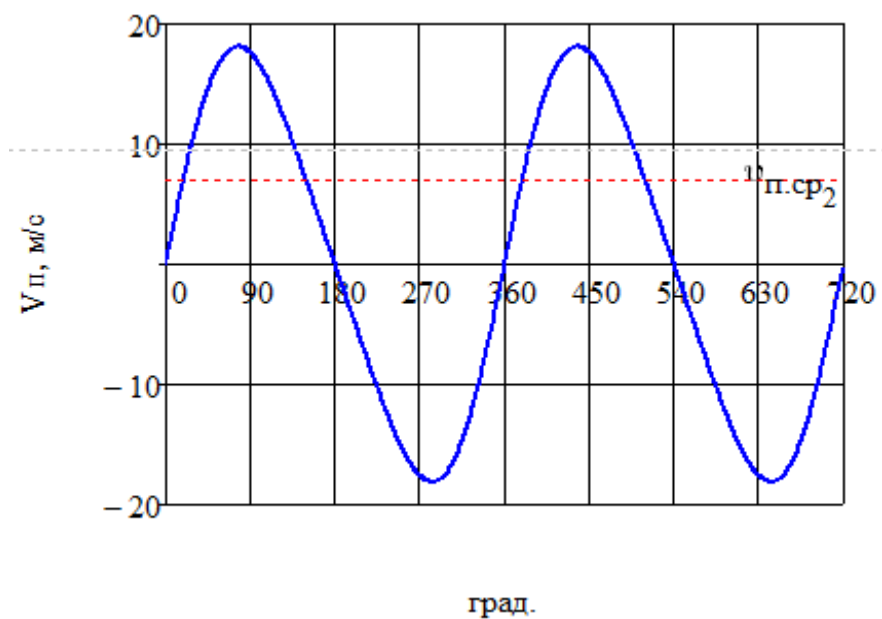


Рисунок 2 – Диаграмма изменения скорости поршня

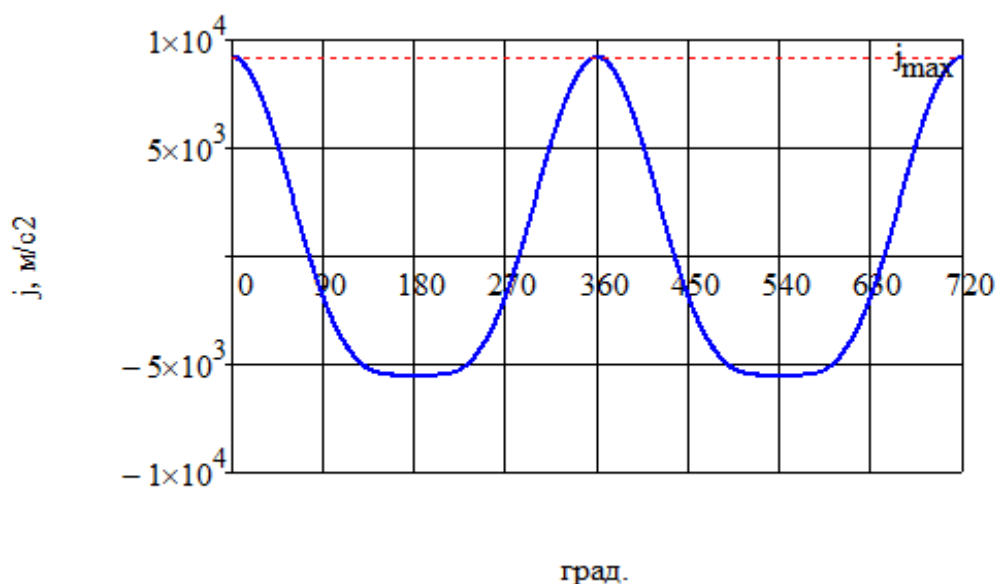


Рисунок 3 – Диаграмма изменения ускорения поршня

После проведения кинематического расчета мы можем вычислить инерционные силы, которые будут учитываться в динамическом расчете.

### 3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя

«Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма» [12] проектируемого двигателя был проведен при частоте вращения коленчатого 4800 мин<sup>-1</sup>, для условий работы двигателя на дизельном топливе и дизельном топливе с добавкой этилового спирта.

«Масса поршневой группы» [2]:

$m'_п=140$  кг/м<sup>2</sup> – приведенная масса поршня из алюминиевого сплава

$$m_{п} = m'_к \cdot F_{п} \quad (55)$$

«Масса шатуна» [2]:

$m'_ш=150$  кг/м<sup>2</sup> – приведенная масса стального кованого шатуна

$$m_{ш} = m'_ш \cdot F_{п} \quad (56)$$

«Масса неуравновешенных частей одного колена вала без противовесов» [2]:

$m'_к=140$  кг/м<sup>2</sup> приведенная масса литого чугуна вала

$$m_k = m'_к \cdot F_{п} \quad (57)$$

«Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца» [2]:



$$m_{u.n} = 0,275 \cdot m_u \quad (58)$$

«Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа» [2]:

$$m_{u.n} = 0,725 \cdot m_u \quad (59)$$

«Массы, совершающие возвратно поступательные движения» [2]:

$$m_j = m_n + m_{u.n} \quad (60)$$

«Массы, совершающие вращательные движения» [2]:

$$m_R = m_k + m_{u.k} \quad (61)$$

Результаты приведения масс кривошипно-шатунного механизма по двухмассовой схеме показаны в таблице 10.

Таблица 10 – Приведение масс кривошипно-шатунного механизма

Параметр	Величина
Площадь поршня, м <sup>2</sup>	0.00454
Удельная масса поршня, кг/м <sup>2</sup>	100
Масса поршневой группы, кг	0.45
Удельная масса шатуна, кг/м <sup>2</sup>	150
Масса шатуна, кг	0.68
Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца, кг	0.19
Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа, кг	0.49
Масса неуравновешенных частей одного колена вала, кг	0.64
Массы, совершающие возвратно-поступательное движение	0.64
Массы, совершающие вращательное движение	1.13
Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна, Н	-5.24
Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа, Н	-6.74
Центробежная сила инерции вращающихся масс, Н	-11.97

«Силы инерции возвратно-поступательного движения поршня и шатуна (т.е. масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца)» [2]:

$$P_{jk} = \frac{j \cdot m \cdot 10^{-6}}{F_{II}} \quad (62)$$

Результаты расчета приведены в виде графиков. На рисунке 4 приведены силы инерции возвратно-поступательного движения.

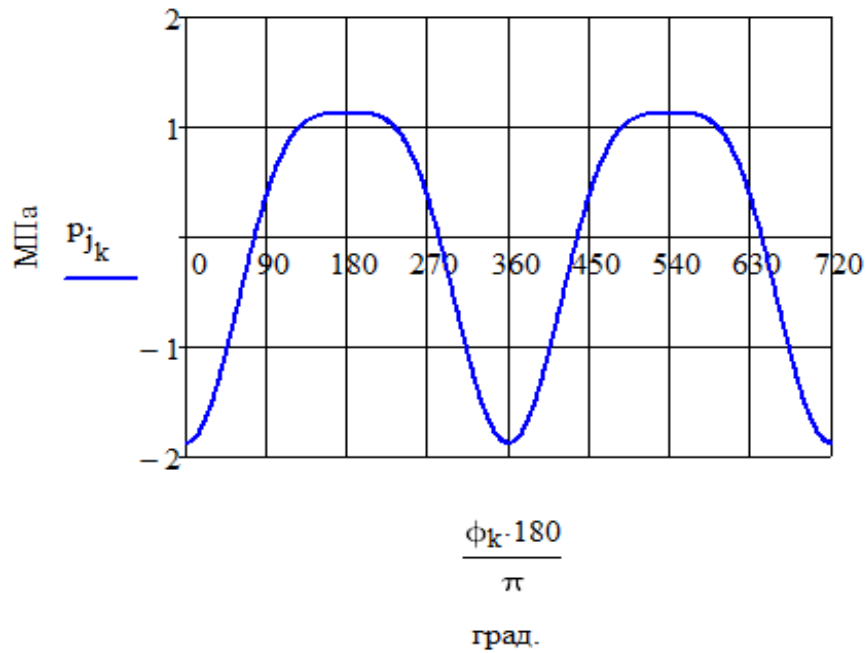


Рисунок 4 – Силы инерции возвратно-поступательного движения поршня и шатуна  
 «Центробежные силы инерции вращ. масс» [2]:

$$K_R = -m_R \cdot \frac{S \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \left( \frac{\pi \cdot n_N}{30} \right)^2 \cdot 10^{-3} \quad (63)$$

«Центробежные силы инерции вращ. масс шатуна» [2]:

$$K_{R.ш} = -m_{ш.к} \cdot \left[ \frac{S \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \left( \frac{\pi \cdot n_N}{30} \right)^2 \cdot 10^{-3} \right] \quad (64)$$

«Центробежные силы инерции вращ. масс кривошипа» [2]:

$$K_{R.к} = -m_k \cdot \left[ \frac{S \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \left( \frac{\pi \cdot n_N}{30} \right)^2 \cdot 10^{-3} \right] \quad (65)$$

«Сила, сосредоточенная на оси поршневого пальца» [2]:

$$P_k = P_{sk} + P_{jk} \quad (66)$$

На рисунках 5 – 6 приведено сравнение общих сил, которые действуют на поршневой палец двигателя при работе на дизеле (рисунок 5) и дизеле с двадцатипроцентной добавкой этанола (рисунок 6).

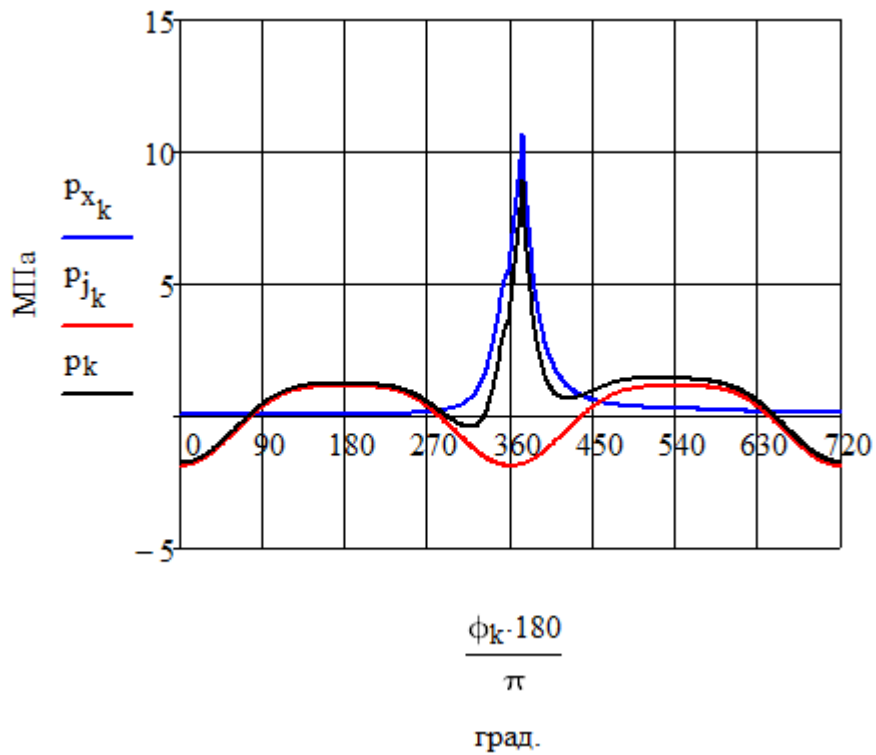


Рисунок 5 – Общие силы, которые действуют на поршневой палец двигателя во время работы на дизельном топливе.

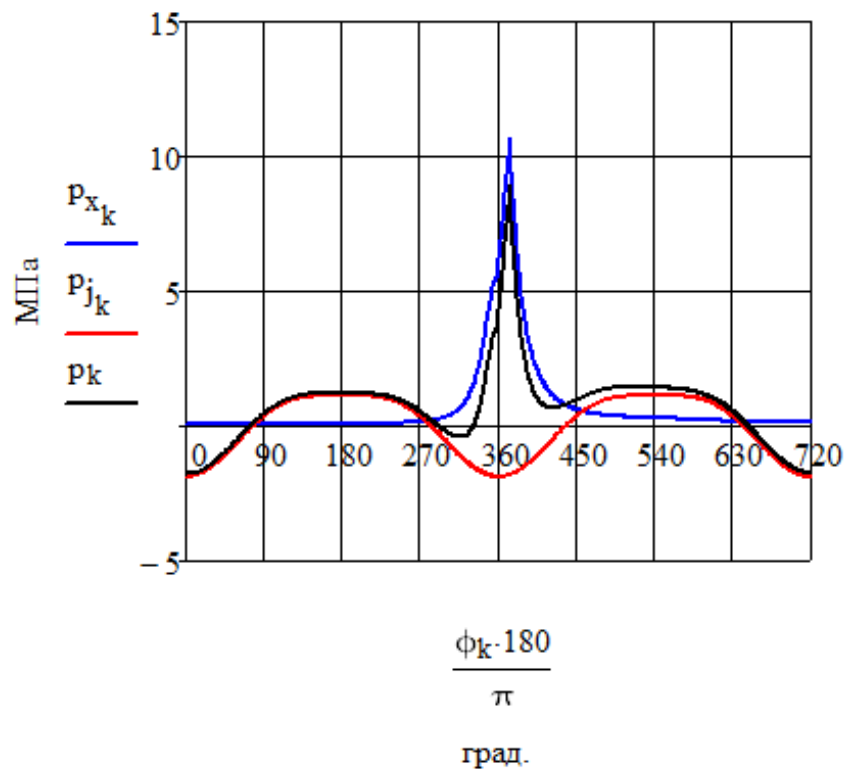


Рисунок 6 – Общие силы, которые действуют на поршневой палец двигателя во время работы на дизеле с двадцатипроцентной добавкой этанола

«Удельная сила, действующая вдоль шатуна» [2]:

$$p_{K_k} = \frac{p_k \cdot \cos(\varphi_k + \beta_k)}{\cos(\beta_k)} \quad (67)$$

«Удельная и полная тангенциальная сила, направленная по касательной к окружности радиуса кривошипа» [2]:

$$p_{T_k} = \frac{p_k \cdot \sin(\varphi_k + \beta_k)}{\cos(\beta_k)} \quad (68)$$

$$T_k = p_{T_k} \cdot 10^6 \cdot F_{II} \quad (69)$$

«Крутящий момент одного цилиндра» [2]:

$$M_{кр.цк} = T_k \cdot \frac{S \cdot 10^{-3}}{2} \quad (70)$$

«Суммарный крутящий момент» [2]:

$$M_{крk1} = M_{кр.цк} + M_{кр.цк+180} + M_{кр.цк+360} + M_{кр.цк+540} \quad (71)$$

$$k_1 = 1 \dots 180$$

На рисунках 7 – 8 приведено сравнение крутящего момента двигателя при работе на дизеле (рисунок 7) и дизеле с двадцатипроцентной добавкой этанола (рисунок 8).

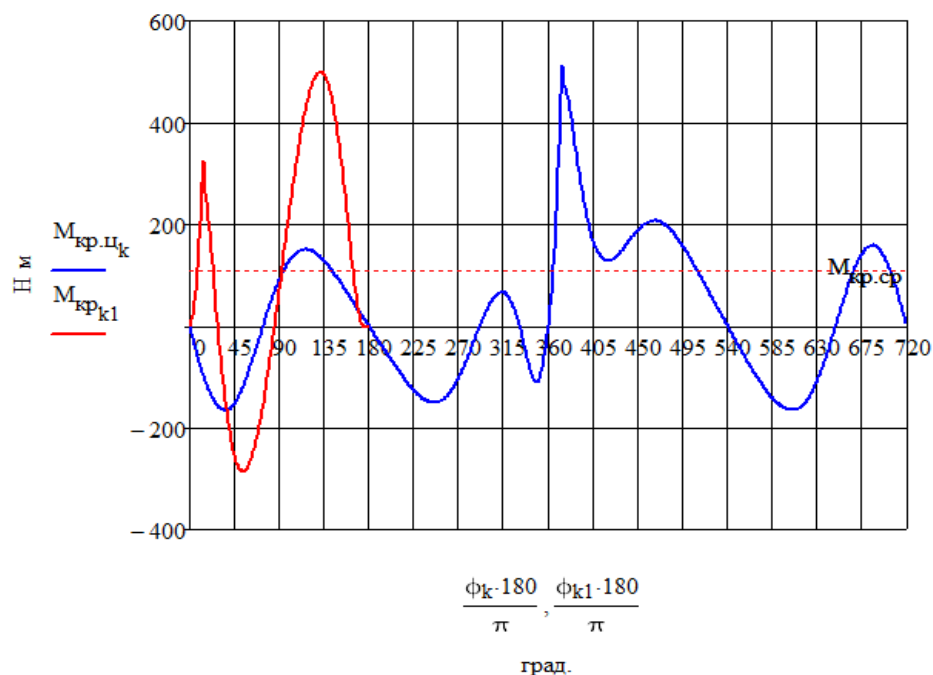


Рисунок 7 – График крутящего момента при работе на дизеле

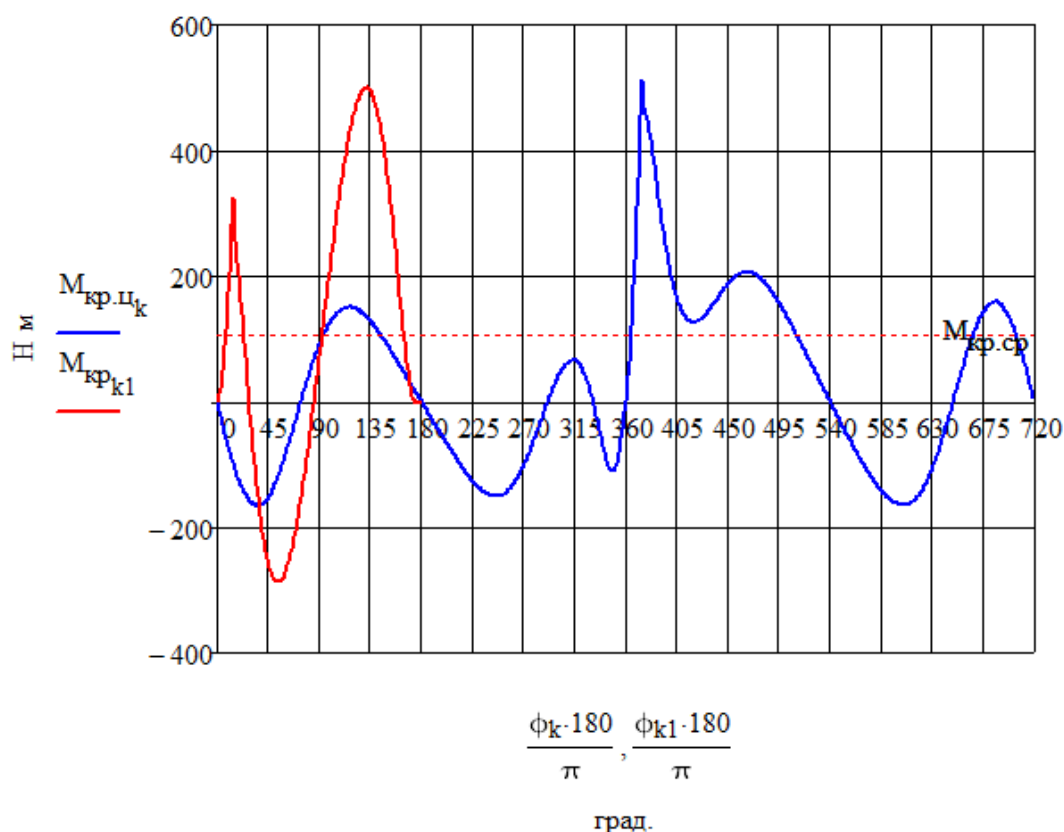


Рисунок 8 – График крутящего момента при работе на дизеле с двадцатипроцентной добавкой этанола

### Расчет сил, которые действуют на шатунную и коренные шейки коленчатого вала

«Суммарная сила, действующая на шатунную шейку по радиусу» [2]:

$$P_{K_k} = p_{K_k} \cdot 10^3 \cdot F_{II} + K_{R_{ш}} \quad (72)$$

$$R_{ш.шк} = \sqrt{(p_{TK} \cdot 10^3 \cdot F_{II})^2 + (P_{K_k})^2} \quad (73)$$

На рисунках 9 – 10 приведено сравнение суммарной силы, действующей на шатунную шейку в прямоугольных координатах при работе на дизеле (рисунок 9) и дизеле с двадцатипроцентной добавкой этанола (рисунок 10).

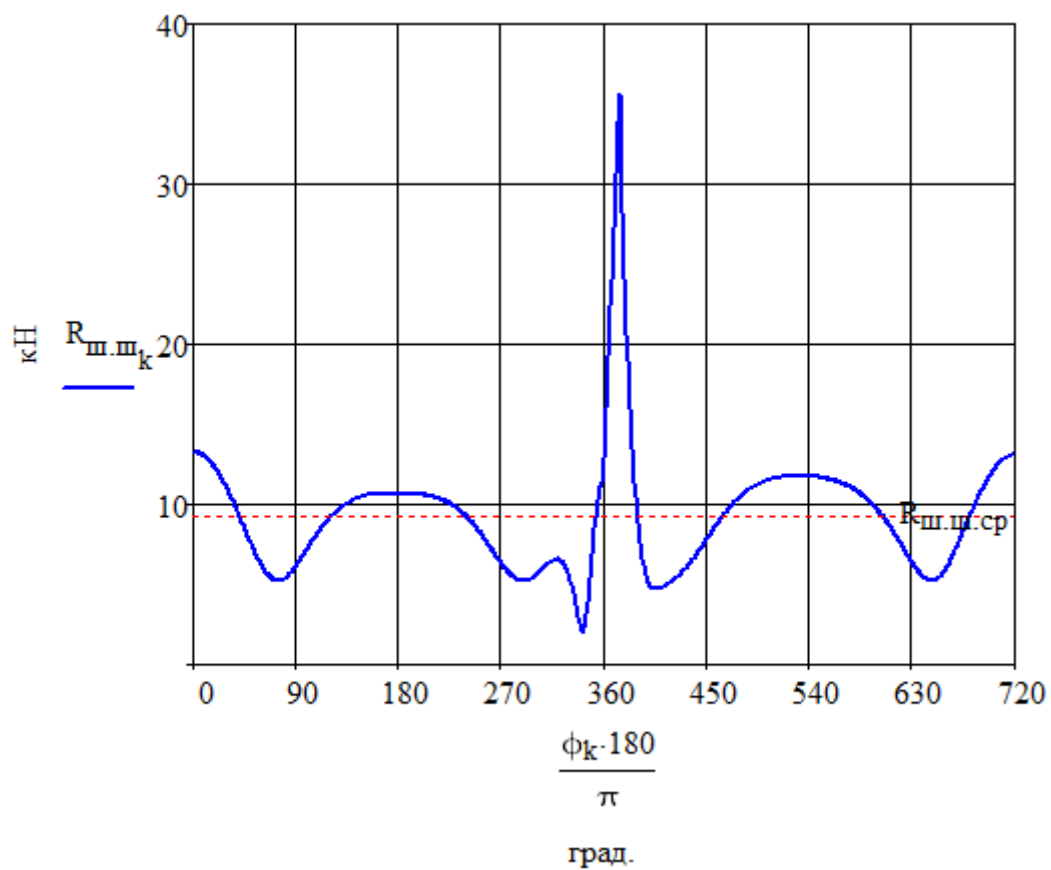


Рисунок 9 – Общая сила, которая действует на шейку шатуна при работе на дизеле

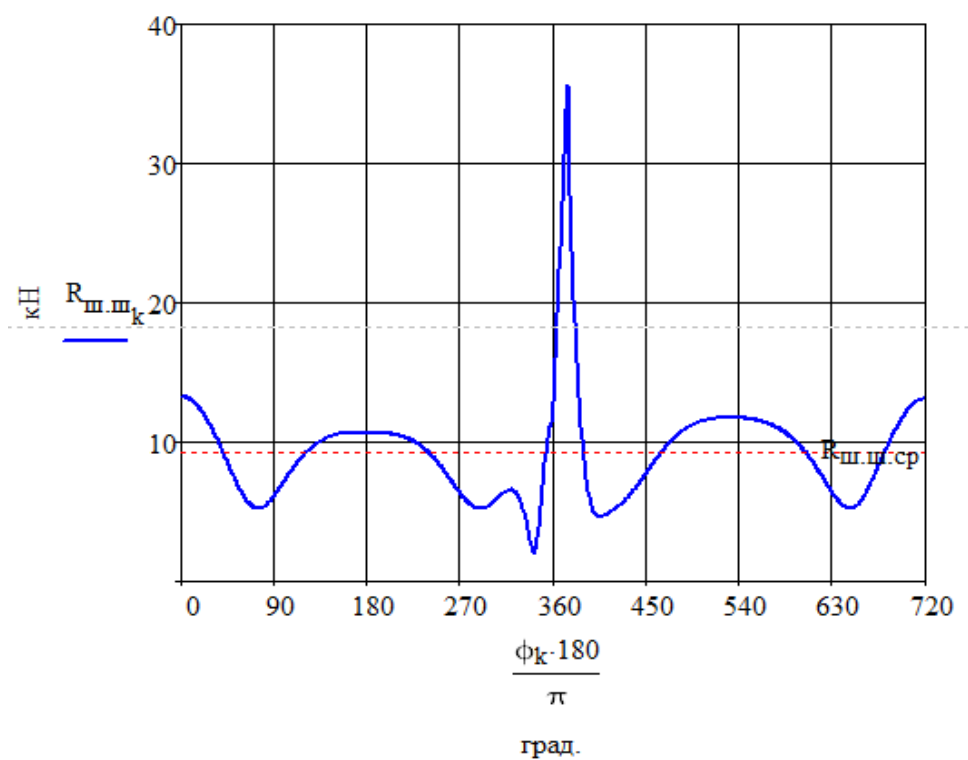


Рисунок 10 – Общая сила, которая действует на шейку шатуна при работе на дизеле с двадцатипроцентной добавкой этанола

На рисунках 11 – 12 приведено сравнение суммарной силы, действующей на шатунную шейку в полярных координатах при работе на дизеле (рисунок 11) и на дизеле с двадцатипроцентной добавкой этанола (рисунок 12).

«Силы, действующие на коренные шейки» [2]:

$$T_{k1_k} = 0.5 \cdot p_{Tk} \cdot 10^3 \cdot F_{II} \quad (74)$$

$$K_{pk1_k} = 0.5 \cdot (P_{K_k} + K_{R.k}) \quad (75)$$

$$R_{k.u1_k} = \sqrt{(T_{k1_k})^2 + (K_{pk1_k})^2} \quad (76)$$

На рисунках 13 – 14 приведено сравнение суммарных сил, действующих на коренные шейки в прямоугольных координатах при работе на дизеле (рисунок 13) и дизеле с двадцатипроцентной добавкой этанола (рисунок 14).

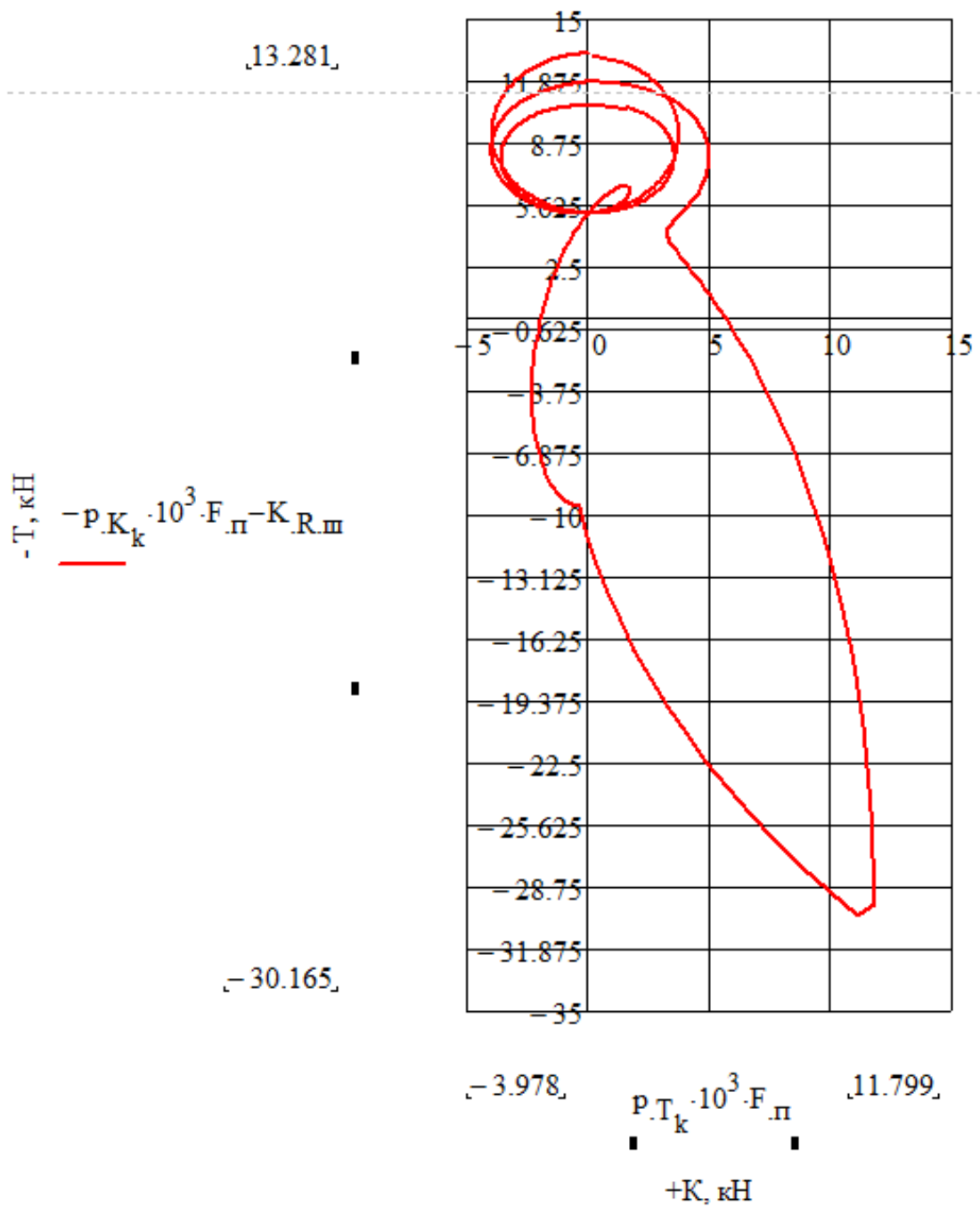


Рисунок 11 – Общая сила, действующая на шейку шатуна в полярных координатах при работе на дизеле



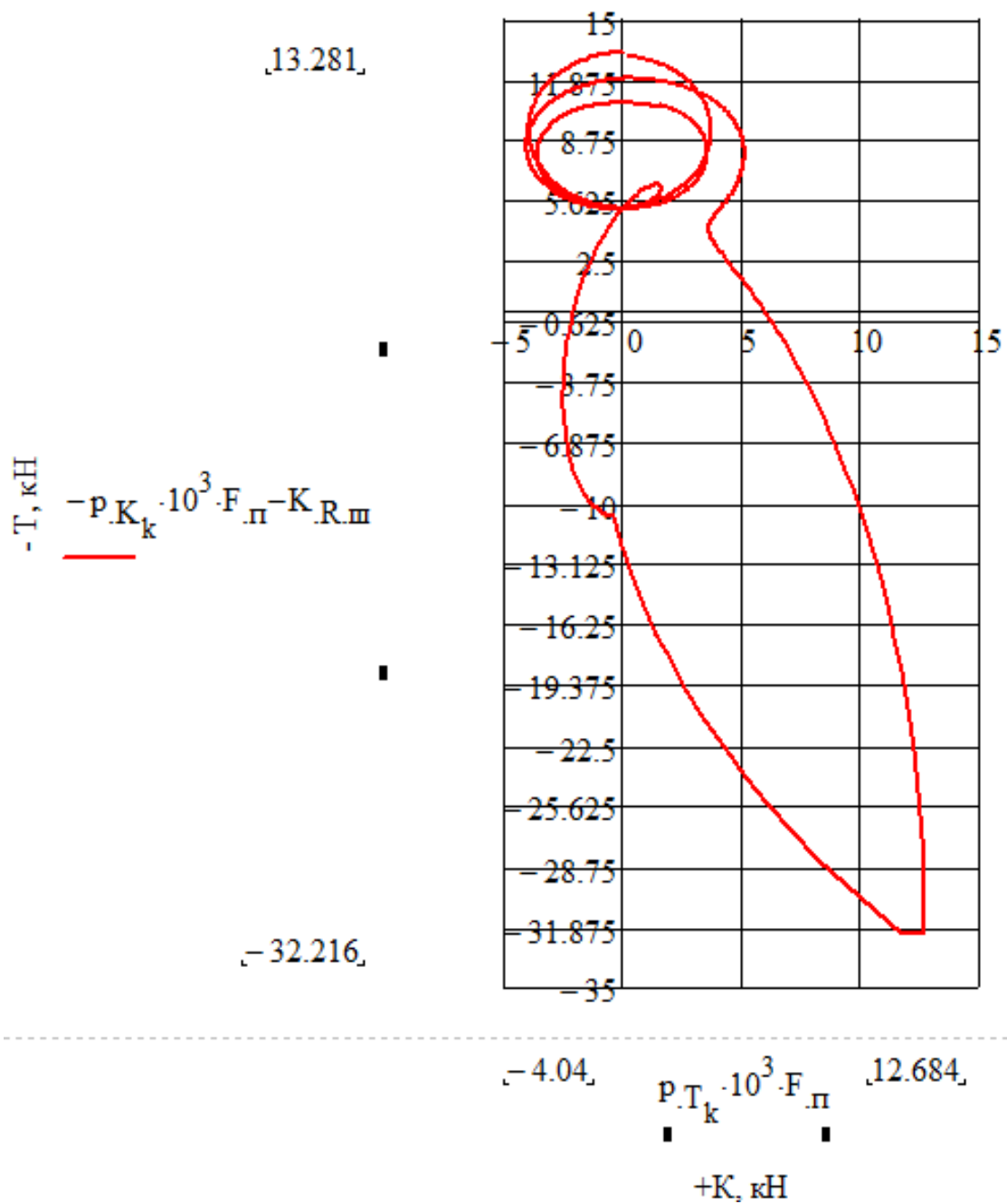


Рисунок 12 – Общая сила, действующая на шейку шатуна в полярных координатах при работе на дизеле с двадцатипроцентной добавкой этанола

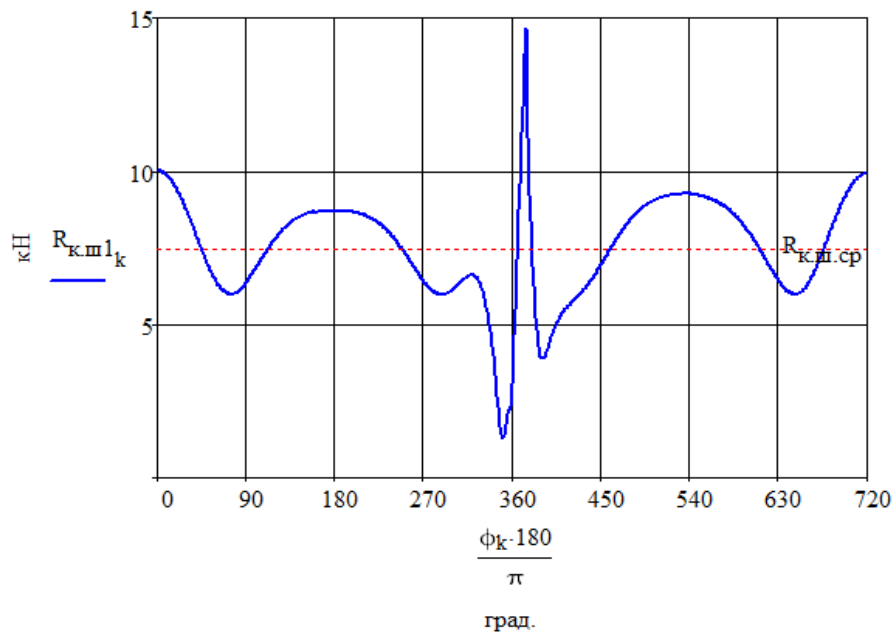


Рисунок 13 – Общие силы, которые действуют на коренные шейки в прямоугольных координатах при работе на дизеле

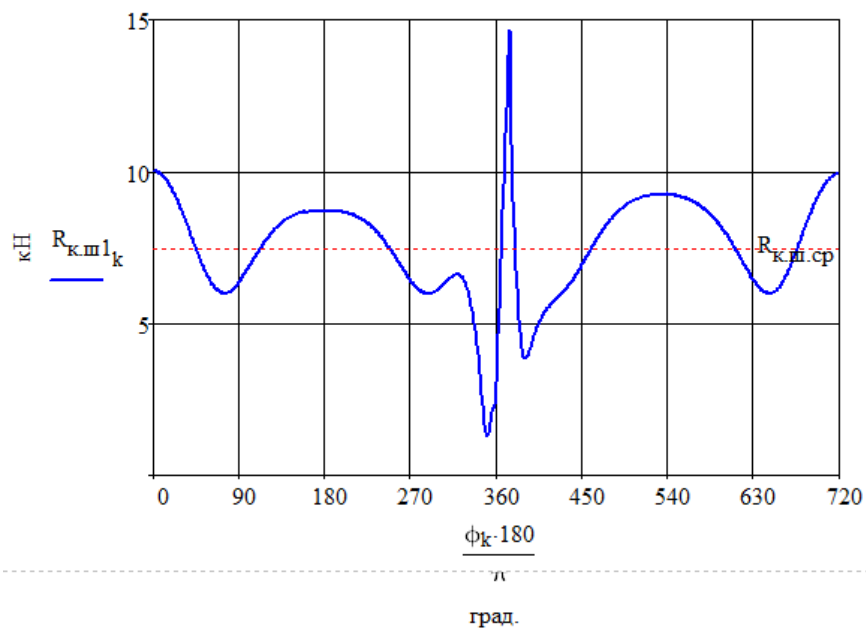


Рисунок 14 – Общие силы, которые действуют на коренные шейки в прямоугольных координатах при работе на дизеле с двадцатипроцентной добавкой этанола

Полярная диаграмма нагрузок на шейку шатуна используется для определения сил, направлений и точек приложения этих сил на шейку шатуна при различных положениях коленчатого вала.

На рисунках 15 – 16 приведено сравнение суммарных сил, действующих на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при работе на дизеле и дизеле с двадцатипроцентной добавкой этанола.

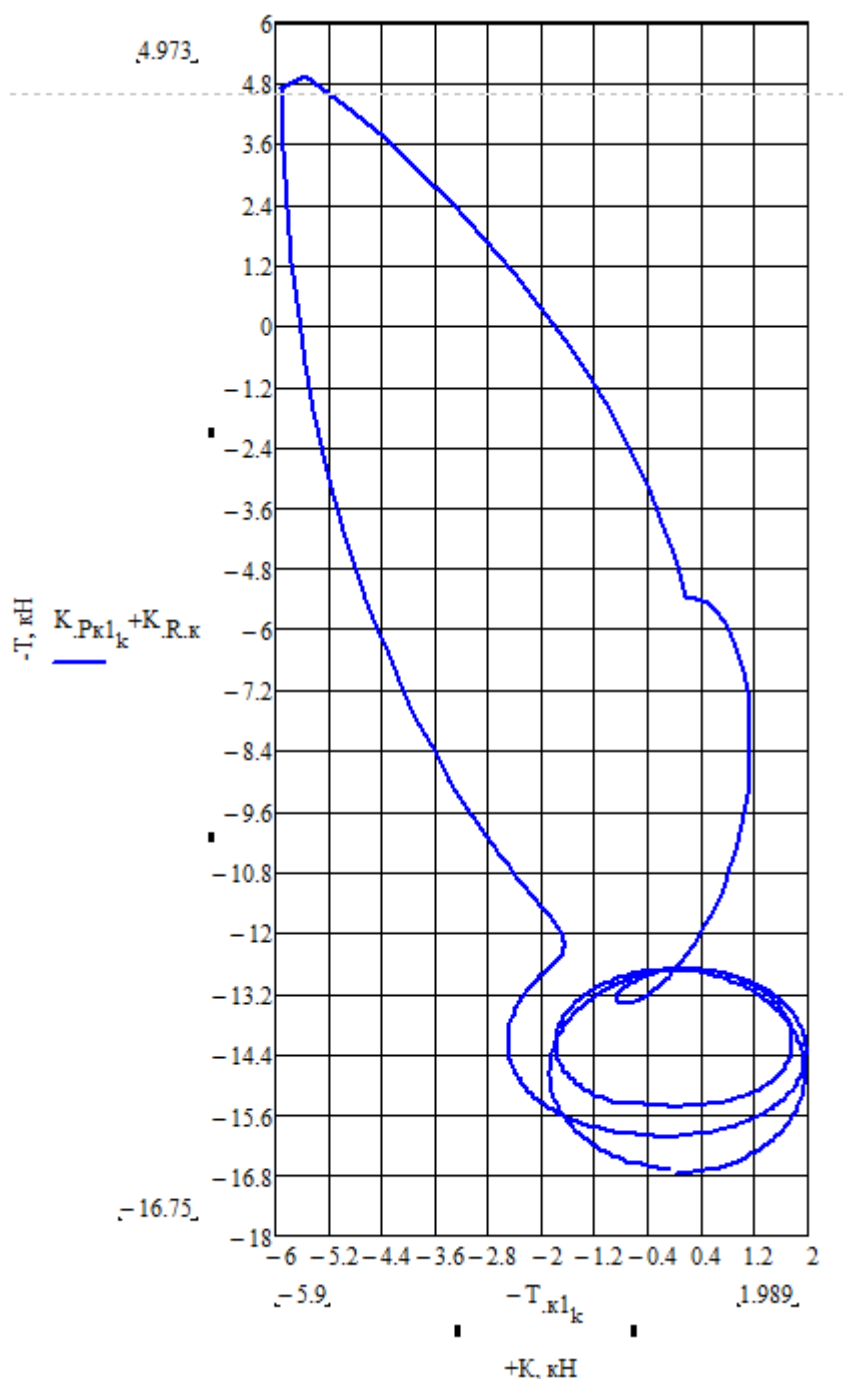


Рисунок 15 – Общая сила, которая действует на первую коренную шейку двигателя в полярных координатах при работе на дизеле.

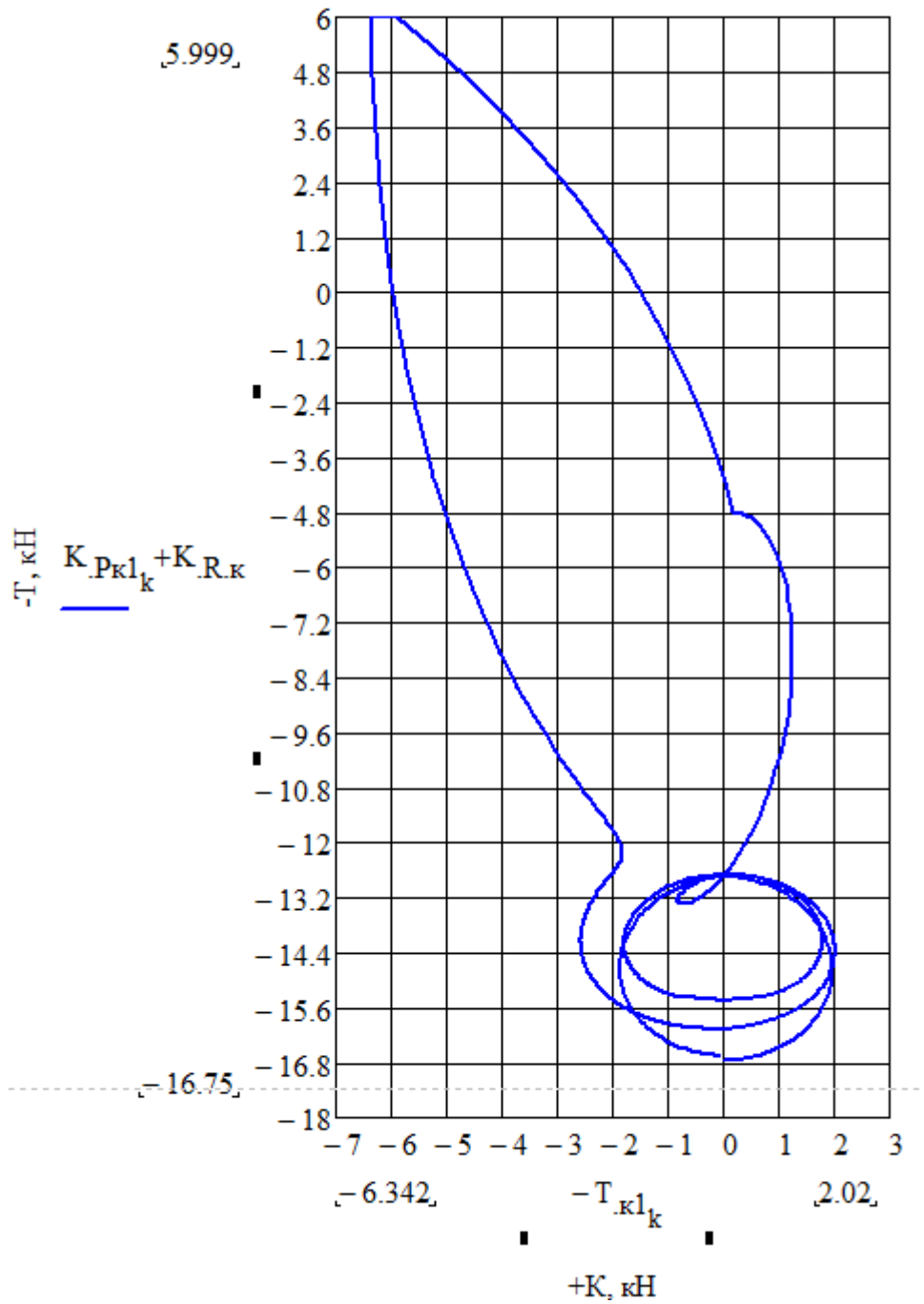


Рисунок 16 – Общая сила, которая действует на первую коренную шейку двигателя в полярных координатах при работе на дизеле с двадцатипроцентной добавкой этанола

## 4 Анализ влияния вида топлива (дизель, дизель с добавкой этилового спирта) на рабочий процесс ДВС

### 4.1 Влияние вида топлива в двухтопливном двигателе на максимальное давление цикла

Было проведено сравнение индикаторных диаграмм в координатах P-V для двух типов топлива (рисунок 17 – 20). Из этого стало ясно, что максимальное давление при использовании дизельного топлива на частотах вращения от  $900 \text{ мин}^{-1}$  до  $4800 \text{ мин}^{-1}$  выше, чем при использовании этилового спирта. Это объясняется тем, что теплота сгорания дизельного топлива выше, чем у этанола.

Также следует отметить, что давление при использовании обоих видов топлива с увеличением частоты вращения снижается.

Максимальное значение давления при работе на дизельном топливе достигается на  $3000 \text{ мин}^{-1}$ , а при работе на смеси дизеля и 20% этанола – на  $900 \text{ мин}^{-1}$ .

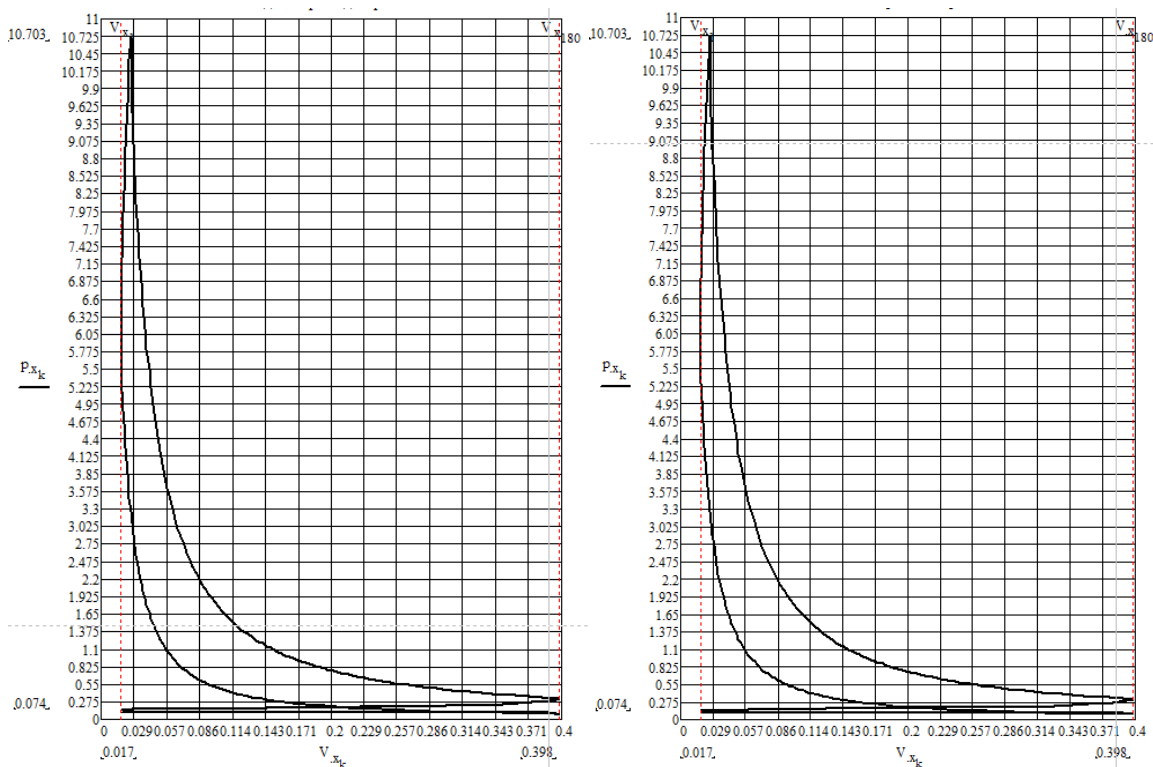


Рисунок 17 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для частоты вращения  $900 \text{ мин}^{-1}$  при работе на дизельном топливе и ДТ + 20% этанола

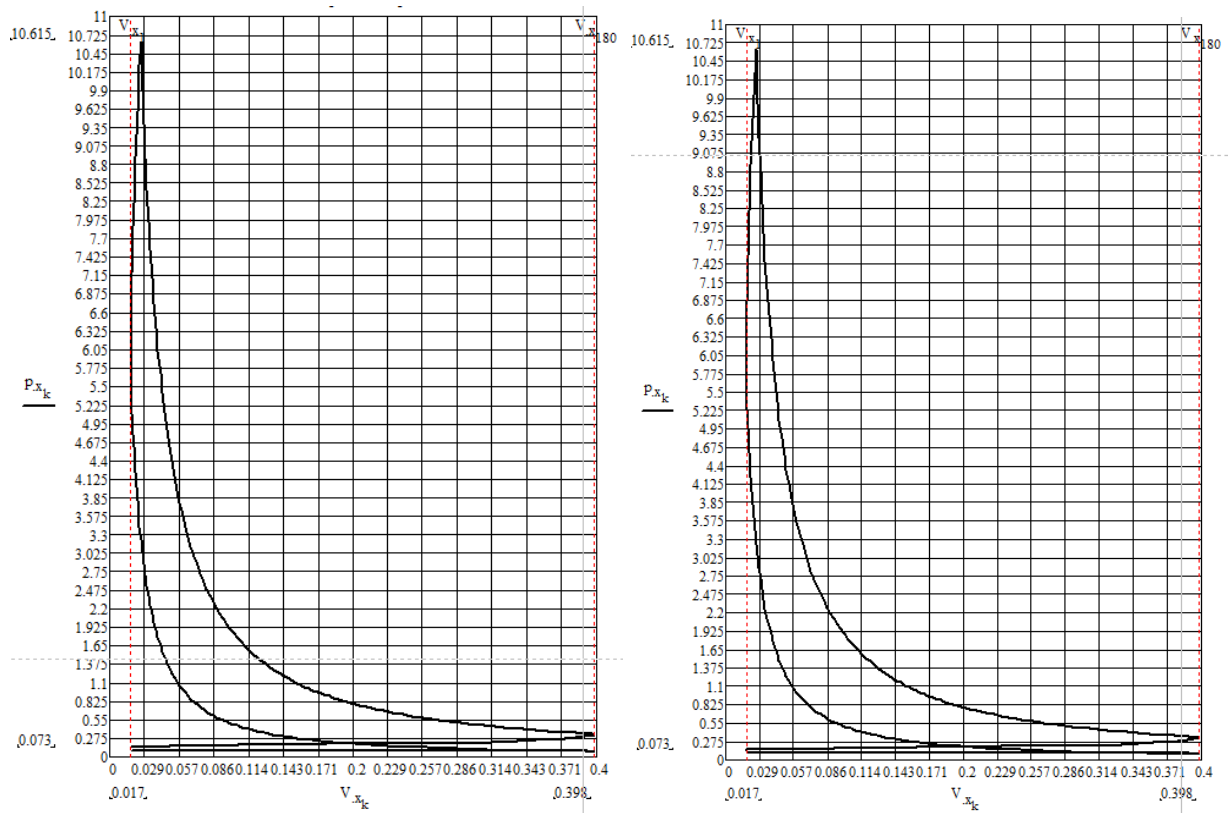


Рисунок 18 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для частоты вращения  $2000 \text{ мин}^{-1}$  при работе на дизельном топливе и ДТ + 20% этанола

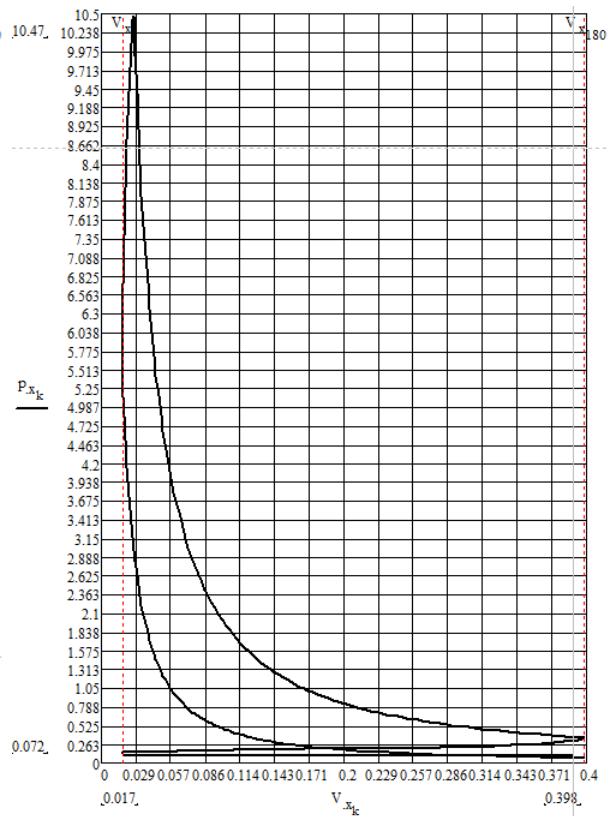
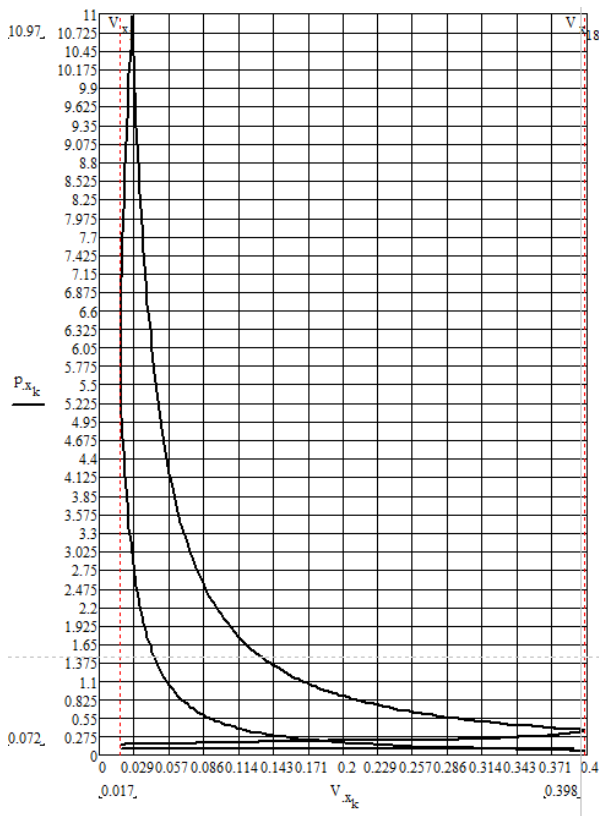


Рисунок 19 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для частоты вращения  $3000 \text{ мин}^{-1}$  при работе на дизельном топливе и ДТ + 20% этанола

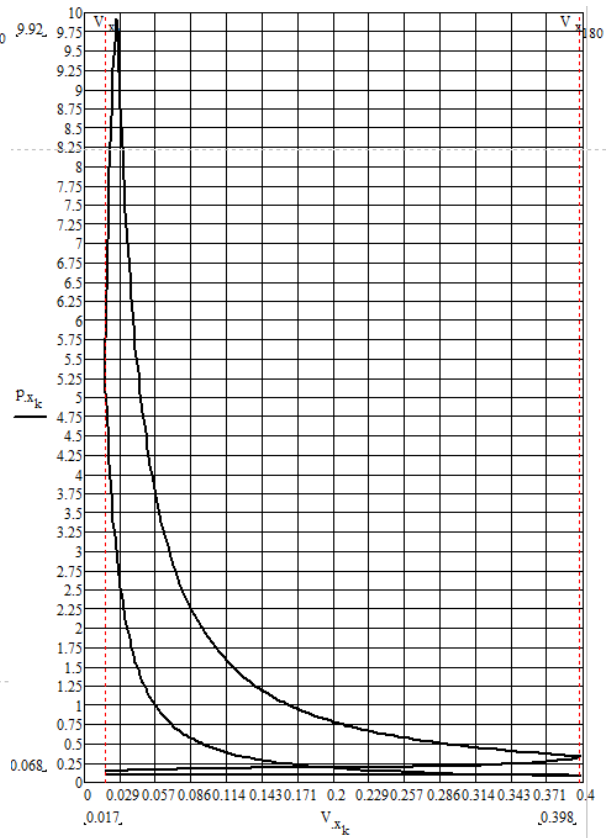
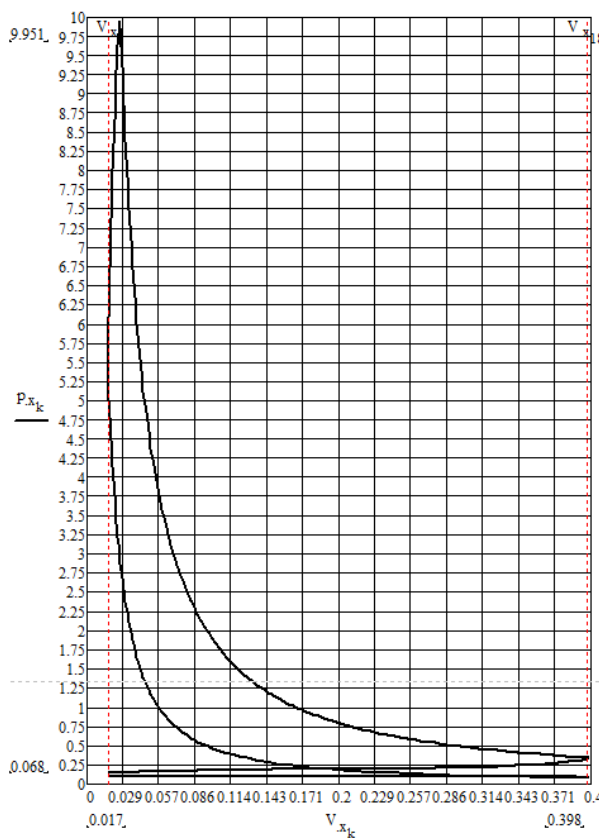


Рисунок 20 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для частоты вращения  $4800 \text{ мин}^{-1}$  при работе на дизельном топливе и ДТ + 20% этанола

#### 4.2 Влияния вида топлива (дизель, дизель с добавкой этилового спирта) на эффективные показатели цикла

Исходя из данных теплового расчета, составим таблицу параметров внешней скоростной характеристики (таблица 11).

Таблица 11 – Внешняя скоростная характеристика

	Дизельное топливо			
	900 $\text{мин}^{-1}$	2000 $\text{мин}^{-1}$	3000 $\text{мин}^{-1}$	4800 $\text{мин}^{-1}$
$M_e, \text{ Нм}$	85.36	84.01	89.05	71.85
$N_e, \text{ кВт}$	8.05	17.6	27.98	36.12
$g_e, \text{ г/кВт ч}$	263.16	268.67	252.25	303.2
$G_T, \text{ кг/ч}$	2.12	4.73	7.06	10.95
	ДТ+20% этанола			
	900 $\text{мин}^{-1}$	2000 $\text{мин}^{-1}$	3000 $\text{мин}^{-1}$	4800 $\text{мин}^{-1}$
$M_e, \text{ Нм}$	84.57	83.17	84.86	70.77
$N_e, \text{ кВт}$	7.97	17.42	26.66	35.57
$g_e, \text{ г/кВт ч}$	282.97	288.9	281.82	327.72
$G_T, \text{ кг/ч}$	2.26	5.03	7.51	11.66

Можно наблюдать незначительное снижение эффективной мощности, которое связано, прежде всего, с более низкой теплотворной способностью этилового спирта. Также немного увеличился эффективный расход топлива, что тоже связано с более низкой теплотворной способностью этанола.

Крутящий момент максимален на 3000 об/мин в обоих случаях.

Внешняя скоростная характеристика представляет собой графическое представление зависимости скорости вращения коленчатого вала двигателя от внешней нагрузки при работе на дизельном топливе. Эта характеристика позволяет определить максимальную мощность и крутящий момент, которые может развивать двигатель при заданной внешней нагрузке.



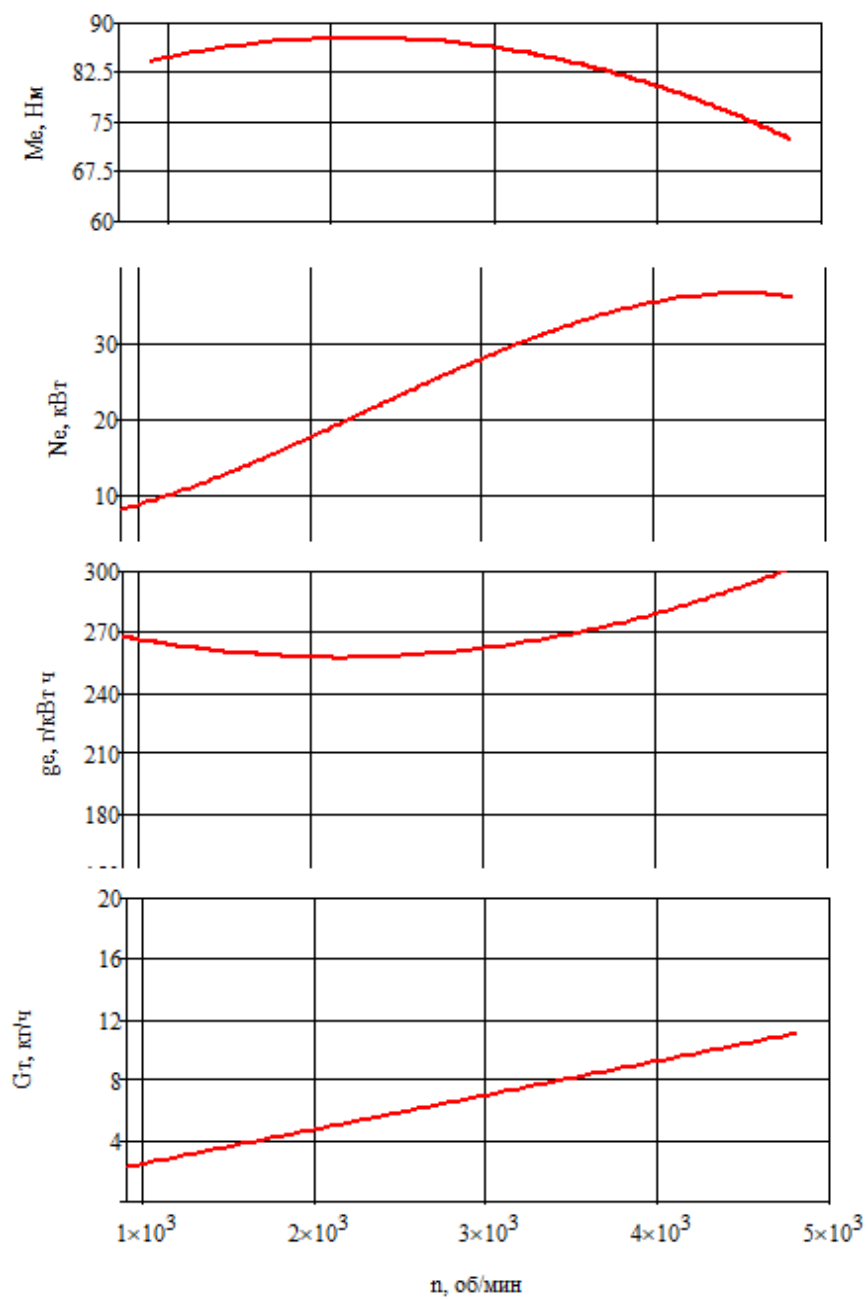


Рисунок 21 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с принудительным воспламенением при работе на дизельном топливе

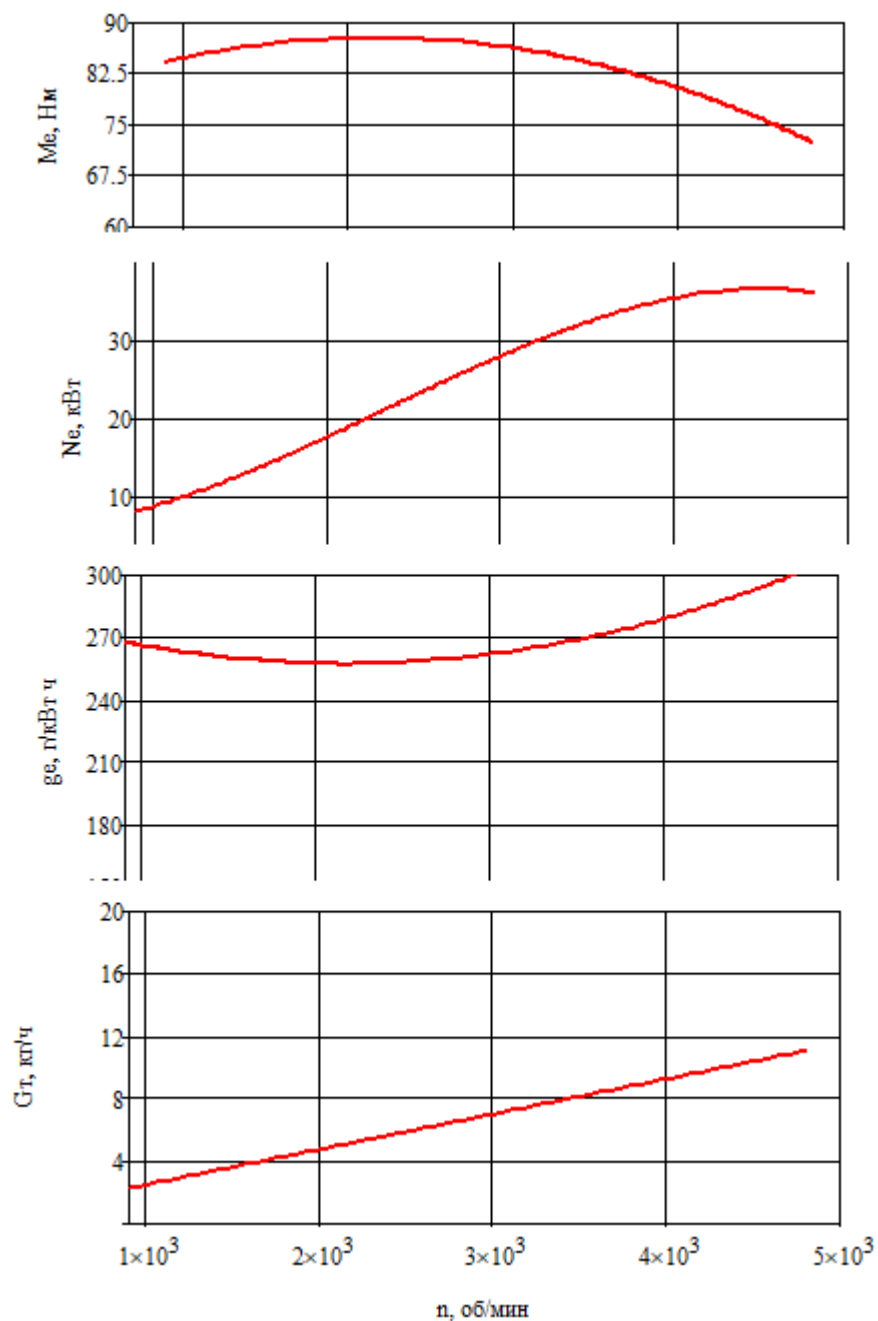


Рисунок 22 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с принудительным воспламенением при работе на дизельном топливе с двадцатипроцентной добавкой этанола

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были выполнены такие расчеты как: тепловой, кинематический и динамический. Они показали изменения рабочего процесса двигателя при работе на дизельном топливе с добавкой спирта и изменения нагрузок на детали двигателя. Также проведен информационный поиск по поставленной проблеме. Основной целью работы была оценка влияния добавления спирта в дизель на характеристики двигателя.

Основные выводы:

Из анализа литературы следует, что применение нового вида топлива с добавкой этанола в дизельных двигателях позволяет решить проблемы, связанные с высокой токсичностью отработавших газов (наличие в молекуле этанола атома кислорода улучшило окисление отработавших газов, что привело к снижению концентрации токсичных веществ, в частности СО и СН). Кроме того, использование данного метода существенно экономит традиционное нефтяное топливо.

Эффективный расход топлива при работе двигателя на дизельном топливе и этиловом спирте при  $n=4800 \text{ мин}^{-1}$  увеличился примерно на 8%.

Эффективный крутящий момент при  $n=4800 \text{ мин}^{-1}$  снизился незначительно, на 1,5%.

Эффективный коэффициент полезного действия при работе двигателя на дизельном топливе и этиловом спирте при  $n=4800 \text{ мин}^{-1}$  не изменился.

Данные результаты могут быть полезными для производителей автомобилей, которые стремятся улучшить экологические характеристики своих автомобилей. Внедрение данной технологии может помочь снизить выбросы вредных веществ в атмосферу и уменьшить негативное воздействие автомобилей на окружающую среду.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Сиппель И.Я., Магдин К.А. «Влияние добавок этанола на свойства автомобильных дизельных топлив» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://research-journal.org/archive/1-103-2021-january/vliyanie-dobavok-etanola-na-svoystva-avtomobilnyx-dizelnyx-topliv?ysclid=lj4cqimuhj987730854> (дата обращения 15.05.23)
- 2 Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей [Текст]/ Колчин, А.И. Демидов В.П. // Учебное пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Высшая школа 1980. - с.496.
- 3 Работа дизеля на дизельном топливе с добавкой этанола [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/rabota-dizelya-na-dizelnom-toplive-s-dobavkoj-etanola?ysclid=lj4d78qyzt277459473> (дата обращения 01.05.23)
- 4 Bannikov M., Syed Ethisham Gillani, Vasilev I. «Effect of alcohol additives on diesel engine performance and emissions» [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/280572402\\_EFFECT\\_OF\\_ALCOHOL\\_ADDITIVES\\_ON\\_DIESEL\\_ENGINE\\_PERFORMANCE\\_AND\\_EMISSIONS](https://www.researchgate.net/publication/280572402_EFFECT_OF_ALCOHOL_ADDITIVES_ON_DIESEL_ENGINE_PERFORMANCE_AND_EMISSIONS) (дата обращения 01.05.23)
- 5 Ekarong Sukjit «Synergistic effects of alcohol-based renewable fuels: fuel properties and emissions» [Электронный ресурс] – Режим доступа: Synergistic effects of alcohol-based renewable fuels: fuel properties and emissions (bham.ac.uk) (дата обращения 15.05.23)
- 6 Alcohol and cotton oil as alternative fuels for internal combustion engines [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.fao.org/3/t4470e/t4470e08.htm> (дата обращения 15.05.23)
- 7 Alcohol-To-Fuel [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://biorrefineria.blogspot.com/2018/07/alcohol-to-fuel-jet-ATJ-etanol-isobutanol.html> (дата обращения 01.05.23)

8 А.Н. Карташевич , С.А. Плотников , М.В. Смольников , П.И. Бажан , А.А. Миронов «Оптимизация системы топливоподачи тракторного дизеля для работы на топливах с добавками этанола» [Электронный ресурс] – Режим доступа:

<https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2019/01/186-193.pdf?ysclid=lj5охар6nd610162413> (дата обращения 01.06.23)

9 Ховах, М.С. Автомобильные двигатели – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] /Под редакцией М.С. Ховаха// М.: Машиностроение, 1977. - с.636.

10 Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] /С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова//. –3-е издание, перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1985. - с.456.

11 Дьяченко В.Г. Теория двигателей внутреннего сгорания. Учебник для студентов высших учебных заведений [Текст] / В.Г. Дьяченко// Харьков: ХНАДУ, 2009 - с.500

12 Петрученко А.Н. Динамический расчет двигателей внутреннего сгорания. Пособие для студентов специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] / А. Н. Петрученко//. – Минск : БНТУ, 2017. – 30 с.

13 «Применение спиртов в бензиновых двигателях и дизелях» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/2392227/primenenie-spirovov-v-benzinovyh-dvigatelyah-i-dizelyah?ysclid=lj5q0ag2lz743980492> (дата обращения 01.06.23)

14 Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] /С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова//. –3-е издание, перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1985. - с.456.

- 15 Применение спирта в дизелях [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://studwood.net/1625125/tehnika/primenenie\\_spirta\\_dizelyah?ysclid=lj5qii2rw2296832653](https://studwood.net/1625125/tehnika/primenenie_spirta_dizelyah?ysclid=lj5qii2rw2296832653) (дата обращения 05.06.23)
- 16 Спирты в качестве топлива [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://extxe.com/11836/spirty-v-kachestve-topliva/?ysclid=lj5qounaoh820926355> (дата обращения 05.06.23)
- 17 Лянденбургский В.В. Применение электрои гидроприводов на автомобильном транспорте: монография [Текст] / В.В. Лянденбургский. – Пенза: ПГУАС 2013. - 288 с.
- 18 Спиртовые и оксигенатные топлива [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://poznayka.org/s66108t2.html?ysclid=lj5tv5v8i682384023> (дата обращения 05.06.23)
- 19 Robert L. McCormick, Richard Parish «Advanced petroleum based fuels program and renewable diesel program» [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://afdc.energy.gov/files/pdfs/barriers\\_ediesel.pdf](https://afdc.energy.gov/files/pdfs/barriers_ediesel.pdf) (дата обращения 05.06.23)
- 20 Спирты, их производство и свойства [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://revolution.allbest.ru/transport/00636275\\_0.html?ysclid=lj5uxm6h9c550469](https://revolution.allbest.ru/transport/00636275_0.html?ysclid=lj5uxm6h9c550469)
- 201 (дата обращения 05.06.23)
- 21 Марков В.А., Вальехо Мальдонадо П.Р., Бирюков В.В. Спиртовые топлива для дизельных двигателей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – М. : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 11(668)/2015. – с. 39-51.
- 22 Raynolds M.A., Checkel M.D., Fraser R.A. A Case Study for Life Cycle Assessment (LCA) as an Energy Decision Making Tool: The Production on Fuel Ethanol from Various Feedstocks. SAE Technical Paper Series, 1998, № 982205, pp. 1-17.
- 23 Mikulski M., Wierzbicki S., Ambrosewicz-Walacik M., Duda K. and Piętak A. (2016) Combustion of Gaseous Alternative Fuels in Compression Ignition Engines.

Alternative Fuels, Technical and Environmental Conditions (Biernat K. (Ed.)), Poland, pp. 78-81. doi: 10.5772/60628

24 Matuszewska A. (2016) Microorganisms as Direct and Indirect Sources of Alternative Fuels. Alternative Fuels, Technical and Environmental Conditions (Biernat K. (Ed.)), Poland, pp.141-146. doi: 10.5772/62397

25 Thomson R. V., Katsoulakos P. S. The application of emulsified fuels in diesel engine designs: experimental results and theoretical predictions // Trans. Inst. Mar. Eng. – 1985. V.97. – p. 10.

26 Akhilendra Pratap Singh, Nikhil Sharma, Ramesh Agarwal, Avinash Kumar Agarwal. Material Compatibility Aspects and Development of Methanol-Fueled Engines // Advanced Combustion Techniques and Engine Technologies for the Automotive Sector [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-0368-9\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-0368-9_3). – С. – 37-51. (дата обращения 05.06.23)

27 Загребин В.В. «Создание новых этанолсодержащих топлив для дизелей» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://scienceforum.ru/2013/article/2013005457> (дата обращения 05.06.23)

28 Лютко В. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания : научное издание / В. Лютко, В.Н. Луканин, А.С. Хачиян. – М.: МАДИ, 2000. – 2 т. – 311 с.

29 Thomson R. V., Thorp J., Armstrong G., Katsoulakos P. The burning of emulsified fuels in diesel engines // Trans. Inst. Mar. Eng. – 1981. V.93. – pp. 19-25.