

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 Адаптация рабочего процесса двигателей типа ВАЗ при работе на низкоуглеродном топливе

Студент

Н.С. Горшков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, Д.А. Павлов

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

Тольятти 2022

## АННОТАЦИЯ

Снижение выбросов углекислого газа в атмосферу является на сегодняшний день важной задачей, связанной с жизненной необходимостью снизить темпы роста температуры на планете. На сегодняшний день наиболее перспективным низкоуглеродным топливом является смесь природного газа и водорода, а оценка влияния такого топлива на рабочий процесс двигателя является значимой и актуальной задачей. Поэтому в бакалаврской работе представлена адаптация рабочего процесса двигателей типа ВАЗ при работе на низкоуглеродном топливе за счет повышения степени сжатия, что позволило эффективно использовать высокую детонационную стойкость газа для повышения эффективности работы двигателя.

Целью бакалаврской работы является анализ эффективности применения низкоуглеродного газового топлива в двигателе ВАЗ.

Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки и графической части. Пояснительная записка состоит из следующих разделов:

- Пояснительная записка состоит из аннотации, введения, 4 разделов, заключения с основными результатами и выводами, содержит 25 рисунков, 18 таблиц, списка использованных источников (37 источников). Основной текст изложен на 63 страницах.
- Графическая часть работы содержит 8 листов формата А1 иллюстрирующих материал, представленный в пояснительной записке.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Обзор актуальности выбранной проблемы и средств ее решения .....	6
1.1 Применение природного газа в автомобильных двигателях .....	6
1.2 Использование водорода в двигателях внутреннего сгорания .....	18
2 Тепловой расчет проектируемого двигателя .....	24
3 Кинематический и динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя .....	42
3.1 Кинематический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя.....	42
3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя	44
4 Анализ термодинамических и эффективных показателей адаптированного двигателя на работу на низкоуглеродном топливе .....	51
4.1 Анализ термодинамических показателей адаптированного двигателя на работу на низкоуглеродном топливе .....	51
4.2 Анализ эффективных показателей адаптированного двигателя на работу на низкоуглеродном топливе .....	54
Заключение .....	57
Список используемых источников.....	60

## ВВЕДЕНИЕ

Ископаемое топливо обеспечивает более 80% энергии для общего потребления и более 95% энергии для транспортного сектора во всем мире. В то время как мировые запасы ископаемого топлива сокращаются, мировой спрос на энергию постоянно растет из-за развития современного энергоемкого образа жизни. Для повышения надежности энергоснабжения и сокращения выбросов парниковых газов (ПГ) очень важно изучить альтернативные виды топлива для транспортного сектора [6].

Газообразное топливо кажется потенциальным решением для энергоснабжения автомобильного сектора в ближайшем будущем. Газообразное топливо содержит больше водорода и меньше углерода; следовательно, выбросы парниковых газов и мелких твердых частиц от этих видов топлива ниже. Сжатый природный газ (КПГ)/сжиженный нефтяной газ (СНГ)/сжиженный природный газ (СПГ) не содержит полиароматических углеводородов (ПАУ), переносимых по воздуху токсинов и диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ), а автомобили, работающие на КПГ/СНГ/СПГ, имеют более тихую работу двигателя, меньшую вибрацию и запах, чем обычные дизельные двигатели. Однако более высокая стоимость транспортного средства, меньший запас хода, более тяжелый топливный бак, дорогая сеть распределения и хранения, а также потенциальные рабочие характеристики и эксплуатационные проблемы по сравнению с жидким топливом являются одними из недостатков использования транспортных средств, работающих на КПГ/СНГ/СПГ [7].

Поскольку биотопливо стало потенциальной альтернативой в транспортном секторе, использование биотоплива не требует значительных изменений в инфраструктуре, а также в существующих транспортных средствах. В транспортных средствах используется множество видов биотоплива, из которых наиболее распространенными являются биодизель и спирты. Производство этого биотоплива в настоящее время основывается на

проверенных технологиях, которые, однако, отличаются высокой стоимостью [8].

Помимо изучения новых альтернативных видов топлива, очень важно также развитие традиционные технологии для улучшения свойств альтернативных, а также традиционных видов нефтяного топлива.

Теперь начнем рассматривать основные виды альтернативных топлив, применяемых в настоящее время в автомобильном транспорте.

Идея заправки двигателей газообразным топливом стара, как история самого поршневого двигателя. Внутреннее смесеобразование исследовалось еще в историческом начале развития двигателей, которое датируется задолго до разработки Н.А. Отто и часто базировалось на атмосферных газовых двигателях. После первых принципиальных попыток Исаака де Риваза в 1807 году итальянцы Барсанти и Маттеуччи уже в 1854 году смогли представить концепцию, предусматривающую прямой впрыск в камеру цилиндра, что, однако, не увенчалось успехом. Только усовершенствованная конструкция двухтактного двигателя Карла Бенца 1884 года, в которой внутреннее смешение использовалось даже с целью расслоения заряда, нашла соответствующее применение и международное признание [9].

# 1 Обзор актуальности выбранной проблемы и средств ее решения

## 1.1 Применение природного газа в автомобильных двигателях

Испытания двигателей с прямым вводом газового топлива в камеру сгорания проводил также Рудольф Дизель в ходе разработки дизельного двигателя. Поскольку газификация жидкого топлива была серьезным препятствием, многочисленные исследования проводились с впрыском светящегося газа (газовой смеси, полученной путем газификации угля с основными компонентами  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2$  и  $CO$ ) непосредственно в камеру сгорания (1894 г.). Это привело к первым попыткам с двумя типами топлива, теперь известным как двухтопливный процесс. Небольшое количество бензина было добавлено к топливу, освещающему газу, в качестве пилотного топлива. Впоследствии был достигнут большой КПД при одновременном впрыске жидкого топлива с воздухом: «Можно с уверенностью предположить, что одновременный впрыск воздуха с потоком газа значительно улучшил бы двигатель и обеспечил бы кривые сгорания, аналогичные кривым сгорания нефти. Но об этом нельзя было думать; потому что использование воздушного насоса в дополнение к бензонасосу придало бы двигателю сложность, которую больше не перевешивали бы тепловые преимущества». Поэтому от дальнейшего развития газового двигателя, основанного на дизельном принципе, отказались [10].

Первый двигатель внутреннего сгорания в мире, построенный в 1860 году Этьеном Ленуаром, работал на легком газе (природный газ и водород), как и первый четырехтактный двигатель, построенный Николаусом Отто в 1876 году. Конструирование бензинового двигателя Карлом Бенцем практически исключило использование газообразного топлива почти на столетие. Интерес к газообразному топливу для двигателей с искровым зажиганием вернулся в прошлом веке, в 1970-х годах, во времена энергетического кризиса, и этот интерес сохраняется до сих пор.

Газообразное топливо относится к группе наиболее важных альтернативных видов топлива для двигателей с искровым зажиганием (рисунок 1), тогда как для дизельных двигателей им почти не уделяется должного внимания. Из всех газообразных видов топлива наиболее часто используются газообразные углеводороды, такие как: метан (природный газ) и СУГ (сжиженный углеводородный газ) называемый иначе как СНГ (сжиженный нефтяной газ) [11].

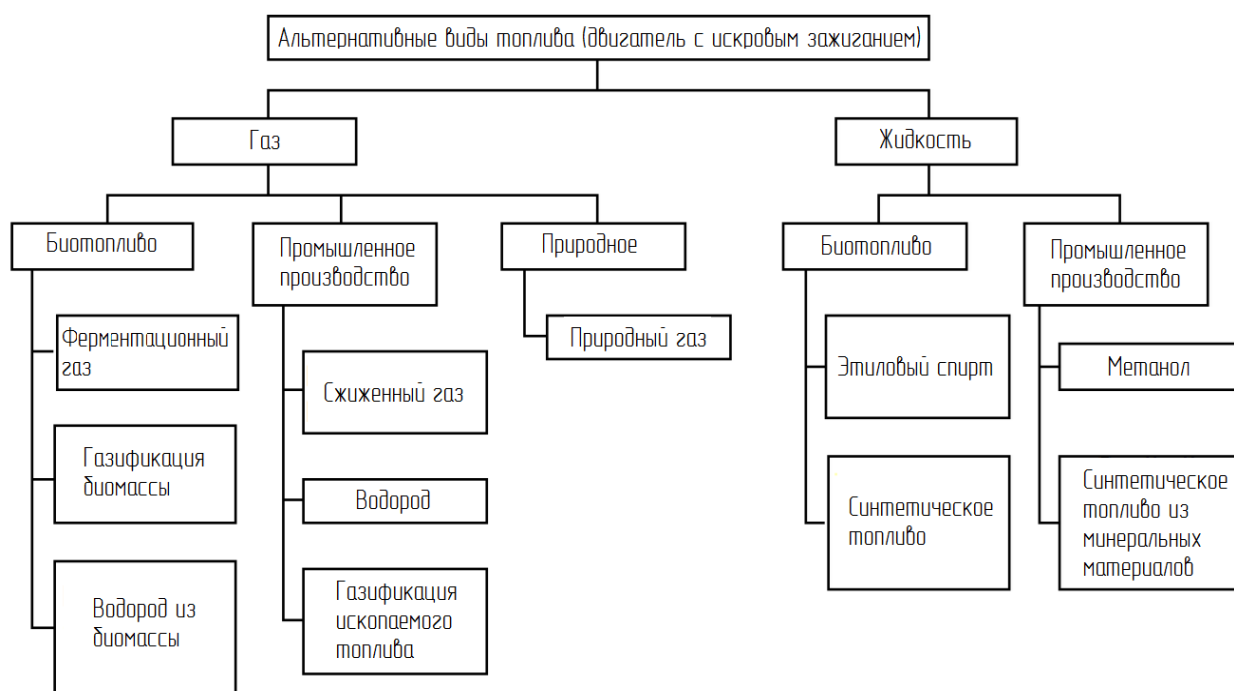


Рисунок 1 – Газообразное топливо по сравнению с другими альтернативными видами топлива для двигателей с искровым зажиганием

Топливо, используемое для двигателей внутреннего сгорания, должно обладать особыми свойствами. То же самое и с газообразным топливом. Наиболее широко используемые газовые моторные топлива – углеводородные топлива (СНГ (сжиженный нефтяной газ), природный газ) – благодаря своим свойствам (таблица 1) подходят для применения в двигателях с искровым зажиганием. СУГ получается, как продукт переработки сырой нефти. Природный газ является самостоятельным минеральным топливом, но часто встречается вместе с сырой нефтью. Основной компонент природного газа – метан. Он также содержит другие

легкие углеводороды в меньших количествах, особенно этан, пропан, бутан, пентан и гексан, а также азот и гелий [12].

Таблица 1 – Свойства газообразного топлива по сравнению с другими видами топлива для двигателей с искровым зажиганием

Топливо	Плотность в обычных условиях [кг/м <sup>3</sup> ]	Теплотворная способность топлива [МДж/кг]	Температура кипения [°С]	Потребность в воздухе [кг/кг]	Границы воспламеняемости по составу смеси	Октановое число MON (RON)
Метан	0,72	50	-161	17,2	0,7 - 2,1	110 (140)
СНГ. Пропан-бутан 50%/50%	2.35	46	-30	15,5	0,4 - 1,7	95 (100)
Природный газ*	0,74	48	-161	17,0	0,7 - 2,1	100–110
Генераторный газ*	1,02	5,5	- 253 - -192	1,20	-	105
Ферментационный газ* (биогаз)	1,20	20	-	6,6	0,7 - 2,3	110
Водород	0,089	120	-253	34	0,5 - 10,5	70
Бензин 95	720–775	42,6	40 - 210	14,7	0,4 - 1,4	85 (95)
Метанол	797	19,9	64,4	6,5	0,3 - 2,0	95 (115)
Спирт этиловый	793	26,7	78,3	9,0	0,3 - 2,1	94 (111)

\* Приведены типовые значения; состав газа и его параметры могут широко варьироваться.

Среди основных характеристик углеводородного топлива следует выделить следующие [13]:

- Высокое октановое число.
- Углеводородное топливо легко смешивается с воздухом, что делает смесь однородной, а ее состав в микро- и макроуровне одинаков.
- Горение обычно бездымное.
- Углеводородное топливо генерирует меньшую массу выхлопных газов по сравнению с жидким топливом.
- Газовоздушные смеси имеют широкий диапазон воспламенения, что позволяет сжигать более бедные смеси.
- Газы имеют высокие температуры воспламенения и при использовании в дизельных двигателях требуют принудительного зажигания.



В современных газовых двигателях впрыск во впускной коллектор представляет собой современный уровень техники. В двигателях легковых и грузовых автомобилей впрыск газа происходит во впускной системе либо индивидуально для каждого цилиндра в соответствующем впускном канале, либо централизованно перед коллектор воздуха. В случае больших стационарных двигателей смесь обычно формируется централизованно через газовые смесители по принципу Вентури или также выборочно по цилиндрам через клапаны впрыска во впускных каналах [14].

В обычной газовой системе газ хранится в газообразной форме под давлением около 200 атм. в нескольких баллонах высокого давления. Давление газа снижается примерно до 5 – 8 атм. с помощью запорных клапанов и регуляторов давления, в зависимости от конструкции системы, и подается на клапаны впрыска. Дроссельный клапан регулирует массу свежего воздуха, проходящего через впускной коллектор, в который впрыскивается природный газ. В случае газовых двигателей грузовых автомобилей из-за отсутствия клапанов впрыска с достаточным потоком через форсунки несколько форсунок часто объединяются в один узел с газовым смесителем для получения центральной газовой смеси. Центральное смешение газов также может происходить с помощью всего одного газового клапана впрыска и одного газового смесителя.

К преимуществам центральной газовой смеси относится очень хорошая гомогенизация смеси, которая обычно происходит в смесителе Вентури в сочетании с длинной секцией смешивания до впускного клапана. Еще одно преимущество состоит в том, что его можно легко интегрировать в существующую концепцию двигателя, в которой впускной коллектор можно заменить базовым двигателем. Недостатками центральной газовой смеси являются колебания топливно-воздушной смеси во время переходных фаз, так как во впускном коллекторе накапливается большое количество смеси. Кроме того, невозможно дозирование топлива в отдельных цилиндрах, а

специфические неисправности цилиндров в отношении бортовой диагностики трудно диагностировать [15].

Преимущества впрыска во впускной коллектор или в канал с одним (или двумя) впрыскивающими клапанами на цилиндр включают в себя резко улучшенное качество образования смеси во время переходных фаз, возможное регулирование количества для конкретного цилиндра и отключение газа в фазах выбега. Гомогенизацию смеси сложнее оптимизировать из-за очень короткого расстояния и времени перемешивания. Время впрыска ограничено объемом впускного коллектора и перекрестными помехами цилиндров, поэтому расход клапанов впрыска должен точно согласовываться с выходной мощностью двигателя [16].

В случае водородных двигателей с впрыском во впускной коллектор эффект вытеснения воздуха даже более выражен, чем в случае с природным газом, из-за очень низкой плотности. Это приводит к значительным потерям производительности, особенно в двигателях без наддува, по сравнению с бензиновыми двигателями на той же основе [17].

Системы для прямого ввода газообразного топлива в камеру сгорания еще не зарекомендовали себя из-за более сложной технологии впрыска (клапаны впрыска и, возможно, компрессоры высокого давления) и требований к герметичности, сроку службы, разбросу количества, обеспечению давления и т.д. В случае прямого впрыска можно провести грубое различие между системами высокого и низкого давления, при этом процессы низкого давления обычно работают с давлением до 20 атм., в зависимости от требований к нагрузке впрыск может происходить либо после закрытия впускного патрубка (особенно низкие точки нагрузки) или намного раньше (более высокие точки нагрузки). Затем системы высокого давления начинаются с 40 – 50 атм. и допускают гораздо более поздние окна впрыска и, прежде всего, гораздо более выраженное расслоение заряда. В таких системах впрыск происходит почти исключительно после закрытия впускных

клапанов, что означает, что можно надежно предотвратить вытеснение и перетекание свежего воздуха в выпускное отверстие [18].

В качестве топлива для бензиновых двигателей метан обладает особой стойкостью к детонации. Не существует жидкого топлива, которое имеет такую же высокую стойкость к детонации, как метан. В этом контексте детонационная стойкость газообразного топлива оценивается с помощью метанового числа. Подобно октановому числу бензина, процентное содержание смеси метан/водород в испытательном двигателе при определенных граничных условиях с такой же детонационной стойкостью, что и у оцениваемого топлива, определяет метановое число. Чтобы учесть это свойство, желательно проектировать двигатель с более высокой степенью сжатия, чем в бензиновом режиме. Кроме того, имеет смысл увеличить допустимое пиковое давление в цилиндре, чтобы иметь возможность устанавливать наиболее эффективные фокусные точки сгорания на больших участках рабочей карты двигателя. Из-за высокой температуры самовоспламенения метана это топливо особенно подходит для процессов сгорания с искровым зажиганием.

Среди углеводородов у метана самое низкое отношение C/H ( $C/H = 1/4$ ). Основываясь только на этом химическом составе, при использовании того же количества энергии выделяется примерно на 25% меньше  $CO_2$ , чем при сжигании бензина или дизельного топлива [19].

Широкие пределы воспламенения для бедных смесей делают этот вид топлива предназначенным для расслоенных и бедных смесей. Однако в настоящее время они все еще находятся на стадии исследования.

Для двигателя с непосредственным впрыском природного газа очень важна объемная теплотворная способность смеси, в которой примерно на 11% больше, чем для жидкого топлива, что приводит к росту крутящего момента двигателя, эквивалентно впрыску бензина во впускной коллектор. Небольшое улучшение крутящего момента или теплотворной способности смеси примерно на 3% связано с прямым впрыском бензина [20].

Для практического использования природного газа в качестве моторного топлива необходимо учитывать различное качество природного газа. Это определяет минимальное метановое число 70 и минимальное содержание метана 80% для топлива, но делается различие между уровнями качества H (High) и L (Low), минимальная теплотворная способность которых отличается более чем на 10%. Эти широкие ограничения необходимо учитывать при проектировании двигателя для работы на природном газе. Примеси из-за одоризации серосодержащими веществами по соображениям безопасности, а также попадание компрессорного масла на заправочную станцию или силоксанов из производства биогаза в настоящее время все еще остаются проблемами, которые приводят к дальнейшим требованиям в отношении будущих стандартов природного газа. В частности, с учетом того факта, что природный газ на заправочной станции и природный газ из общественной сети для них должны быть определены единые предельные значения по составу и свойствам [21].

Для транспортных средств, работающих на природном газе, особенно для автомобилей большой грузоподъемности, данных по выбросам выхлопных газов гораздо меньше. Частично это связано с довольно низкой популярностью тяжелых транспортных средств, работающих на природном газе, но также с гораздо более высокими затратами и большей сложностью испытаний на выбросы выхлопных газов в этой группе транспортных средств. В целом, мы можем констатировать, что большегрузные автомобили, работающие на природном газе, представляют собой преимущественно однотопливные агрегаты, основываясь на стратегии либо стехиометрической, либо бедной смеси.

Двигатели, питаемые стехиометрической смесью ( $\lambda = 1$ ), оснащены трехкомпонентными катализаторами (TWC). По сравнению с обычными двигателями для большегрузных автомобилей, они характеризуются гораздо меньшими выбросами  $\text{NO}_x$  и PM, но также более высоким потреблением энергии на 15-20% (в условиях теста ESC). Скорость преобразования CO, HC

и  $\text{NO}_x$  зависит от способности поддерживать  $\lambda = 1$ . Из-за высокой температуры выхлопных газов может произойти преждевременный процесс деактивации каталитического нейтрализатора и датчика кислорода, что приведет к увеличению выброса выхлопных газов [22].

Двигатели, работающие на однородных бедных смесях, работают с коэффициентом избытка воздуха в диапазоне от  $\lambda = 1,6$  (полная нагрузка) до  $\lambda = 1,2$  (холостой ход), т.е. в диапазоне, обеспечивающем низкие выбросы  $\text{CO}$  и  $\text{NO}_x$ . Удаление  $\text{CO}$  и  $\text{HC}$  осуществляется с помощью дожигающих конвертеров, которые, однако, имеют низкую степень конверсии метана. По этой причине выбросы  $\text{HC}$  из газовых двигателей остаются на уровне, аналогичном дизельным двигателям, в то время как выбросы выхлопных компонентов, работающих на выхлопе, намного ниже. Расход газа ниже, чем в ранее описанном стехиометрическом сценарии [23].

Учитывая наличие значительных объемов природного газа в мире, высокий уровень эксплуатационной безопасности и низкие выбросы, КПП занимает наибольшую долю в трех упомянутых альтернативных видах топлива. Подача КПП осуществляется из газовых баллонов, в которых газ сжимается до давления приблизительно 20 – 25 МПа. Наиболее часто модифицируются двигатели с искровым зажиганием и дизельные двигатели, включая их (одно- или двух-) топливные системы. Двухтопливные системы чаще всего используются в легковых автомобилях. Автобусы и другие транспортные средства обычно оснащены одинарными системами на газовом топливе. В настоящее время все большее число автопроизводителей включают в свой портфель серийно выпускаемые автомобили, работающие на КПП. Природный газ в основном используется в качестве топлива для автобусов при перевозках пассажиров на короткие расстояния. В основном это связано с экономическими факторами. Стоимость КПП в транспорте намного ниже, чем у дизельного топлива. В основном это связано с отсутствием достаточно развитых автозаправочных станций. Это одна из важнейших проблем, препятствующих быстрому развитию транспортных

средств, работающих на сжатом природном газе, для перевозки грузов и пассажиров [24].

В настоящее время большинство производителей легковых автомобилей и автобусов имеют в своем портфеле автомобили, работающие на КПГ. Продолжаются работы по совершенствованию конструкций этих автомобилей и их двигателей. Одна из самых серьезных проблем – установка в автомобиль больших баллонов для КПГ. Несмотря на то, что резервуары должны работать под высоким давлением, они также должны быть большого объема. Для более крупных транспортных средств (автобусов, легких грузовиков, грузовиков большой грузоподъемности) обычно достаточно места для размещения цистерн, но для легких транспортных средств это остается серьезной проблемой. Установка баков не должна ставить под угрозу безопасность транспортного средства и его функциональность. Примеры конструкций автомобилей с видимыми резервуарами для КПГ показаны на рисунке 2 [25].



Рисунок 2 – Примеры автомобилей, работающих на КПГ

На рисунках 3, 4 и 5 показана система и оборудование расположения газового баллона на автомобилях LADA Vesta CNG, LADA Largus CNG (универсал, фургон). Со стороны багажника баллон закрыт декоративной пластиковой панелью. Газовый баллон расположен в багажном отсеке за

спинкой сидений задних пассажирских мест или в передней части грузового отсека.

Газовый баллон установлен на специальную стальную раму-каркас. Доступ к баллону и вентилю управления подачей метана обеспечивается при откидывании спинок задних пассажирских сидений или при снятии декоративной пластиковой панели [26].



Рисунок 3 – Компоновка оборудования LADA Vesta CNG

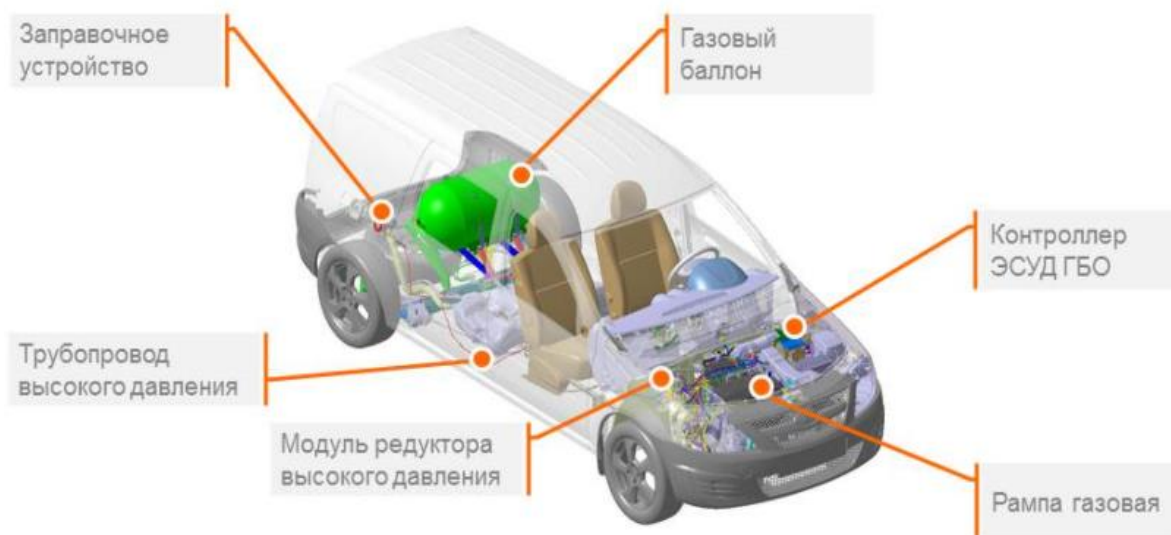


Рисунок 4 – Компоновка оборудования LADA Largus CNG универсал

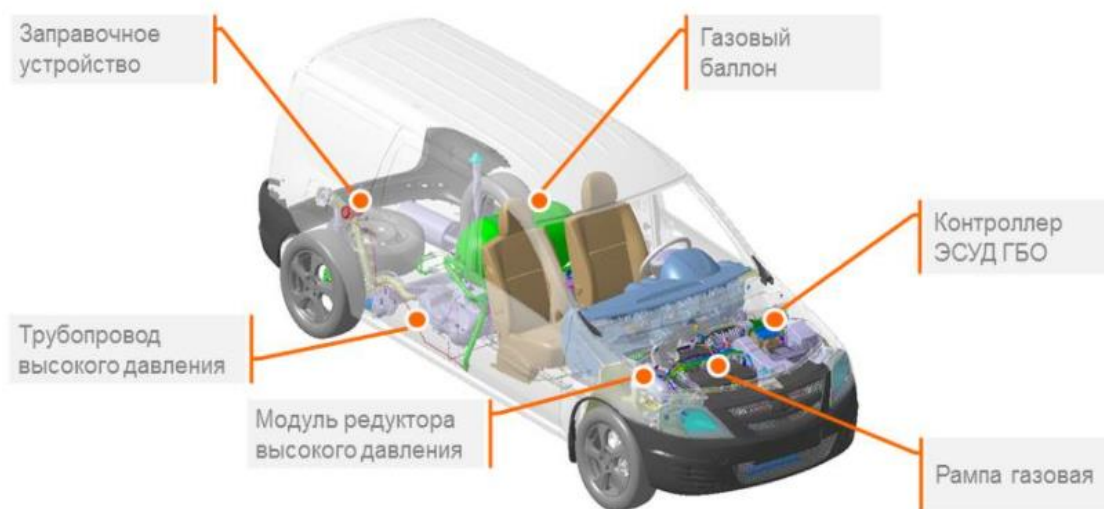


Рисунок 5 – Компоновка оборудования LADA Largus CNG фургон

Еще одним фактором, влияющим на обычное использование КПГ в качестве топлива, является возможность быстрой дозаправки. Можно выделить два типа заправки: быстрая (автомобиль заправляется за 3 – 7 минут) и медленная (обычно длится до нескольких минут для легкового автомобиля). Для быстрой заправки природного газа в бензобак без высокоэффективного компрессора применяется каскадное хранение. Каскадное хранилище представляет собой трехsegmentную систему (низкого, среднего и высокого давления). В систему входит 10 – 50 резервуаров емкостью 80 – 150 дм<sup>3</sup> каждый для каждого сегмента. Между заправками компрессор нагнетает каскадную систему (до давления 25 – 30 МПа), а в процессе заправки газ подается из каскадного хранилища, и компрессор поддерживает только необходимое давление. Системы медленной заправки не требуют каскадного хранения. Газ подается непосредственно в резервуары с давлением, немного превышающим номинальное. Цистерны, установленные в автомобилях, заполняются в течение 6 – 8 часов, что является гораздо более дешевым решением для автопарков или частных пользователей [27].

Газообразные виды топлива, такие как водород или природный газ, принципиально отличаются от видов топлива, которые сегодня в основном используются для работы двигателей внутреннего сгорания. Газообразное



агрегатное состояние при температуре окружающей среды по сравнению с бензином и дизелем является наиболее заметной, но далеко не самой серьезной разницей.

В таблице 2 показаны свойства водорода и метана (природный газ), а также пропана и бутана, которые подходят для использования в двигателях внутреннего сгорания по сравнению с обычным жидким топливом (бензин, дизельное топливо). Это сравнение свойств топлива уже дает представление о значительно отличающихся требованиях к процессу сжигания газа по сравнению с обычными приложениями [28].

Таблица 2 – Свойства материалов водорода, метана, пропана и бутана по сравнению с бензином и дизельным топливом

Характеристика	Ед.изм.	Бензин	Дизель	Водород	Метан	Пропан	Бутан	
Плотность (жидкость) при	кг/м <sup>3</sup>	745 - 760	830 - 845	70,8	423	581	601	
	°С	15	15	-253	-162	-42,1	-0,5	
Плотность (газообразная)	кг/м <sup>3</sup>	—	—	0,090	0,717	2,010	2,705	
молярная масса	кг/кмоль	98 - 120	180 - 220	2,016	16,043	44,10	58,12	
точка кипения или диапазон	°С	30-190	210 - 355	-252,8	-161,5	-42,1	-0,56	
Стехиометрический масса воздуха на 1 кг	кг	14,7	14,5	34,3	17,2	15,7	15,5	
спрос на воздух	МДж/кг	42,2	42,6	120	50	46,4	45,7	
Плотность энергии	жидкость	МДж/дм <sup>3</sup>	31,7	35,7	8,5	21	23,6	26,7
	газообразный	МДж/дм <sup>3</sup>	—	—	2,8	11,6	—	—
Теплотворная способность смеси	МДж/м <sup>3</sup>	3,87	3,80	4,52	3,76	3,82	3,81	
Пределы воспламеняемости	% (об/об)	1 - 7,6	0,6 - 5,5	4 - 76	4,5 - 15	2 - 9,5	1,5 - 8,5	
	—	1,4 - 0,4	1,35 - 0,5	10 - 0,13	2,2 - 0,6	2 - 0,4	2,1 - 0,4	
температура самовоспламенения	°С	230 - 450	250	585	595	470	405	
Минимальная энергия воспламенения	МДж	0,24	0,24	0,02	0,29	0,26	—	
Коэффициент диффузии	см <sup>2</sup> /с	0,05	—	0,61	0,16	0,11	—	
Скорость ламинарного пламени	см/с	< 40	< 40	= 230	= 42	= 47	= 45	
нижний индекс Воббе	МДж/м <sup>3</sup>	—	—	40,9	48,1	74,8	85,4	
ROZ	—	98	—	—	130	112	94	
MZ	—	—	—	0	100	35	11	
CZ	—	—	52 - 54	—	—	—	—	
массовая доля С	%(м/м)	84,6	85,6	0	74,9	81,7	82,7	
массовая доля Н	%(м/м)	12,9	13,5	100	25,1	18,3	17,3	
массовая доля О	%(м/м)	2,5	0,9	0	0	0	0	
спец. Выбросы Н <sub>2</sub> Он	г/кВтч	99	102	268	162	127	122	
спец. Выбросы СО <sub>2</sub>	г/кВтч	266	266	0	198	233	239	
Выбросы СО <sub>2</sub> , по бензину	%	100	100	0	75	88	90	

## 1.2 Использование водорода в двигателях внутреннего сгорания

В таблице 3 перечислены некоторые свойства водорода по сравнению с метаном и изооктаном, которые здесь взяты как представляющие природный газ и бензин, соответственно, поскольку легче определить свойства для однокомпонентных топлив. Небольшая и легкая молекула водорода очень подвижна (высокая массовая диффузия) и приводит к очень низкой плотности в атмосферных условиях [29].

Широкий диапазон пределов воспламеняемости с легковоспламеняющимися смесями от бедной, как  $\lambda=10$ , до богатой, как  $\lambda=0,14$  ( $0,1 < \varphi < 7,1$ ), позволяет использовать широкий диапазон выходной мощности двигателя за счет изменения соотношения эквивалентности смеси. Пределы воспламеняемости расширяются с повышением температуры. Нижний предел воспламеняемости увеличивается с увеличением давления, причем верхний предел воспламеняемости имеет довольно сложное поведение с точки зрения зависимости от давления, но имеет меньшее значение для двигателей. На практике предел обедненной смеси  $H_2/ICE$  достигается для более низких отношений эквивалента воздуха к топливу. Нижний предел воспламеняемости в основном определяется классическим методом распространения пламени в трубе. Как упоминалось выше, массовая диффузия водорода высока, и это вызывает разницу в пределе для пламени, распространяющегося вверх или вниз, из-за преимущественной диффузии при наличии плавучести. При восходящем распространении пламени смеси с содержанием водорода 4% в воздухе все еще воспламеняются, но не обладают когерентностью и сгорают не полностью. Значение 4% относится к одной конкретной экспериментальной конфигурации, поэтому в реальных ситуациях предел вполне может быть ниже 4% (или выше, в зависимости от условий). Таким образом, абсолютный предел не известен даже сегодня. Однако этот предел важен для безопасности, но в меньшей степени для сгорания двигателя [30].

Таблица 3 – Свойства водорода, метана и изооктана при 300 К и 1 атм

Свойство	Водород	Метан	Изооктан
Молекулярный вес (г/моль)	2,016	16,043	114,236
Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	0,08	0,65	692
Массовый коэффициент диффузии в воздухе (см <sup>2</sup> /с)	0,61	0,16	0,07
Минимальная энергия зажигания (мДж)	0,02	0,28	0,28
Минимальное расстояние закалки (мм)	0,64	2,03	3,5
Пределы воспламеняемости в воздухе (об.%)	4-75	5-15	1,1-6
Пределы воспламеняемости ( $\lambda$ )	10-0,14	2-0,6	1,51-0,26
Пределы воспламеняемости ( $\phi$ )	0,1-7,1	0,5-1,67	0,66-3,85
Нижняя теплота сгорания (МДж/кг)	120	50	44,3
Высшая теплота сгорания (МДж/кг)	142	55,5	47,8
Стехиометрическое соотношение воздуха и топлива (кг/кг)	34,2	17,1	15,0
Стехиометрическое соотношение воздуха и топлива (кмоль/кмоль)	2,387	9,547	59,666

Минимальная энергия воспламенения водородно-воздушной смеси в атмосферных условиях на порядок ниже, чем для метановоздушной и изооктан-воздушной смесей. Оно составляет всего 0,017 мДж, что получается при концентрациях водорода 22-26% ( $\lambda=1,2-1,5/\phi=0,67-0,83$ ). Минимальная энергия зажигания обычно измеряется с помощью емкостного искрового разряда и, следовательно, зависит от искрового промежутка. Приведенное выше значение рассчитано для зазора 0,5 мм. При зазоре 2 мм минимальная энергия воспламенения составляет около 0,05 мДж и более или менее постоянна для концентраций водорода от 10% до 50% ( $\lambda=0,42-3,77$ ,  $\phi=0,27-2,38$ ), с внезапным увеличением, когда концентрация  $H_2$  ниже 10% [31].

Расстояние гашения может быть экспериментально получено из соотношения между минимальной энергией зажигания и размером искрового промежутка или измерено непосредственно. Оно минимально для смесей, близких к стехиометрии, и уменьшается с увеличением давления и температуры. Как видно из таблицы 3, это примерно одна треть, чем для метана и изооктана. Это влияет на щелевое горение и теплопередачу в стенку.

Наконец, обратите внимание на большую разницу между более низкой и высокой теплотворной способностью водорода по сравнению с метаном и изооктаном, что легко объяснить тем, что  $H_2O$  является единственным продуктом сгорания водорода. Также обратите внимание на большую разницу в стехиометрическом соотношении воздуха и топлива для водорода по сравнению с метаном и изооктаном, а также на большую разницу в стехиометрическом соотношении воздуха и топлива в массовых единицах по сравнению с мольными [32].

В таблице 4 перечислены свойства водородно-воздушных смесей при стехиометрическом и обедненном пределе, упомянутом выше, по сравнению со стехиометрическими метановоздушными и изооктан-воздушными.

Таблица 4 – Свойства газоздушных смесей при 300 К и 1 атм.

Свойство	$H_2$ -воздух, $\lambda = 1$ $\varphi = 1$	$H_2$ -воздух, $\lambda = 4$ $\varphi = 0.25$	$CH_4$ - воздух, $\lambda = 1$ $\varphi = 1$	$C_8H_{18}$ - воздух, $\lambda = 1$ $\varphi = 1$
Объемная доля топлива (%)	29,5	9,5	9,5	1,65
Плотность смеси (кг/м <sup>3</sup> )	0,850	1,068	1,123	1,229
Кинематическая вязкость (мм <sup>2</sup> /с)	21,6	17,4	16	15,2
Температура самовоспламенения (К)	858	>858	813	690
Температура адиабатического пламени (К)	2390	1061	2226	2276
Теплопроводность ( $10^{-2}$ Вт/мК)	4,97	3,17	2,42	2,36
Температуропроводность (мм <sup>2</sup> /с)	42,1	26,8	20,1	18,3
Соотношение удельных плавок	1,401	1,400	1,354	1,389
Скорость звука (м/с)	408,6	364,3	353,9	334,0
Соотношение воздух-топливо (кг/кг)	34,2	136,6	17,1	15,1
Мольное соотношение до/после сгорания	0,86	0,95	1,01	1,07
Скорость ламинарного горения, ~ 360 К (см/с)	290	12	48	45
Гравиметрическая энергия (кДж/кг)	3758	959	3028	3013
Объемное энергосодержание (кДж/м <sup>3</sup> )	3189	1024	3041	3704

Объемная доля топлива в топливно-воздушной смеси может быть непосредственно рассчитана из молярного стехиометрического отношения воздуха к топливу, указанного в таблице 3. Большая объемная доля, занятая водородом, имеет последствия для достижимой удельной мощности двигателя. В сочетании с широкими пределами воспламеняемости он также

оказывает важное влияние на свойства смеси, такие как кинематическая вязкость, теплопроводность и т. д. Эти свойства различаются гораздо больше, чем в двигателях с традиционным топливом. Это влияет, например, на безразмерные числа, используемые при моделировании, такие как числа Рейнольдса, которые могут существенно отличаться от чисел для горения углеводородов. Сравнительно большой разброс плотности смеси и, следовательно, скорости звука влияет на газовую динамику в двигателях с внешним смесеобразованием [33].

Повышенный коэффициент удельной теплоемкости приводит к увеличению объема работы по сжатию. Однако фактическая работа сжатия, особенно при прямом впрыске, сильно зависит от стратегии впрыска. Расчеты показали, что время и продолжительность впрыска являются доминирующими факторами по сравнению с характеристиками топлива, и при использовании оптимизированной стратегии впрыска можно получить повышение эффективности до 4% [34].

Существует некоторая двусмысленность относительно температуры самовоспламенения топлива в целом и водорода в частности. Например, для метана найдены значения от 810 К до 868 К. Для водорода найдены значения от 773 К до 858 К. В некоторых источниках указана температура самовоспламенения водорода ниже, чем у метана; в других источниках указывается обратное. Эта неоднозначность может быть, по крайней мере частично, объяснена чувствительностью температур самовоспламенения к экспериментальной установке, методике эксперимента и критерию, используемому для определения значения.

Для двигателей с искровым зажиганием с распространяющимся фронтом пламени самовоспламенение несгоревшей смеси перед фронтом пламени нежелательно, так как это может привести к детонационному горению. На эффективность двигателя с искровым зажиганием влияют степень сжатия и момент зажигания (среди прочего), выбор которых зависит от температуры самовоспламенения топливно-воздушной смеси, поэтому это

важный параметр. Для жидких углеводородов октановое число чаще используется как мера предрасположенности топливно-воздушной смеси к предпламенным реакциям. Для водорода сообщалось об октановом числе по исследовательскому методу (RON), превышающем 130, и моторном октановом числе (MON), равном 60. Также следует отметить, что для определения «метанового числа» газообразного топлива в качестве эталонного топлива используется водород с нулевым метановым числом, что создает впечатление, что он очень склонен к детонации [35].

Скорость ламинарного горения стехиометрических водородно-воздушных смесей намного выше, чем у метана и изооктана. Однако если используются стратегии сжигания обедненной смеси, скорость горения может быть намного ниже (см. значение для  $\lambda=4/\phi=0,25$ ). Для смесей, близких к стехиометрии, высокая скорость горения и высокая адиабатическая температура пламени указывают на высокие выбросы оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ).

Комбинируя более низкую теплотворную способность (НТС) водорода, его плотность и стехиометрическую потребность в воздухе, можно рассчитать максимальную теоретическую плотность мощности для различных концепций двигателей. В таблице 5 сравнивается теоретическая удельная мощность двигателей, работающих на водороде и метане, с двигателем, работающим на изооктановом топливе, в качестве эталона. Приведены значения как для двигателей с впрыском топлива во впускной канал (PFI), так и для двигателей с прямым впрыском (DI). Обратите внимание на большую разницу для газообразного топлива с (теоретическим) увеличением удельной мощности на 38% для водорода при переключении с PFI на DI [36].

Наконец, следует отметить, что возможность качественного управления нагрузкой (изменение насыщенности смеси при полностью открытой дроссельной заслонке (WOT)), допуск на значительное разбавление смеси (либо из-за избыточного воздуха, либо рециркуляции выхлопных газов

(EGR)), высокая температура самовоспламенения (допускающая высокие степени сжатия) и в целом высокая скорость горения – все это факторы, способствующие потенциально высокому КПД двигателя. Однако тепловые потери от газов цилиндров к стенкам камеры сгорания могут быть выше с водородом по сравнению с обычными видами топлива, что отрицательно сказывается на эффективности [37].

Таблица 5 – Теоретическая удельная мощность двигателей на газе и изооктане.

	Водород	Метан	Изооктан
PFI	86 %	92 %	100 %
DI	119 %	100 %	100 %

#### Выводы по 1-му разделу

Применение низкоуглеродного газового топлива на серийных автомобилях является большой проблемой для автопроизводителей, так как условия эффективного сгорания низкоуглеродного газового топлива и бензина в двигателе с искровым зажиганием значительно отличаются, а именно:

- Октановое число и следовательно допустимая степень сжатия отличаются на несколько единиц, так в среднем степень сжатия бензинового двигателя составляет 11-12, а для двигателя на сжатом природном газе 14-16, что является существенной разницей при организации рабочего процесса.
- Холодный пуск на газовом топливе требует системы подогрева газа.
- В настоящее время использование автомобилей, полностью конвертированных на газ затруднено малым количеством автогазозаправочных станций.
- Природный газ снижает наполняемость цилиндра, что ведет к снижению мощностных показателей работы двигателя.

## 2 Тепловой расчет проектируемого двигателя

Согласно заданию на бакалаврскую работу, требуется провести тепловой расчет для оценки перспектив работы газового автомобильного двигателя. Для этого приводиться сравнение результатов расчета для 2-х видов топлива: бензин Аи-95, газовое топливо, которое мы рассмотрим в виде двух вариантов смесового топлива: первый вариант состоит из 98% природного газа и 2% водорода по массе и второй вариант это 95% природного газа и 5% водорода по массе. Массовый состав исследуемых топлив и его характеристики приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Физико-технические характеристики исследуемых топлив

Характеристика топлива	Бензин	КПГ + 2%Н <sub>2</sub>	КПГ + 5%Н <sub>2</sub>
Октановое число по исследовательскому методу	95	112	115
Молекулярная масса	115	19,62548	19,08654
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	760	0,882533	0,858267
Массовая теплота сгорания, МДж/кг	44	47,10187716	48,81279928
Элементарный состав, % (массы)			
– Углерод	85,5	67,47	65,41
– Водород	14,5	23,62	25,95
– Кислород	0	0,96	0,93
– Азот	0	7,95	7,71

В качестве базового исследуемого двигателя возьмем двигатель ВАЗ-21176, его основные характеристики приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Технические характеристики двигателя ВАЗ-21176

Параметр	Характеристика
Порядок работы цилиндров	1-3-4-2
Диаметр цилиндров, мм	82
Ход поршня, мм	75,6
Длина шатуна, мм	128,2
Рабочий объем, л	1,596
Степень сжатия	11
Номинальная мощность при частоте вращения коленчатого вала 6000 об/мин, кВт (л.с.)	64 кВт (87 л.с.)
Максимальный крутящий момент, Нм	132 (при 3800 мин <sup>-1</sup> )
Минимальная частота вращения коленчатого вала при режиме холостого хода, об/мин	840



Тепловой расчет производится по методике И.И. Вибе, с учетом рекомендаций по расчету основных параметров, предложенных в учебниках [1,2,3,4,5]. Результаты расчета представлены в виде таблиц и графиков. Для адаптированного двигателя возьмем степень сжатия 15 для повышения эффективности использования перспективного низко углеродного топлива

Так как при изменении скоростного режима при работе на внешней скоростной характеристики максимальный коэффициент избытка воздуха ограничен 1 в связи с требованиями к токсичности отработавших газов, то результаты расчета параметров рабочего тела проводятся (таблица 8) для каждого вида топлива, без учета частоты вращения.

Таблица 8 – Результаты расчета параметров рабочего тела

L <sub>0</sub> , кмоль возд/кг топл	I <sub>0</sub> , кг возд/кг топл	M <sub>1</sub> , кмоль гор.см./кг топл.	M <sub>CO2</sub> , кмоль CO <sub>2</sub> /кг топл.	M <sub>H2O</sub> , кмоль H <sub>2</sub> O/кг топл.	M <sub>N2</sub> , кмоль N <sub>2</sub> /кг топл.	M <sub>2</sub> , кмоль пр.сг./кг топл.	μ <sub>0</sub>
Бензин Аи-95							
0,53947	15,612	0,58951	0,057367	0,1103	0,561109	0,728776	1,236237
КПГ+2% Водорода							
0,55276	15,997	0,603718591	0,056225	0,1181	0,438492	0,612817	1,015071
КПГ+5% Водорода							
0,57256	16,569	0,62495	0,054508	0,12975	0,453468	0,637727	1,020438

Анализ результатов расчета процесса впуска (таблица 9) показал увеличение удельного объема рабочего тела в конце процесса наполнения при увеличении доли водорода в топливе, что показывает снижение энергоемкости заряда поступившего в цилиндр двигателя при добавке водорода.

Анализ результатов расчета параметров в конце сжатия и начала воспламенения (таблица 10) показал снижение коэффициента молекулярного изменения рабочей смеси при увеличении доли водорода в газовом топливе.

Таблица 9 – Результаты расчета процесса впуска

п, мин <sup>-1</sup>	$\Delta p_a$ , МПа	$p_a$ , МПа	$T_r$ , К	$p_r$ , МПа	$\gamma_r$	$T_a$ , К	$\eta_v$	$V_a$ , м <sup>3</sup> /кг	$\omega_{вп}$ , м/с
Бензин Аи-95									
840	5,46E-05	0,0999454	1040	0,103784	0,033092	330,8318	0,848676	0,9076	5,83573
2000	0,0003	0,0996903	1045	0,105111	0,032844	328,8153	0,870837	0,9044	13,8946
3800	0,0011	0,0988821	1060	0,109316	0,03258	325,9927	0,909368	0,9039	26,3998
5400	0,0023	0,0977425	1085	0,115245	0,033488	324,683	0,920507	0,9108	37,5154
6000	0,002787	0,097213	1098	0,118	0,034063	324,498	0,924874	0,9152	41,6838
КПГ+2% Водорода									
840	5,46E-05	0,0999454	1000	0,103784	0,022438	317,0034	0,968534	0,9746	5,83573
2000	0,0003	0,0996903	1010	0,105111	0,02249	316,0428	0,96895	0,9741	13,8946
3800	0,0008	0,0992072	1020	0,107624	0,022865	315,2637	0,966283	0,9765	22,2314
5400	0,0023	0,0977425	1050	0,115245	0,024114	314,5279	0,95308	0,9888	37,5154
6000	0,002787	0,097213	1055	0,118	0,024716	314,4532	0,947584	0,9939	41,6838
КПГ+5% Водорода									
840	5,46E-05	0,0999454	1000	0,103784	0,023445	317,6758	0,926911	0,9811	5,83573
2000	0,0003	0,0996903	1010	0,105111	0,02324	316,5513	0,937684	0,9801	13,8946
3800	0,0011	0,0988821	1030	0,109316	0,023568	315,35	0,942947	0,9844	26,3998
5400	0,0023	0,0977425	1047	0,115245	0,024183	314,5067	0,95308	0,9932	37,5154
6000	0,002787	0,097213	1060	0,118	0,02487	314,6858	0,937274	0,9992	41,6838

Таблица 10 – Результаты расчета параметров в конце сжатия и начала воспламенения

п, мин <sup>-1</sup>	$\mu$	$n_l$	Угол опережения зажигания, ° ПКВ	$V_y$ , м <sup>3</sup> /кг	$P_y$ , МПа	$T_y$ , К
Бензин Аи-95						
840	1,0507528	1,375361	20	0,114519	1,72275	719,5464
2000	1,050765	1,3756	24	0,127815	1,47077	685,6251
3800	1,050778	1,3758	28	0,143684	1,241725	650,7171
5400	1,05073	1,376	32	0,162951	1,043328	620,0646
6000	1,050705	1,375973	35	0,178761	0,919685	599,6129
КПГ+2% Водорода						
840	1,014741	1,374034	20	0,100265	2,274197	742,0863
2000	1,01474	1,3741	24	0,115371	1,869871	702,0769
3800	1,014734	1,3742	28	0,133314	1,530843	664,1752
5400	1,014716	1,3743	32	0,155255	1,244788	628,9508
6000	1,01470779	1,374295	35	0,172805	1,076237	605,2586
КПГ+5% Водорода						
840	1,0219566	1,373961	16	0,088277	2,733785	781,8674
2000	1,021961	1,3741	20	0,100831	2,26891	741,1965
3800	1,021954	1,3742	25	0,120806	1,766455	691,3742
5400	1,02194	1,3743	27	0,130875	1,583799	671,5482
6000	1,021926055	1,374272	29	0,141311	1,429179	654,3126

Анализ результатов коэффициентов термодинамического расчета (таблица 11) показал снижение коэффициента использования теплоты в связи с увеличением тепловых потерь в стенку цилиндра и систему охлаждения,

связанных с увеличением продолжительности сгорания при работе на газовом топливе, а при добавке водорода повышается интенсивность тепловыделения и тепловые потери снижаются.

Таблица 11 – Коэффициенты термодинамического расчета

$n, \text{мин}^{-1}$	$\xi$	$q_z, \text{Дж/кг}$	$E_z, \text{МПа}$	$\varphi_z, \text{град, пкв.}$	$m$
Бензин Аи-95					
840	0,78	2185,209	52,970022	62	3
2000	0,8	2212,4	53,820033	68	3
3800	0,82	2239,6	54,508573	71	3
5400	0,84	2264,3	54,693657	78	3
6000	0,86	2289,651	55,03805	85	3
КПГ+2% Водорода					
840	0,8	2331,166	71,757748	57	3
2000	0,82	2385,3	73,458034	62	3
3800	0,84	2411,5	74,088303	67	3
5400	0,86	2435,6	73,897042	73	3
6000	0,88	2434,168	73,470972	80	3
КПГ+5% Водорода					
840	0,86	2334,47	71,385452	50	3
2000	0,88	2389,2	73,132676	56	3
3800	0,9	2442,8	74,447142	62	3
5400	0,9	2441,3	73,742174	68	3
6000	0,91	2466,762	74,0657	75	3

Анализ результатов расчета процесса расширения и выпуска (таблица 12) показал, что при переходе на компримированный природный газ происходит снижение температуры конца сгорания и отработавших газов, что приводит к ухудшению условий прогрева трехкомпонентного каталитического нейтрализатора. Добавка водорода повышает температуру сгорания что позволяет лучше использовать энергию отработавших газов. Также следует отметить снижение степени последующего расширения, что показывает на сколько снизилось теплоиспользование при удлинении процесса сгорания при работе без водорода.

Анализ результатов расчета индикаторных показателей рабочего цикла (таблица 13) показал, повышение примерно на 1% мощностных показателей работы двигателя при добавке 2% водорода и увеличение примерно на 3% при добавке 5% водорода в КПГ. И если на низких частотах вращения

показана максимальная эффективность при работе на КПП с добавкой 5% водорода, то с ростом частоты вращения эффективность рабочего процесса на газе увеличивается, и разница в мощности уменьшается.

Таблица 12 – Результаты расчета процесса расширения и выпуска

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$V_z'$ , м <sup>3</sup>	$T_z'$ , К	$P_z'$ , МПа	$\delta$	$n_2$	$P_b$ , МПа	$T_b$ , К	$T_r$ , К	$\Delta$ , %
Бензин Аи-95									
840	0,216	2434,81	3,247773	4,202337	1,192	0,586581	1847,987	1037,45	-0,2453
2000	0,2271	2415,59	3,063696	3,98145	1,193	0,58979	1851	1041,91	-0,2952
3800	0,221	2436,05	3,175275	4,08979	1,192	0,59245	1859	1058,28	-0,1621
5400	0,2412	2406,62	2,874895	3,77679	1,193	0,58921	1863	1081,34	-0,3376
6000	0,2683	2372,04	2,547112	3,4116	1,193	0,58916	1872	1095,17	-0,2578
КПП+2% Водорода									
840	0,181	2419,2938	4,166743	5,383473	1,1946	0,55776	1743,418	995,321	-0,4679
2000	0,1869	2428,58	4,050901	5,2113	1,195	0,56379	1761	1006,25	-0,3711
3800	0,1935	2420,69	3,900818	5,04665	1,195	0,5641	1767	1017,02	-0,2926
5400	0,2087	2398,16	3,583398	4,7387	1,195	0,5585	1771,3	1046,67	-0,3176
6000	0,2367	2332,91	3,073138	4,19936	1,196	0,55236	1761	1052,62	-0,2253
КПП+5% Водорода									
840	0,1649	2462,29	4,709146	5,948468	1,194	0,560251	1742,546	993,346	-0,6654
2000	0,1762	2452,57	4,391379	5,56351	1,194	0,56595	1759	1003,32	-0,6618
3800	0,1828	2458,2	4,240576	5,38347	1,194	0,56861	1774	1024,14	-0,5685
5400	0,2096	2387,5	3,59309	4,73867	1,195	0,55987	1763	1040,87	-0,5856
6000	0,245	2331,52	3,002124	4,07882	1,196	0,55878	1770	1054,07	-0,5596

Таблица 13 – Результаты расчета индикаторных показателей рабочего цикла

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$L_i$ , кДж	$P_i$ , МПа	$N_i$ , кВт	$\eta_i$	$g_i$ , г/кВт*ч
Бензин Аи-95					
840	1,1461933	1,389201	15,52967	0,477263	171,707
2000	1,1552194	1,405132	37,39945	0,470452	174,193
3800	1,1809999	1,43718	72,67966	0,460794	177,8442
5400	1,1793798	1,424391	102,3625	0,451167	181,639
6000	1,1766542	1,414206	112,9229	0,445825	183,8152
КПП+2% Водорода					
840	1,3589002	1,493913	16,70024	0,481807	158,62
2000	1,390839	1,529759	40,71656	0,493156	154,9695
3800	1,4026998	1,539122	65,54524	0,497544	153,6028
5400	1,4043149	1,521695	109,3552	0,498725	153,2391
6000	1,3796266	1,487198	118,7512	0,490246	155,8896
КПП+5% Водорода					
840	1,3843194	1,511819	16,9004	0,508976	144,9082
2000	1,4059802	1,536997	40,90921	0,511508	144,1909
3800	1,4327945	1,559529	78,867	0,51611	142,9053
5400	1,4019513	1,512416	108,6884	0,495197	148,9403
6000	1,3831043	1,483156	118,4285	0,493806	149,36

Анализ результатов расчета эффективных показателей рабочего цикла (таблица 14) показал, что все эффекты, которые мы наблюдали у индикаторных показателей также присутствуют и у эффективных показателей работы двигателя. Так добавка водорода повышает эффективность рабочего процесса, при росте энергетических показателей.

Таблица 14 – Результаты расчета эффективных показателей рабочего цикла

n, мин <sup>-1</sup>	V <sub>п.ср</sub> , м/с	p <sub>м</sub> , Мпа	p <sub>с</sub> , Мпа	η <sub>м</sub>	η <sub>с</sub>	g <sub>с</sub> , г/(кВт.ч)	Ne, кВт	Me, Н.м	Gт, кг/ч
Бензин Аи-95									
840	2,1168	0,114	1,2752	0,91795	0,43811	187,05403	14,2555	162,0598	2,66655
2000	5,04	0,1485	1,2567	0,89434	0,42074	194,77361	33,4477	159,7009	6,51472
3800	9,576	0,202	1,2352	0,85945	0,39603	206,92812	62,4645	156,9715	12,9257
5400	13,608	0,2496	1,1748	0,82479	0,37212	220,22583	84,4271	149,2999	18,593
6000	15,12	0,2674	1,1468	0,81091	0,36152	226,67845	91,57	145,7381	20,7569
КПГ+2% Водорода									
840	2,1168	0,114	1,3799	0,9237	0,44505	171,72147	15,4261	175,367	2,64899
2000	5,04	0,1485	1,3813	0,90294	0,44529	171,62693	36,7648	175,5389	6,30983
3800	9,576	0,202	1,332	0,86832	0,43171	177,02747	67,3591	169,2715	11,9244
5400	13,608	0,2496	1,2721	0,83599	0,42791	183,30269	91,4198	161,6657	16,7575
6000	15,12	0,2674	1,2198	0,82019	0,40209	190,06575	97,3983	155,0142	18,5121
КПГ+5% Водорода									
840	2,1168	0,114	1,3978	0,92461	0,4706	156,72389	15,6263	177,6426	2,44901
2000	5,04	0,1485	1,3885	0,9034	0,4621	159,60893	36,9574	176,4587	5,89874
3800	9,576	0,202	1,3575	0,87048	0,44926	164,16916	68,6518	172,5201	11,2705
5400	13,608	0,2496	1,2628	0,83498	0,41348	178,37529	90,753	160,4865	16,1881
6000	15,12	0,2674	1,2157	0,8197	0,40477	182,21349	97,0756	154,5006	17,6885

Анализ результатов расчета теплового баланса (таблица 15) показал, значительное увеличение доли потерь на теплоотдачу в окружающую среду в газовом варианте. Для работы двигателя на с добавкой водорода, следует отметить повышение потерь с отработавшими газами, вследствие увеличения температуры сгорания.

Таблица 15 – Результаты расчета теплового баланса

n, мин <sup>-1</sup>	Q <sub>0</sub> , Дж/с	Q <sub>с</sub> , Дж/с	q <sub>с</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> , %
Бензин Аи-95									
840	32539	14882	45,736	7475,83	22,975	9940,7531	30,5503	240,2114	0,73823
2000	79497	34979	44	18888,2	23,7597	24464,652	30,7744	1165,314	1,46586
3800	157727	65488	41,52	41903,9	26,5673	49602,459	31,4483	732,7868	0,46459
5400	226884	88869	39,169	54157,6	23,8702	73911,369	32,5767	9946,453	4,38394

Продолжение таблицы 15

6000	253289	96565	38,124	69681,9	27,5108	84006,282	33,1661	3035,884	1,19858
КПГ+2% Водорода									
840	34662	16053	46,313	7475,83	21,568	10294,068	29,6987	2,420575	2,42058
2000	82563	38296	46,384	18888,2	22,8773	24899,196	30,1577	0,581419	0,58142
3800	131738	60217	45,71	26370,4	20,0173	40335,225	30,6179	3,655155	3,65516
5400	219269	95861	43,718	45505	20,753	70176,792	32,0048	3,52369	3,52369
6000	242228	102394	42,272	58487,4	24,1456	78086,88	32,2369	1,345863	1,34586
КПГ+5% Водорода									
840	33205	15626	47,06	7475,83	22,5144	9023,0033	27,1739	1079,607	3,25137
2000	79978	36957	46,21	18888,2	23,6169	22068,863	27,5938	2063,093	2,57959
3800	152810	68652	44,926	35333	23,1221	43454,208	28,4367	5371,454	3,51511
5400	219485	90753	41,348	54157,6	24,6749	63993,639	29,1563	10580,85	4,82076
6000	239828	97076	40,477	69681,9	29,055	71249,268	29,7085	1821,248	0,7594

Приведем основные термодинамические параметры работы двигателя по результатам теплового расчета в таблице 16 и 17 для адаптированного двигателя при работе на газовом топливе (КПГ 98% и водород 2%) и газовом топливе (КПГ 95% и водород 5%), соответственно.

Таблица 16 – Основные термодинамические параметры работы адаптированного двигателя при работе на КПГ 98% и водород 2%

Угол ПКВ, град.	Объем цилиндра	P <sub>i</sub> , частота вращения 840 мин <sup>-1</sup>	P <sub>i</sub> , частота вращения 2000 мин <sup>-1</sup>	P <sub>i</sub> , частота вращения 3800 мин <sup>-1</sup>	P <sub>i</sub> , частота вращения 5400 мин <sup>-1</sup>	P <sub>i</sub> , частота вращения 6000 мин <sup>-1</sup>
230	0,373951	0,120223119	0,119918424	0,119338598	0,117578047	0,116940889
231	0,37178	0,121188596	0,120881546	0,120297119	0,118522489	0,117880207
232	0,369568	0,122186486	0,121877001	0,121287819	0,119498639	0,11885106
233	0,367314	0,123217782	0,122905783	0,122311687	0,12050747	0,119854416
234	0,365019	0,124283523	0,123968926	0,123369754	0,121549997	0,120891286
235	0,362683	0,125384793	0,125067514	0,124463095	0,122627282	0,121962726
236	0,360306	0,126522726	0,126202675	0,125592837	0,123740433	0,123069836
237	0,357888	0,127698504	0,12737559	0,126760152	0,124890607	0,124213768
238	0,355431	0,128913362	0,128587492	0,127966269	0,126079014	0,125395726
239	0,352933	0,130168594	0,129839669	0,12921247	0,127306916	0,126616965
240	0,350395	0,131465547	0,131133468	0,130500094	0,128575635	0,127878798
241	0,347819	0,132805632	0,132470295	0,131830543	0,12988655	0,129182599
242	0,345203	0,134190324	0,133851623	0,133205279	0,131241104	0,130529801
243	0,342548	0,135621166	0,135278988	0,134625835	0,132640805	0,131921907
244	0,339855	0,137099768	0,136754	0,136093812	0,134087232	0,133360483
245	0,337125	0,138627819	0,138278342	0,137610884	0,135582034	0,134847173
246	0,334357	0,140207082	0,139853774	0,139178803	0,137126939	0,136383693
247	0,331552	0,141839406	0,14148214	0,140799405	0,138723754	0,137971841
248	0,328711	0,143526724	0,143165368	0,142474608	0,14037437	0,139613499
249	0,325833	0,145271059	0,144905477	0,144206423	0,142080769	0,141310636
250	0,322921	0,147074534	0,146704585	0,145996956	0,143845025	0,143065316
251	0,319973	0,148939369	0,148564906	0,147848413	0,145669312	0,144879702
252	0,316991	0,150867892	0,150488764	0,149763104	0,147555908	0,146756057

Продолжение таблицы 16

253	0,313975	0,152862544	0,152478592	0,151743454	0,1495072	0,148696758
254	0,310926	0,154925883	0,154536945	0,153792003	0,151525693	0,150704294
255	0,307845	0,157060594	0,156666499	0,155911416	0,153614011	0,152781277
256	0,304732	0,159269491	0,158870064	0,158104489	0,155774911	0,154930447
257	0,301587	0,161555531	0,161150588	0,160374157	0,158011284	0,15715468
258	0,298412	0,163921816	0,163511167	0,162723499	0,160326165	0,159456995
259	0,295208	0,166371604	0,165955051	0,165155753	0,162722744	0,161840564
260	0,291975	0,168908319	0,168485655	0,167674317	0,165204369	0,164308717
261	0,288713	0,171535557	0,17110657	0,170282764	0,167774561	0,166864956
262	0,285424	0,174257102	0,173821567	0,172984848	0,17043702	0,169512961
263	0,282109	0,17707693	0,176634615	0,17578452	0,173195639	0,172256603
264	0,278768	0,179999225	0,179549889	0,178685934	0,176054511	0,175099954
265	0,275403	0,183028392	0,182571783	0,181693463	0,179017945	0,178047299
266	0,272014	0,186169067	0,185704921	0,184811712	0,182090479	0,181103151
267	0,268602	0,189426133	0,188954177	0,188045528	0,185276891	0,184272262
268	0,265168	0,192804734	0,192324682	0,191400022	0,188582214	0,187559639
269	0,261713	0,196310293	0,195821846	0,194880578	0,192011755	0,190970558
270	0,258239	0,199948528	0,199451376	0,198492873	0,19557111	0,194510586
271	0,254745	0,203725472	0,203219288	0,202242898	0,199266179	0,198185592
272	0,251234	0,207647488	0,207131933	0,206136973	0,203103193	0,20200177
273	0,247707	0,211721296	0,211196015	0,210181771	0,207088726	0,20596566
274	0,244164	0,215953994	0,215418615	0,214384339	0,211229723	0,21008417
275	0,240606	0,220353078	0,219807212	0,218752123	0,215533521	0,214364595
276	0,237036	0,224926475	0,224369716	0,223292994	0,220007875	0,218814651
277	0,233453	0,229682565	0,229114487	0,228015273	0,224660987	0,223442492
278	0,22986	0,234630214	0,234050371	0,232927765	0,229501533	0,228256749
279	0,226257	0,239778805	0,239186729	0,238039788	0,234538695	0,233266553
280	0,222646	0,245138273	0,244533475	0,243361208	0,239782195	0,238481574
281	0,219028	0,25071914	0,250101106	0,248902475	0,24524233	0,243912053
282	0,215405	0,256532559	0,255900749	0,254674663	0,250930013	0,249568842
283	0,211777	0,262590349	0,261944198	0,26068951	0,256856814	0,255463449
284	0,208145	0,268905049	0,268243963	0,266959469	0,263035	0,261608076
285	0,204513	0,275489962	0,274813317	0,273497751	0,269477592	0,26801567
286	0,200879	0,282359209	0,281666348	0,280318378	0,276198407	0,274699976
287	0,197247	0,289527785	0,288818018	0,287436242	0,283212122	0,281675588
288	0,193617	0,297011162	0,296284222	0,294867164	0,290534326	0,288958013
289	0,189991	0,304827645	0,304081853	0,302627958	0,298181589	0,29656373
290	0,186371	0,312993864	0,312228873	0,310736503	0,306171529	0,30451026
291	0,182757	0,321529422	0,320744386	0,319211815	0,314522886	0,312816241
292	0,179151	0,330454697	0,329648723	0,328074128	0,3232556	0,321501506
293	0,175555	0,339791377	0,338963524	0,337344984	0,332390898	0,330587166
294	0,171969	0,349562559	0,348711836	0,34704732	0,341951386	0,340095703
295	0,168397	0,359792848	0,358918207	0,357205573	0,351961143	0,350051066
296	0,164838	0,370508464	0,369608801	0,367845783	0,362445832	0,360478779
297	0,161295	0,381737359	0,380811505	0,37899571	0,373432809	0,371406047
298	0,157769	0,393509336	0,392556059	0,390684955	0,384951245	0,382861883
299	0,154261	0,405856189	0,404874185	0,402945092	0,397032255	0,394877233
300	0,150773	0,418811836	0,417799728	0,415809809	0,409709038	0,407485115
301	0,147306	0,432412477	0,431368805	0,429315057	0,423017022	0,420720766
302	0,143863	0,44669675	0,445619971	0,443499213	0,436994028	0,434621797
303	0,140444	0,461705906	0,460594388	0,458403246	0,451680428	0,449228364
304	0,137051	0,47748399	0,476336002	0,474070902	0,467119335	0,464583343
305	0,133685	0,494078036	0,492891745	0,490548894	0,483356782	0,480732518

Продолжение таблицы 16

306	0,130349	0,511538269	0,510311732	0,507887106	0,500441931	0,497724781
307	0,127043	0,529918321	0,528649479	0,526138807	0,518427277	0,515612343
308	0,123768	0,54927546	0,547962129	0,545360877	0,537368874	0,534450953
309	0,120527	0,569670824	0,568310688	0,565614038	0,557326567	0,554300128
310	0,117321	0,591169666	0,589760266	0,586963104	0,578364226	0,575223391
311	0,114151	0,613841609	0,612380339	0,609477227	0,600550003	0,597288524
312	0,111019	0,637760907	0,636244996	0,633230159	0,62395658	0,620567811
313	0,107926	0,663006702	0,661433214	0,658300511	0,648661429	0,645138303
314	0,104874	0,689663294	0,688029109	0,684772014	0,674747067	0,671082069
315	0,101864	0,717820393	0,7161222	0,712733773	0,702301313	0,698486445
316	0,098897	0,747573367	0,745807651	0,74228052	0,731417522	0,727444281
317	0,095975	0,779023474	0,777186505	0,77351283	0,762194816	0,758054158
318	0,093099	0,812278059	0,81036588	0,806537332	0,794738281	0,790420589
319	0,090271	0,847450722	0,845459134	0,841466866	0,829159124	0,824654174
320	0,087491	0,884661424	0,882585976	0,878420593	0,865574782	0,860871711
321	0,084762	0,924036528	0,921872503	0,917524032	0,904108961	0,899196231
322	0,082084	0,965708748	0,963451151	0,958909016	0,944891588	0,939756952
323	0,079458	1,00981698	1,007460525	1,002713518	0,988058641	0,982689112
324	0,076887	1,056505984	1,054045086	1,049081341	1,033751848	1,028133665
325	0,074371	1,105925892	1,103354653	1,098161621	1,082118193	1,076236792
326	0,071911	1,158231478	1,155543682	1,150108112	1,13330921	1,127570364
327	0,069509	1,213581162	1,210770269	1,205078194	1,18748001	1,18189568
328	0,067166	1,272135684	1,269194827	1,263231551	1,244787975	1,239428453
329	0,064882	1,334056376	1,330978359	1,324728461	1,305683371	1,300417854
330	0,06266	1,39950297	1,396280277	1,389727616	1,37006283	1,36514943
331	0,060499	1,468630857	1,465255664	1,458383399	1,438174048	1,433948
332	0,058402	1,541587711	1,538051905	1,530842536	1,510310199	1,507180395
333	0,056368	1,618509389	1,614804593	1,607255358	1,586814055	1,585257868
334	0,0544	1,699515014	1,695632631	1,687759497	1,66808197	1,668637971
335	0,052497	1,784701157	1,780632413	1,772606286	1,754567459	1,757825607
336	0,050662	1,874135033	1,869871049	1,862103834	1,846784051	1,853372945
337	0,048895	1,967846673	1,9629829	1,956622039	1,945307005	1,955877803
338	0,047196	2,065820036	2,060397628	2,056597079	2,050773383	2,065980062
339	0,045567	2,16798309	2,162287711	2,162534873	2,163879886	2,184355615
340	0,044008	2,274196966	2,268891133	2,275012912	2,285377803	2,311707346
341	0,04252	2,383332354	2,38051783	2,394679686	2,41606433	2,448752607
342	0,041104	2,496109278	2,497555159	2,522250842	2,556769547	2,596206705
343	0,03976	2,61250716	2,620471559	2,658501112	2,708338335	2,754761984
344	0,03849	2,732592667	2,749817379	2,804251003	2,871606645	2,925062233
345	0,037294	2,856531985	2,886221666	2,96034733	3,047371696	3,107672361
346	0,036172	2,984601622	3,030383566	3,127636778	3,236355984	3,303043553
347	0,035125	3,117196191	3,183057029	3,306932039	3,439165359	3,511474538
348	0,034153	3,254831245	3,345027598	3,498970428	3,656241927	3,733070009
349	0,033257	3,398139029	3,517080409	3,704365528	3,887813127	3,967697783
350	0,032438	3,547854966	3,699959058	3,923553055	4,133838967	4,2149468
351	0,031696	3,704792863	3,894315738	4,156732942	4,393960093	4,47408858
352	0,03103	3,869807467	4,100653942	4,403810429	4,667449947	4,74404517
353	0,030443	4,043743851	4,319266044	4,664339632	4,953174739	5,023366805
354	0,029933	4,227374449	4,550169041	4,937473675	5,249565188	5,310222506
355	0,029501	4,421326003	4,793042545	5,221925678	5,554603853	5,602406411
356	0,029147	4,626000237	5,047173696	5,515944862	5,865831342	5,897361917
357	0,028872	4,841493379	5,311413746	5,817311484	6,180373727	6,192224583
358	0,028675	5,067520557	5,58415082	6,123353364	6,494992111	6,483883327



Продолжение таблицы 16

359	0,028557	5,303351357	5,863302512	6,430985414	6,806153617	6,769057911
360	0,028517	5,547762469	6,146330819	6,736771908	7,110121298	7,044389182
361	0,028557	5,79901231	6,43028037	7,037009478	7,403058726	7,306537247
362	0,028675	6,054841024	6,711839298	7,32782714	7,681143679	7,552281889
363	0,028872	6,312497474	6,987420421	7,605298245	7,940684453	7,778619258
364	0,029147	6,568792987	7,253259033	7,865558352	8,178232117	7,982849143
365	0,029501	6,820179899	7,505522471	8,104922639	8,390682448	8,162648059
366	0,029933	7,06285146	7,740426017	8,319996734	8,575362317	8,316124668
367	0,030443	7,292858509	7,954349481	8,507775564	8,730096728	8,441855653
368	0,03103	7,50623755	8,143949027	8,665725996	8,853254377	8,538901732
369	0,031696	7,699144393	8,306259405	8,79185035	8,943771254	8,606805004
370	0,032438	7,867987347	8,438782499	8,884729287	9,001153265	8,645569893
371	0,033257	8,009554085	8,53955906	8,943543812	9,025460012	8,655630761
372	0,034153	8,12112656	8,607221404	8,968077224	9,017272621	8,637809584
373	0,035125	8,200578875	8,641025753	8,958698616	8,977648884	8,593267073
374	0,036172	8,246453655	8,640863749	8,916330099	8,90806907	8,523450353
375	0,037294	8,258013339	8,607253379	8,842400197	8,810375514	8,430039819
376	0,03849	8,235263796	8,541310265	8,738786044	8,686708783	8,314897242
377	0,03976	8,178948912	8,444700843	8,607746989	8,539442778	8,180016613
378	0,041104	8,090516131	8,319579588	8,451852206	8,371120678	8,027478706
379	0,04252	7,972054412	8,168512924	8,273904787	8,184393263	7,859409908
380	0,044008	7,826207595	7,994392972	8,076864722	7,981960785	7,677945506
381	0,045567	7,656067579	7,800344652	7,863773037	7,766519288	7,485197436
382	0,047196	7,46505299	7,589629951	7,637679231	7,540712099	7,283226303
383	0,048895	7,256779928	7,365553249	7,401573973	7,307086981	7,074017451
384	0,050662	7,034931866	7,13137151	7,158328803	7,068059371	6,859460815
385	0,052497	6,803135735	6,890212857	6,910644274	6,825881955	6,641334319
386	0,0544	6,564850617	6,64500651	6,661007653	6,582620721	6,421290595
387	0,056368	6,323274381	6,39842636	6,411660875	6,340137511	6,200846845
388	0,058402	6,08127203	6,152849608	6,164579014	6,100078937	5,981377675
389	0,060499	5,841327733	5,910330969	5,921459077	5,863871386	5,764110758
390	0,06266	5,60552065	5,672592006	5,683718506	5,632721685	5,550125184
391	0,064882	5,375522882	5,44102433	5,452502365	5,407622864	5,340352319
392	0,067166	5,152616451	5,216704686	5,228697908	5,18936433	5,135578996
393	0,069509	4,9377252	5,00041949	5,012954966	4,978545659	4,936452814
394	0,071911	4,731456998	4,792696101	4,805710531	4,775593169	4,743489292
395	0,074371	4,534151649	4,593838105	4,607215881	4,580778412	4,557080576
396	0,076887	4,345930331	4,403962083	4,417564712	4,394237726	4,377505409
397	0,079458	4,16674315	4,223033698	4,236720922	4,215992085	4,20494
398	0,082084	4,008042832	4,050901395	4,064544954	4,045966517	4,039469477
399	0,084762	3,857235832	3,898490564	3,900817854	3,884008549	3,881099573
400	0,087491	3,713924124	3,753654413	3,755892031	3,729905194	3,729768249
401	0,090271	3,577723016	3,616004195	3,618156707	3,583398196	3,585356955
402	0,093099	3,448262281	3,485165781	3,487237508	3,453717438	3,447701303
403	0,095975	3,325186897	3,360780401	3,36277543	3,330433402	3,316600954
404	0,098897	3,208157453	3,242505062	3,244427257	3,213206043	3,191828568
405	0,101864	3,0968503	3,1300127	3,131865712	3,101711109	3,073137751
406	0,104874	2,990957498	3,02299212	3,0247794	2,995640089	2,967932554
407	0,107926	2,890186596	2,921147784	2,922872589	2,894699991	2,867820124
408	0,111019	2,794260293	2,824199459	2,825864868	2,798613003	2,772524505
409	0,114151	2,702916004	2,731881785	2,733490705	2,707116057	2,681784402
410	0,117321	2,615905359	2,643943765	2,645498941	2,619960329	2,595352681
411	0,120527	2,532993654	2,560148212	2,561652238	2,536910686	2,512995817

Продолжение таблицы 16

412	0,123768	2,453959273	2,480271166	2,481726491	2,457745109	2,434493323
413	0,127043	2,378593091	2,404101291	2,405510228	2,382254095	2,359637153
414	0,130349	2,306697878	2,331439264	2,332804002	2,310240054	2,288231098
415	0,133685	2,238087691	2,262097178	2,263419783	2,241516711	2,220090195
416	0,137051	2,172587291	2,195897936	2,197180363	2,17590851	2,155040133
417	0,140444	2,110031561	2,132674673	2,133918769	2,113250037	2,09291668
418	0,143863	2,050264948	2,072270186	2,073477702	2,053385463	2,033565123
419	0,147306	1,993140923	2,014536395	2,015708983	1,996167996	1,97683973
420	0,150773	1,938521462	1,959333811	1,960473038	1,941459366	1,922603237
421	0,154261	1,886276547	1,90653104	1,90763839	1,889129325	1,870726347
422	0,157769	1,836283702	1,856004304	1,857081182	1,83905518	1,821087267
423	0,161295	1,788427536	1,80763699	1,808684726	1,791121335	1,773571256
424	0,164838	1,74259932	1,761319217	1,762339074	1,745218871	1,728070204
425	0,168397	1,698696589	1,716947429	1,717940605	1,701245142	1,684482229
426	0,171969	1,656622757	1,674424018	1,675391647	1,659103393	1,642711302
427	0,175555	1,616286762	1,633656953	1,634600115	1,618702401	1,602666888
428	0,179151	1,577602727	1,594559448	1,595479165	1,579956141	1,564263613
429	0,182757	1,540489647	1,557049635	1,55794688	1,542783465	1,527420948
430	0,186371	1,504871087	1,521050269	1,521925966	1,507107806	1,492062908
431	0,189991	1,470674904	1,48648844	1,487343467	1,472856896	1,458117781
432	0,193617	1,437832988	1,453295313	1,454130506	1,439962505	1,425517865
433	0,197247	1,406281009	1,421405877	1,422222031	1,408360196	1,394199217
434	0,200879	1,375958195	1,390758712	1,391556585	1,377989088	1,364101435
435	0,204513	1,346807109	1,361295772	1,362076084	1,348791649	1,335167432
436	0,208145	1,318773454	1,332962181	1,333725619	1,320713484	1,307343242
437	0,211777	1,291805876	1,30570604	1,306453258	1,293703155	1,280577829
438	0,215405	1,26585579	1,279478248	1,28020987	1,267711992	1,254822911
439	0,219028	1,240877218	1,254232336	1,254948957	1,242693939	1,230032795
440	0,222646	1,216826626	1,229924308	1,230626497	1,218605388	1,20616422
441	0,226257	1,193662786	1,206512496	1,207200796	1,195405039	1,183176217
442	0,22986	1,171346632	1,183957421	1,184632348	1,173053762	1,16102997
443	0,233453	1,14984114	1,162221663	1,162883713	1,151514469	1,139688689
444	0,237036	1,129111205	1,141269743	1,14191939	1,130751996	1,119117493
445	0,240606	1,109123528	1,121068008	1,121705703	1,110732988	1,099283298
446	0,244164	1,089846514	1,101584526	1,102210703	1,091425795	1,080154712
447	0,247707	1,071250171	1,082788987	1,083404059	1,072800377	1,06170194
448	0,251234	1,053306021	1,064652609	1,065256973	1,054828207	1,043896688
449	0,254745	1,035987012	1,047148052	1,047742087	1,037482188	1,026712081
450	0,258239	1,019267437	1,030249335	1,030833405	1,02073657	1,010122582
451	0,261713	1,003122861	1,013931762	1,014506215	1,004566875	0,994103915
452	0,265168	0,987530045	0,998171846	0,998737017	0,988949828	0,978632998
453	0,268602	0,972466883	0,982947247	0,983503457	0,973863285	0,963687871
454	0,272014	0,95791234	0,968236705	0,968784261	0,959286175	0,94924764
455	0,275403	0,94384639	0,95401998	0,954559177	0,945198441	0,935292413
456	0,278768	0,930249964	0,9402778	0,940808923	0,931580981	0,92180325
457	0,282109	0,917104896	0,926991806	0,927515126	0,918415599	0,908762108
458	0,285424	0,904393877	0,914144503	0,914660282	0,905684957	0,896151795
459	0,288713	0,892100405	0,901719214	0,902227704	0,893372527	0,883955922
460	0,291975	0,880208747	0,889700038	0,890201481	0,881462548	0,872158864
461	0,295208	0,868703895	0,878071807	0,878566434	0,86993999	0,860745716
462	0,298412	0,857571529	0,866820047	0,867308085	0,858790507	0,849702257
463	0,301587	0,846797982	0,855930948	0,85641261	0,848000411	0,839014914
464	0,304732	0,836370206	0,845391319	0,845866814	0,837556632	0,828670729

Продолжение таблицы 16

465	0,307845	0,826275739	0,835188568	0,835658095	0,827446688	0,818657328
466	0,310926	0,816502676	0,825310661	0,825774413	0,817658654	0,80896289
467	0,313975	0,807039643	0,815746103	0,816204266	0,808181138	0,799576118
468	0,316991	0,797875765	0,806483904	0,806936657	0,799003247	0,790486216
469	0,319973	0,789000647	0,797513557	0,797961073	0,790114569	0,781682862
470	0,322921	0,780404347	0,788825014	0,789267459	0,781505146	0,773156184
471	0,325833	0,772077355	0,780408664	0,780846199	0,773165453	0,76489674
472	0,328711	0,76401057	0,772255308	0,772688089	0,765086374	0,756895494
473	0,331552	0,756195284	0,764356146	0,764784322	0,757259186	0,749143799
474	0,334357	0,74862316	0,75670275	0,757126467	0,749675539	0,741633379
475	0,337125	0,741286214	0,749287051	0,74970645	0,742327437	0,734356306
476	0,339855	0,734176801	0,742101324	0,742516539	0,735207221	0,727304992
477	0,342548	0,727287596	0,735138166	0,735549329	0,728307557	0,720472165
478	0,345203	0,720611584	0,728390485	0,728797721	0,721621415	0,713850859
479	0,347819	0,714142039	0,721851484	0,722254918	0,715142061	0,707434398
480	0,350395	0,707872517	0,71551465	0,715914399	0,708863039	0,701216385
481	0,352933	0,701796838	0,709373737	0,709769918	0,702778161	0,695190685
482	0,355431	0,695909079	0,703422759	0,703815482	0,696881493	0,689351419
483	0,357888	0,690203559	0,697655974	0,698045348	0,691167345	0,683692947
484	0,360306	0,68467483	0,692067875	0,692454005	0,68563026	0,678209861
485	0,362683	0,679317666	0,686653181	0,687036168	0,680265004	0,672896974
486	0,365019	0,674127053	0,681406824	0,681786767	0,675066556	0,66774931
487	0,367314	0,669098181	0,676323944	0,676700938	0,670030098	0,662762094
488	0,369568	0,664226436	0,671399875	0,671774014	0,665151007	0,657930745
489	0,37178	0,659507389	0,666630143	0,667001516	0,660424849	0,653250868
490	0,373951	0,654936789	0,66201045	0,662379146	0,655847366	0,648718246
500	0,39333	0,616574532	0,623236067	0,623582318	0,617427478	0,610676249
510	0,408416	0,516574532	0,523236067	0,523582318	0,517427478	0,510676249

Таблица 17 – Основные термодинамические параметры работы адаптированного двигателя при работе на КПГ 95% и водород 5%

Угол ПКВ, град.	Объем цилиндра	P <sub>i</sub> , частота вращения 840 мин <sup>-1</sup>	P <sub>i</sub> , частота вращения 2000 мин <sup>-1</sup>	P <sub>i</sub> , частота вращения 3800 мин <sup>-1</sup>	P <sub>i</sub> , частота вращения 5400 мин <sup>-1</sup>	P <sub>i</sub> , частота вращения 6000 мин <sup>-1</sup>
230	0,373951	0,120223119	0,119917941	0,118947302	0,117578047	0,11694026
231	0,37178	0,121188596	0,120881037	0,119902673	0,118522489	0,117879545
232	0,369568	0,122186486	0,121876467	0,120890118	0,119498639	0,118850364
233	0,367314	0,123217782	0,122905221	0,121910621	0,12050747	0,119853686
234	0,365019	0,124283523	0,123968337	0,122965211	0,121549997	0,120890519
235	0,362683	0,125384793	0,125066895	0,124054959	0,122627282	0,12196192
236	0,360306	0,126522726	0,126202025	0,125180987	0,123740433	0,123068991
237	0,357888	0,127698504	0,127374908	0,126344467	0,124890607	0,124212882
238	0,355431	0,128913362	0,128586777	0,12754662	0,126079014	0,125394797
239	0,352933	0,130168594	0,12983892	0,128788724	0,127306916	0,126615991
240	0,350395	0,131465547	0,131132683	0,130072117	0,128575635	0,127877778
241	0,347819	0,132805632	0,132469473	0,131398192	0,12988655	0,12918153
242	0,345203	0,134190324	0,133850762	0,13276841	0,131241104	0,130528682
243	0,342548	0,135621166	0,135278087	0,134184297	0,132640805	0,131920734
244	0,339855	0,137099768	0,136753056	0,135647448	0,134087232	0,133359256
245	0,337125	0,138627819	0,138277354	0,137159533	0,135582034	0,134845889
246	0,334357	0,140207082	0,139852741	0,138722299	0,137126939	0,136382349

Продолжение таблицы 17

247	0,331552	0,141839406	0,141481058	0,140337573	0,138723754	0,137970435
248	0,328711	0,143526724	0,143164236	0,142007269	0,14037437	0,139612028
249	0,325833	0,145271059	0,144904294	0,143733391	0,142080769	0,141309098
250	0,322921	0,147074534	0,146703347	0,145518038	0,143845025	0,143063707
251	0,319973	0,148939369	0,148563612	0,147363407	0,145669312	0,144878019
252	0,316991	0,150867892	0,150487411	0,149271804	0,147555908	0,146754298
253	0,313975	0,152862544	0,152477178	0,151245643	0,1495072	0,148694919
254	0,310926	0,154925883	0,154535466	0,153287456	0,151525693	0,150702371
255	0,307845	0,157060594	0,156664953	0,1553999	0,153614011	0,152779266
256	0,304732	0,159269491	0,158868448	0,157585762	0,155774911	0,154928345
257	0,301587	0,161555531	0,161148899	0,159847967	0,158011284	0,157152483
258	0,298412	0,163921816	0,1635094	0,162189584	0,160326165	0,159454698
259	0,295208	0,166371604	0,165953204	0,16461384	0,162722744	0,161838163
260	0,291975	0,168908319	0,168483725	0,167124122	0,165204369	0,164306207
261	0,288713	0,171535557	0,171104552	0,16972399	0,167774561	0,166862332
262	0,285424	0,174257102	0,173819457	0,172417187	0,17043702	0,169510218
263	0,282109	0,17707693	0,176632409	0,175207651	0,173195639	0,172253735
264	0,278768	0,179999225	0,179547583	0,178099522	0,176054511	0,175096955
265	0,275403	0,183028392	0,182569371	0,18109716	0,179017945	0,178044163
266	0,272014	0,186169067	0,185702399	0,184205152	0,182090479	0,181099872
267	0,268602	0,189426133	0,188951539	0,187428331	0,185276891	0,184268832
268	0,265168	0,192804734	0,192321922	0,19077179	0,188582214	0,187556051
269	0,261713	0,196310293	0,19581896	0,194240896	0,192011755	0,190966805
270	0,258239	0,199948528	0,199448356	0,197841308	0,19557111	0,194506659
271	0,254745	0,203725472	0,203216128	0,201578996	0,199266179	0,198181483
272	0,251234	0,207647488	0,207128626	0,20546026	0,203103193	0,20199747
273	0,247707	0,211721296	0,211192554	0,20949175	0,207088726	0,205961159
274	0,244164	0,215953994	0,215414991	0,21368049	0,211229723	0,210079458
275	0,240606	0,220353078	0,219803418	0,218033902	0,215533521	0,214359661
276	0,237036	0,224926475	0,224365742	0,22255983	0,220007875	0,218809483
277	0,233453	0,229682565	0,229110324	0,227266569	0,224660987	0,22343708
278	0,22986	0,234630214	0,23404601	0,232162895	0,229501533	0,228251079
279	0,226257	0,239778805	0,239182159	0,237258095	0,234538695	0,233260611
280	0,222646	0,245138273	0,244528685	0,242562001	0,239782195	0,238475345
281	0,219028	0,25071914	0,250096084	0,248085029	0,24524233	0,243905522
282	0,215405	0,256532559	0,255895482	0,253838217	0,250930013	0,249561994
283	0,211777	0,262590349	0,261938673	0,259833266	0,256856814	0,255456265
284	0,208145	0,268905049	0,268238166	0,266082585	0,263035	0,261600538
285	0,204513	0,275489962	0,274807233	0,272599342	0,269477592	0,268007759
286	0,200879	0,282359209	0,281659961	0,279397514	0,276198407	0,274691671
287	0,197247	0,289527785	0,288811311	0,286491943	0,283212122	0,281666867
288	0,193617	0,297011162	0,296277176	0,293898398	0,290534326	0,288948851
289	0,189991	0,304827645	0,30407445	0,301633638	0,298181589	0,296554102
290	0,186371	0,312993864	0,312221091	0,309715482	0,306171529	0,30450014
291	0,182757	0,321529422	0,320736203	0,318162883	0,314522886	0,3128056
292	0,179151	0,330454697	0,329640116	0,326996009	0,3232556	0,321490313
293	0,175555	0,339791377	0,338954468	0,336236331	0,332390898	0,330575389
294	0,171969	0,349562559	0,348702303	0,34590671	0,341951386	0,340083307
295	0,168397	0,359792848	0,358908169	0,356031502	0,351961143	0,350038013
296	0,164838	0,370508464	0,369598227	0,366636661	0,362445832	0,360465029
297	0,161295	0,381737359	0,380800363	0,377749856	0,373432809	0,371391557
298	0,157769	0,393509336	0,392544313	0,389400589	0,384951245	0,382846608
299	0,154261	0,405856189	0,404861797	0,401620331	0,397032255	0,394861124

Продолжение таблицы 17

300	0,150773	0,418811836	0,417786657	0,414442658	0,409709038	0,407468119
301	0,147306	0,432412477	0,431355009	0,427903402	0,423017022	0,420702826
302	0,143863	0,44669675	0,445605404	0,442040814	0,436994028	0,434602853
303	0,140444	0,461705906	0,460578998	0,456895727	0,451680428	0,449208351
304	0,137051	0,47748399	0,476319737	0,472511742	0,467119335	0,464562192
305	0,133685	0,494078036	0,492874547	0,488935418	0,483356782	0,480710153
306	0,130349	0,511538269	0,510293539	0,506216475	0,500441931	0,497701123
307	0,127043	0,529918321	0,528630225	0,524408005	0,518427277	0,515587305
308	0,123768	0,54927546	0,547941743	0,543566699	0,537368874	0,534424442
309	0,120527	0,569670824	0,568289092	0,56375308	0,557326567	0,554272043
310	0,117321	0,591169666	0,589737378	0,585031746	0,578364226	0,575193626
311	0,114151	0,613841609	0,61235607	0,607471622	0,600550003	0,597256963
312	0,111019	0,637760907	0,636219251	0,631146215	0,62395658	0,620534329
313	0,107926	0,663006702	0,661405889	0,656133876	0,648661429	0,645102767
314	0,104874	0,689663294	0,688000093	0,682518058	0,674747067	0,671044333
315	0,101864	0,717820393	0,716091373	0,710387573	0,702301313	0,698446355
316	0,098897	0,747573367	0,745774885	0,739836838	0,731417522	0,727401669
317	0,095975	0,779023474	0,777151661	0,770966096	0,762194816	0,758008844
318	0,093099	0,812278059	0,810328809	0,803881623	0,794738281	0,790372378
319	0,090271	0,847450722	0,845419675	0,838695885	0,829159124	0,824602858
320	0,087491	0,884661424	0,882543956	0,875527648	0,865574782	0,860817063
321	0,084762	0,924036528	0,921827736	0,914502016	0,904108961	0,899138011
322	0,082084	0,965708748	0,963403437	0,955750385	0,944891588	0,939694899
323	0,079458	1,00981698	1,007409649	0,999410271	0,988058641	0,982622947
324	0,076887	1,056505984	1,053990818	1,045624999	1,033751848	1,028063087
325	0,074371	1,105925892	1,103296745	1,094543214	1,082118193	1,07616148
326	0,071911	1,158231478	1,155481869	1,146318158	1,13330921	1,127068812
327	0,069509	1,213581162	1,210704268	1,201106688	1,18748001	1,180939322
328	0,067166	1,272135684	1,269124335	1,259067961	1,244787975	1,23792951
329	0,064882	1,334056376	1,330903054	1,320361722	1,305391075	1,298196457
330	0,06266	1,39950297	1,396199818	1,385146135	1,369445717	1,36189569
331	0,060499	1,468630857	1,465169688	1,453575072	1,437104066	1,429178518
332	0,058402	1,541587711	1,537960029	1,525794771	1,508510739	1,500281101
333	0,056368	1,618509389	1,614706416	1,601939772	1,58379879	1,57524368
334	0,0544	1,699515014	1,695527731	1,682128053	1,663018582	1,654274259
335	0,052497	1,784701157	1,780520354	1,766455271	1,746351351	1,737611633
336	0,050662	1,874135033	1,869751378	1,854721453	1,834012833	1,825526855
337	0,048895	1,967846673	1,963250796	1,947284059	1,926265764	1,918324202
338	0,047196	2,065820036	2,061002631	2,044366926	2,023423485	2,016341391
339	0,045567	2,16798309	2,162935044	2,146268331	2,125852937	2,119948747
340	0,044008	2,274196966	2,268909504	2,25336838	2,23397658	2,229546936
341	0,04252	2,384244364	2,377809517	2,366135448	2,348272702	2,345562888
342	0,041104	2,497817496	2,490372329	2,485130799	2,469273422	2,46844342
343	0,03976	2,614506016	2,606615516	2,61101031	2,597559669	2,598646135
344	0,03849	2,733785489	2,726662681	2,744522021	2,733752287	2,73662715
345	0,037294	2,853604597	2,850757659	2,886498082	2,878498487	2,882825301
346	0,036172	2,974972398	2,979276754	3,03783964	3,032452905	3,037642606
347	0,035125	3,097718768	3,112737143	3,199493304	3,196252739	3,201420983
348	0,034153	3,221896128	3,25179917	3,372418102	3,370486726	3,374415485
349	0,033257	3,347810071	3,39725999	3,557542371	3,555658182	3,556764697
350	0,032438	3,476043085	3,550036035	3,755710715	3,752142836	3,748459302
351	0,031696	3,607466543	3,711132051	3,967622113	3,960142859	3,949310289
352	0,03103	3,74323564	3,881595222	4,193761265	4,17963915	4,158918656

Продолжение таблицы 17

353	0,030443	3,884762092	4,062454025	4,434326371	4,41034454	4,37664877
354	0,029933	4,033660337	4,25464303	4,689157481	4,651661125	4,601607759
355	0,029501	4,191664946	4,458916601	4,957670338	4,902645187	4,832633257
356	0,029147	4,360519842	4,675756194	5,238801001	5,161983193	5,068291563
357	0,028872	4,541843434	4,905277405	5,530966521	5,427981978	5,306887759
358	0,028675	4,73697746	5,147143833	5,832046354	5,698575533	5,546488545
359	0,028557	4,946830373	5,400494982	6,139388178	5,971349762	5,784957612
360	0,028517	5,171727995	5,663894911	6,449840246	6,243585281	6,020002358
361	0,028557	5,411284398	5,935307049	6,759810626	6,512316998	6,249229759
362	0,028675	5,664304724	6,212098891	7,065351725	6,774407836	6,470208431
363	0,028872	5,928729121	6,491078225	7,362266611	7,026632895	6,680533388
364	0,029147	6,201623847	6,768560496	7,646232055	7,265769605	6,877889873
365	0,029501	6,479222359	7,040464888	7,912932052	7,488689088	7,060112825
366	0,029933	6,757016111	7,302435037	8,158194959	7,692444104	7,2252391
367	0,030443	7,029892104	7,549978861	8,378127339	7,874349477	7,371550339
368	0,03103	7,292311726	7,778621008	8,569238077	8,032051708	7,497605253
369	0,031696	7,538523193	7,98406078	8,728547185	8,163585485	7,60226099
370	0,032438	7,762797759	8,162328126	8,853674901	8,267415764	7,684684012
371	0,033257	7,95967795	8,309930361	8,942907925	8,342465052	7,744351512
372	0,034153	8,124224517	8,423982661	8,995240941	8,388126238	7,781044771
373	0,035125	8,2522478	8,502316037	9,010392762	8,404261886	7,794836022
374	0,036172	8,34050902	8,543557455	8,988797535	8,391191268	7,786070383
375	0,037294	8,386877808	8,547177981	8,931572364	8,349666591	7,755344238
376	0,03849	8,39043432	8,513506308	8,840463527	8,280839937	7,703481274
377	0,03976	8,351507437	8,44370672	8,717774146	8,186222461	7,631507043
378	0,041104	8,271644889	8,339722425	8,566276747	8,067637321	7,540622743
379	0,04252	8,153516176	8,204187127	8,389114603	7,927167819	7,432178646
380	0,044008	8,000754674	8,040309603	8,189696094	7,767102174	7,307647464
381	0,045567	7,817750491	7,851737754	7,971586518	7,589876407	7,168597837
382	0,047196	7,609410035	7,642409906	7,73840176	7,39801678	7,016668093
383	0,048895	7,380901093	7,41640194	7,49370805	7,194083291	6,853540408
384	0,050662	7,137403158	7,177778964	7,240931622	6,98061567	6,680915557
385	0,052497	6,883881486	6,930459714	6,983281432	6,760083318	6,500488479
386	0,0544	6,624900088	6,678100605	6,723687301	6,534840466	6,313924939
387	0,056368	6,364483961	6,424004583	6,464754866	6,307087696	6,122839638
388	0,058402	6,106035087	6,171057727	6,20873776	6,078840701	5,92877612
389	0,060499	5,852300894	5,921694241	5,95752638	5,85190687	5,733188883
390	0,06266	5,605388854	5,677888221	5,712651772	5,627869951	5,537428029
391	0,064882	5,366817256	5,441168774	5,475302388	5,408082677	5,342726776
392	0,067166	5,137590377	5,212653667	5,246351017	5,193666912	5,150192067
393	0,069509	4,91828622	4,993096023	5,026388902	4,985520555	4,960798412
394	0,071911	4,709146436	4,782938489	4,815764104	4,78433017	4,775384987
395	0,074371	4,523801496	4,582369782	4,614621372	4,590588173	4,594655914
396	0,076887	4,347623619	4,391379433	4,422941201	4,404613271	4,419183488
397	0,079458	4,180186402	4,22226581	4,24057626	4,226572869	4,249414065
398	0,082084	4,021069988	4,061555968	4,079198152	4,056506225	4,085676196
399	0,084762	3,869864001	3,90883546	3,925841528	3,894347292	3,928190551
400	0,087491	3,726169773	3,763701659	3,780102205	3,739946356	3,777081128
401	0,090271	3,589601967	3,625765403	3,641589514	3,593089807	3,632387248
402	0,093099	3,459789724	3,494652146	3,50992745	3,463037628	3,494075852
403	0,095975	3,336377393	3,370002702	3,384755427	3,339401227	3,362053653
404	0,098897	3,219024952	3,25147367	3,265728696	3,221839501	3,236178764
405	0,101864	3,107408157	3,138737578	3,152518501	3,110027196	3,116271515

Продолжение таблицы 17

406	0,104874	3,001218488	3,031482837	3,044812025	3,003654848	3,002124215
407	0,107926	2,900162934	2,929413521	2,942312173	2,902428564	2,900865189
408	0,111019	2,803963653	2,832249021	2,844737225	2,806069682	2,804477918
409	0,114151	2,712357541	2,739723613	2,751820402	2,714314328	2,712698141
410	0,117321	2,625095727	2,651585945	2,663309352	2,62691292	2,625275914
411	0,120527	2,541943026	2,567598491	2,578965603	2,54362961	2,541975059
412	0,123768	2,462677362	2,487536961	2,498563967	2,464241704	2,462572582
413	0,127043	2,387089173	2,411189702	2,421891944	2,388539068	2,38685807
414	0,130349	2,314980805	2,338357091	2,34874911	2,316323513	2,314633083
415	0,133685	2,246165917	2,268850927	2,278946507	2,247408205	2,245710553
416	0,137051	2,180468884	2,202493835	2,212306045	2,181617059	2,179914185
417	0,140444	2,117724226	2,139118681	2,148659916	2,118784168	2,117077876
418	0,143863	2,057776042	2,07856801	2,087850027	2,058753234	2,057045152
419	0,147306	2,00047747	2,020693493	2,02972745	2,001377028	1,999668622
420	0,150773	1,945690172	1,965355411	1,974151895	1,946516868	1,944809457
421	0,154261	1,89328383	1,912422144	1,920991212	1,894042121	1,892336887
422	0,157769	1,843135681	1,861769703	1,870120905	1,843829727	1,842127731
423	0,161295	1,795130063	1,813281271	1,821423678	1,795763751	1,794065939
424	0,164838	1,74915799	1,766846771	1,774789008	1,74973495	1,748042169
425	0,168397	1,705116749	1,722362466	1,730112731	1,705640377	1,703953376
426	0,171969	1,662909521	1,679730567	1,687296658	1,663382991	1,661702437
427	0,175555	1,622445022	1,638858878	1,646248215	1,622871302	1,621197783
428	0,179151	1,583637163	1,59966045	1,606880094	1,584019033	1,582353066
429	0,182757	1,546404738	1,562053264	1,56910994	1,546744799	1,545086835
430	0,186371	1,510671121	1,525959927	1,53286004	1,510971808	1,509322242
431	0,189991	1,476363987	1,49130739	1,498057045	1,476627583	1,474986755
432	0,193617	1,443415052	1,458026687	1,464631701	1,443643695	1,442011895
433	0,197247	1,411759823	1,426052679	1,432518601	1,411955517	1,410332994
434	0,200879	1,38133737	1,395323825	1,401655949	1,381501996	1,379888955
435	0,204513	1,352090108	1,365781965	1,371985344	1,352225431	1,350622042
436	0,208145	1,323963595	1,337372112	1,343451568	1,32407127	1,322477671
437	0,211777	1,296906345	1,310042262	1,316002404	1,296987926	1,295404222
438	0,215405	1,270869643	1,283743214	1,289588444	1,270926591	1,269352861
439	0,219028	1,245807387	1,258428404	1,26416293	1,245841073	1,244277372
440	0,222646	1,221675928	1,234053746	1,239681591	1,221687642	1,220134002
441	0,226257	1,198433924	1,210577483	1,216102496	1,198424879	1,19688131
442	0,22986	1,176042206	1,187960053	1,193385919	1,176013541	1,174480038
443	0,233453	1,154463647	1,166163957	1,171494202	1,154416434	1,152892974
444	0,237036	1,133663045	1,145153641	1,150391641	1,133598294	1,132084838
445	0,240606	1,113607009	1,124895378	1,13004437	1,113525671	1,112022167
446	0,244164	1,094263856	1,105357168	1,110420252	1,094166826	1,092673211
447	0,247707	1,075603511	1,086508634	1,091488783	1,075491632	1,074007832
448	0,251234	1,057597415	1,068320931	1,073220996	1,057471481	1,055997412
449	0,254745	1,040218439	1,050766658	1,055589375	1,0400792	1,03861477
450	0,258239	1,023440804	1,033819777	1,038567771	1,023288966	1,021834075
451	0,261713	1,007240003	1,017455534	1,022131327	1,007076232	1,005630773

Продолжение таблицы 17

452	0,265168	0,991592732	1,001650393	1,006256406	0,991417656	0,989981518
453	0,268602	0,976476821	0,98638196	0,99092052	0,976291034	0,974864098
454	0,272014	0,961871174	0,971628928	0,97610227	0,961675235	0,960257379
455	0,275403	0,947755705	0,957371009	0,961781284	0,947550144	0,946141242
456	0,278768	0,93411129	0,943588888	0,947938163	0,933896606	0,93249653
457	0,282109	0,920919711	0,930264162	0,934554427	0,920696376	0,919304992
458	0,285424	0,908163605	0,917379295	0,921612466	0,907932065	0,906549239
459	0,288713	0,895826423	0,904917572	0,909095491	0,895587099	0,894212695
460	0,291975	0,883892384	0,892863053	0,896987497	0,883645676	0,882279554
461	0,295208	0,872346435	0,881200534	0,885273213	0,872092719	0,870734742
462	0,298412	0,861174214	0,869915508	0,873938071	0,860913847	0,859563873
463	0,301587	0,850362011	0,858994129	0,862968165	0,850095331	0,84875322
464	0,304732	0,839896739	0,848423176	0,852350219	0,839624065	0,838289676
465	0,307845	0,829765899	0,838190025	0,842071554	0,829487532	0,828160724
466	0,310926	0,819957548	0,828282615	0,832120056	0,819673777	0,818354407
467	0,313975	0,810460277	0,81868942	0,822484152	0,810171372	0,8088593
468	0,316991	0,801263179	0,809399425	0,813152777	0,800969397	0,799664482
469	0,319973	0,792355827	0,800402095	0,804115353	0,79205741	0,790759512
470	0,322921	0,783728246	0,791687359	0,795361764	0,783425426	0,782134406
471	0,325833	0,775370897	0,78324558	0,786882333	0,775063893	0,773779611
472	0,328711	0,767274652	0,775067538	0,778667799	0,766963672	0,76568599
473	0,331552	0,759430774	0,767144408	0,7707093	0,759116013	0,757844796
474	0,334357	0,751830899	0,759467742	0,762998352	0,751512545	0,750247657
475	0,337125	0,744467019	0,752029453	0,75552683	0,744145249	0,742886555
476	0,339855	0,737331465	0,744821792	0,748286955	0,737006446	0,735753813
477	0,342548	0,730416889	0,737837339	0,741271273	0,730088781	0,728842077
478	0,345203	0,723716252	0,731068983	0,734472643	0,723385206	0,7221443
479	0,347819	0,717222807	0,724509911	0,727884222	0,716888967	0,715653731
480	0,350395	0,71093009	0,718153592	0,721499451	0,710593591	0,709363897
481	0,352933	0,7048319	0,711993764	0,71531204	0,704492874	0,703268595
482	0,355431	0,698922296	0,706024425	0,709315963	0,698580864	0,697361877
483	0,357888	0,693195577	0,700239817	0,703505435	0,692851858	0,691638037
484	0,360306	0,687646279	0,694634421	0,697874914	0,687300382	0,686091607
485	0,362683	0,682269157	0,689202939	0,692419079	0,681921189	0,680717339
486	0,365019	0,677059182	0,683940293	0,687132828	0,676709243	0,6755102
487	0,367314	0,672011528	0,678841606	0,682011266	0,671659714	0,67046536
488	0,369568	0,667121566	0,673902203	0,677049696	0,666767967	0,665578186
489	0,37178	0,662384851	0,669117595	0,672243609	0,662029555	0,660844232
490	0,373951	0,65779712	0,664483476	0,66758868	0,657440208	0,656259232
500	0,39333	0,619290285	0,625587215	0,62851752	0,618920956	0,617777545
510	0,408416	0,519290285	0,525587215	0,52851752	0,518920956	0,517777545



## Выводы по 2-му разделу бакалаврской работы

Тепловой расчет показал, что после адаптации на работу с низкоуглеродным топливом мощностные и экономические характеристики работы изменились следующим образом:

- Мощность и крутящий момент возросли при работе на КПП с 2% водорода в среднем на 8,1%, а при работе на КПП с 5% водорода в среднем на 8,7%;
- Эффективный КПД двигателя увеличился при работе на КПП с 2% водорода в среднем на 8,5%, а при работе на КПП с 5% водорода в среднем на 10,7%;
- Удельный эффективный расход топлива снизился при работе на КПП с 2% водорода в среднем на 13,5%, а при работе на КПП с 5% водорода в среднем на 18,7%.

Для обоих составов топлива наблюдается положительная динамика улучшения результатов, но в связи с высокой стоимостью водорода, более предпочтительно выглядит добавка 2%

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

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

Кинематический расчет для центрального кривошипно-шатунного механизма проектируемого двигателя (радиус кривошипа 37,8 мм, а длина шатуна 128,2 мм) проводился по известным методикам приведенным в [1,2], при частоте вращения коленчатого вала  $6000 \text{ мин}^{-1}$ .

Результаты расчета перемещения, скорости и ускорения поршня приведены на рисунках 6, 7 и 8.

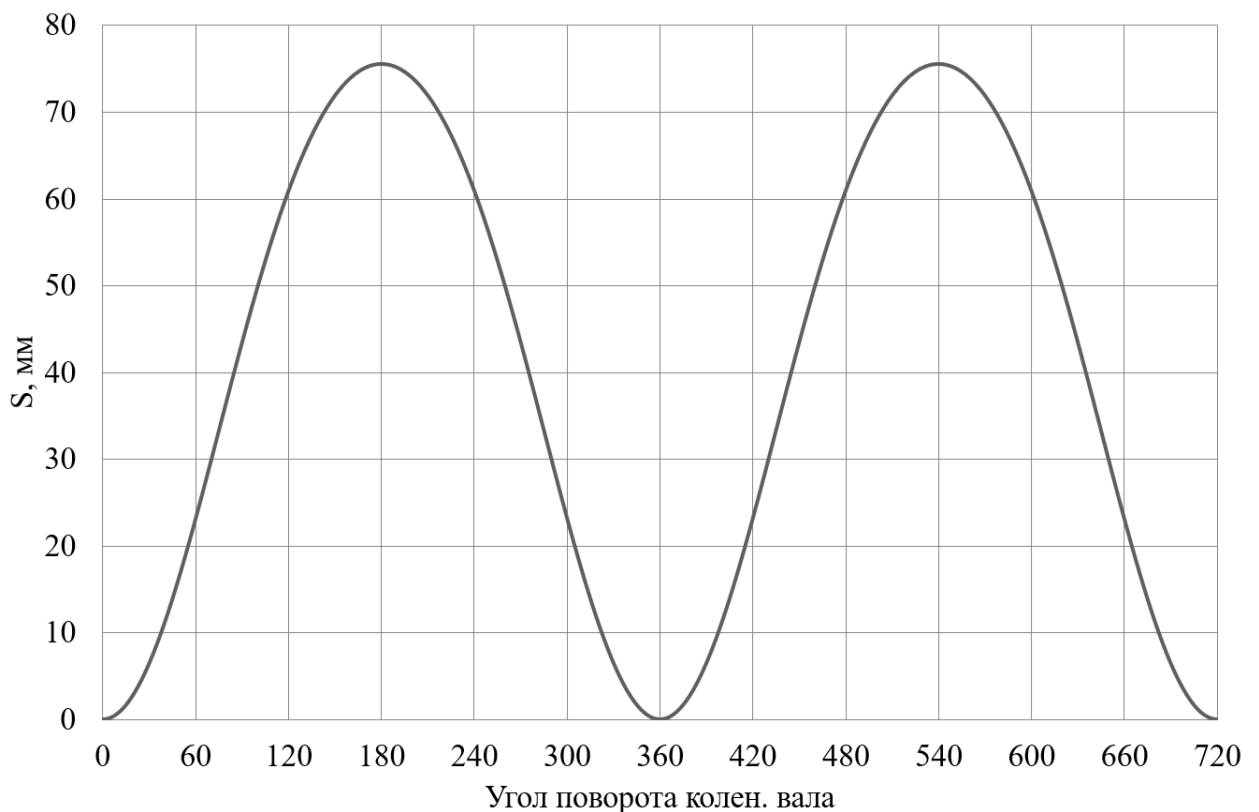


Рисунок 6 – Диаграмма изменения хода поршня

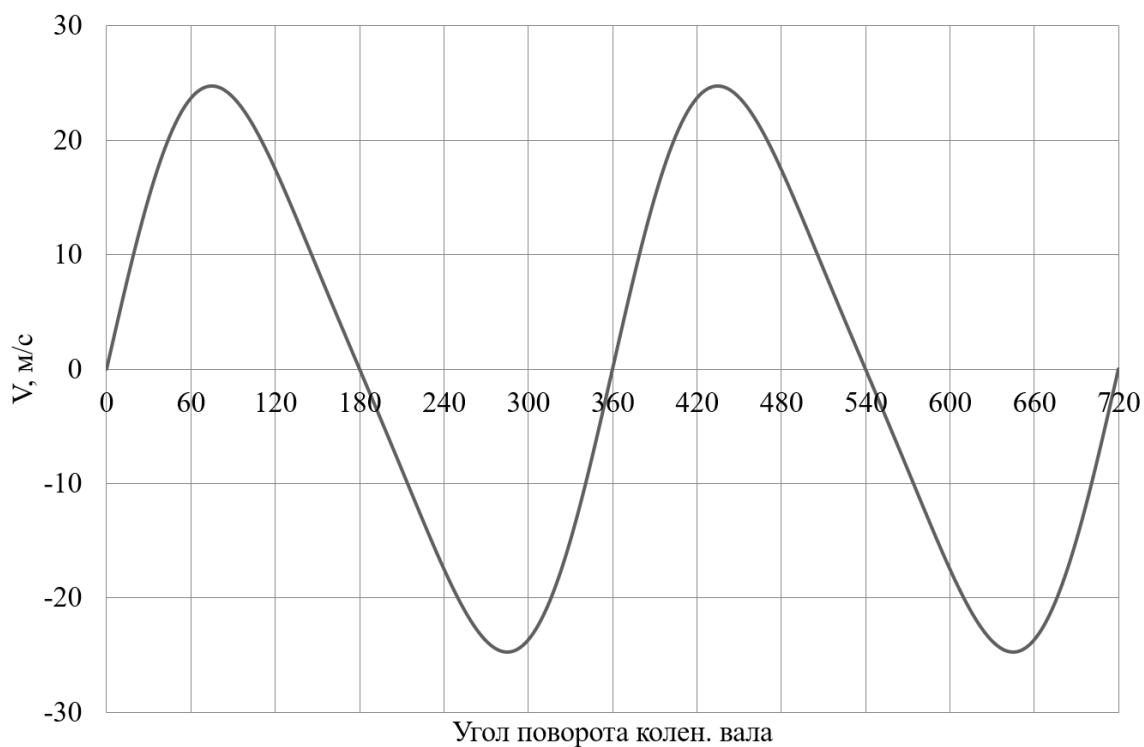


Рисунок 7 – Диаграмма изменения скорости поршня

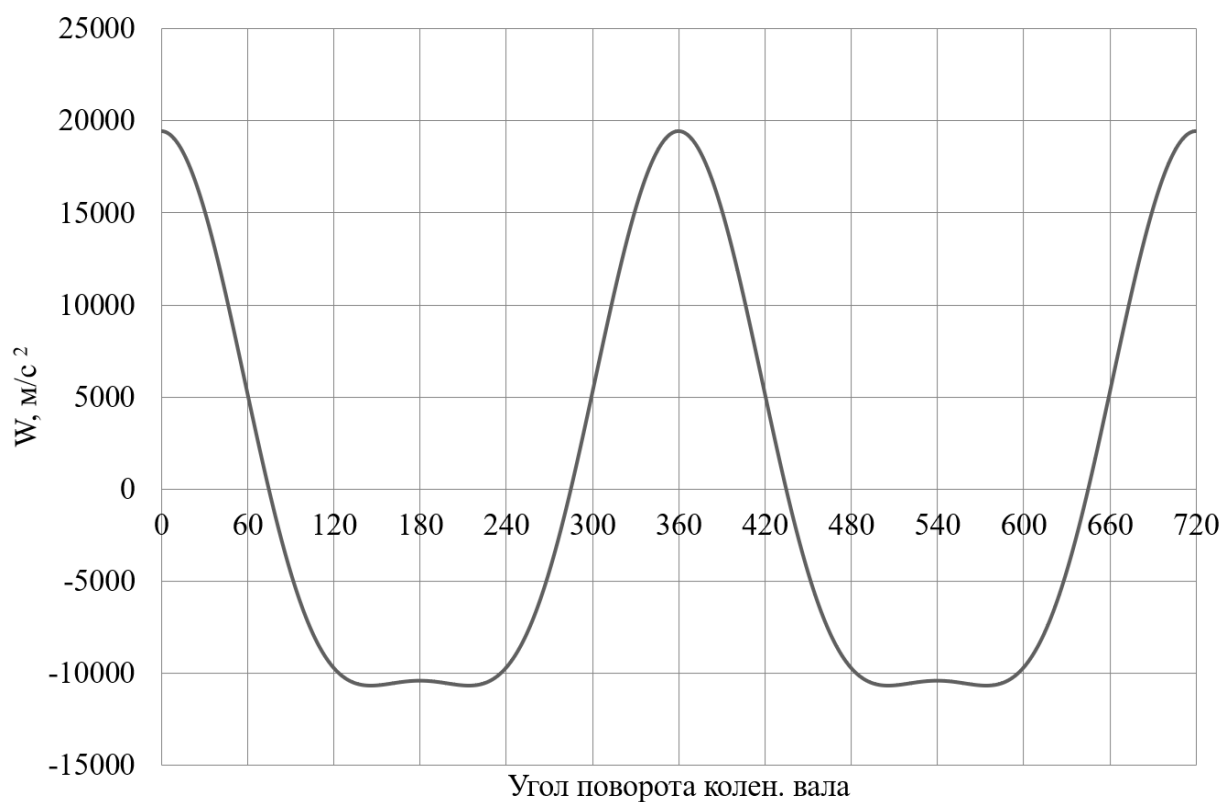


Рисунок 8 – Диаграмма изменения ускорения поршня

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

## 3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя

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

Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма проектируемого двигателя проводился по известным методикам приведенным в [1,2], при частоте вращения коленчатого вала  $6000 \text{ мин}^{-1}$ , для условий работы на бензине и сжатом природном газе.

Результаты приведение масс кривошипно-шатунного механизма по двух массовой схеме показаны в таблице 18.

Таблица 18 – Приведение масс кривошипно-шатунного механизма

Параметр	Величина
Площадь поршня, $\text{м}^2$	5281,0173
Удельная масса поршня, $\text{кг}/\text{м}^2$	80
Масса поршневой группы, кг	0,42248
Удельная масса шатуна, $\text{кг}/\text{м}^2$	130
Масса шатуна, кг	0,68653
Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца, кг	0,189
Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа, кг	0,42248
Удельная масса одного колена вала, $\text{кг}/\text{м}^2$	125
Масса неуравновешенных частей одного колена вала, кг	0,6601
Массы, совершающие возвратно-поступательное движение	0,611
Массы, совершающие вращательное движение	1,15786
Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна, Н	-7427,63
Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа, Н	-9851
Центробежная сила инерции вращающихся масс, Н	-17279

Результаты расчета приведены в виде графиков. На рисунке 9 приведены силы инерции возвратно-поступательного движения. Так как КШМ у двигателя не менялся то силы инерции не зависят от вида топлива. Так как по результатам теплового расчета максимальное давление получено при работе на низкоуглеродном топливе, состоящем из КПП=98% и водород 2%, то в дальнейшем в динамическом расчете проведем сравнение этого топлива с базовой комплектацией на бензине.

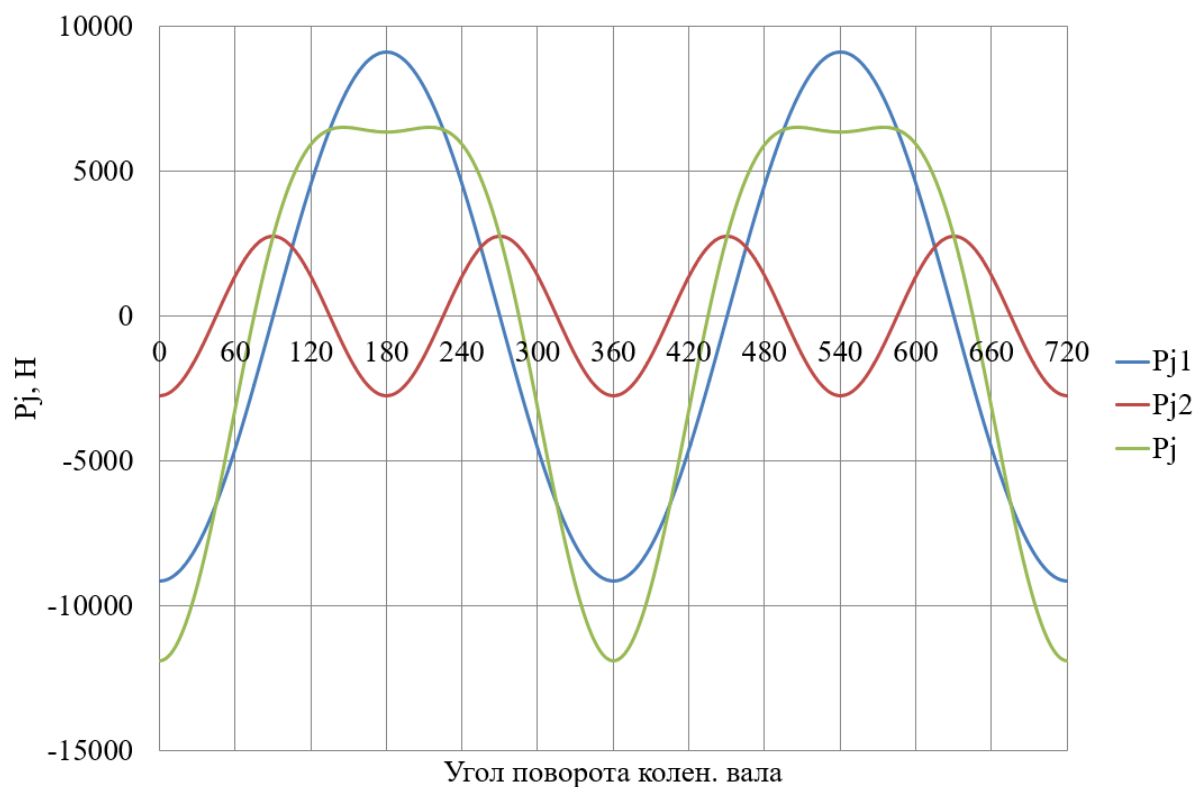


Рисунок 9 – Силы инерции возвратно-поступательного движения поршня и шатуна

На рисунке 10 приведено сравнение суммарных сил, действующих на поршневой палец двигателя при работе на бензине (рисунок 10а) и низкоуглеродном топливе, состоящем из КПГ=98% и водород 2% (рисунок 10б). Видно, что при работе на бензине суммарные силы стали больше.

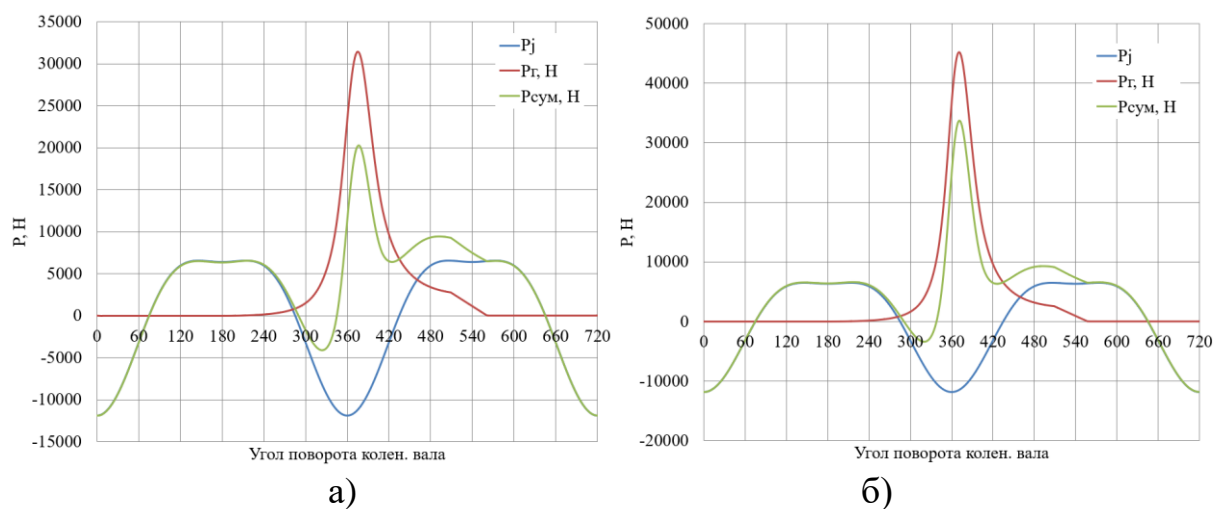


Рисунок 10 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец двигателя при работе (а) на бензине и (б) на КПГ=98% и водород 2%

На рисунке 11 приведено сравнение сил, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки. Также отмечаем большие по величинам силы, действующие при работе на бензиновом топливе.

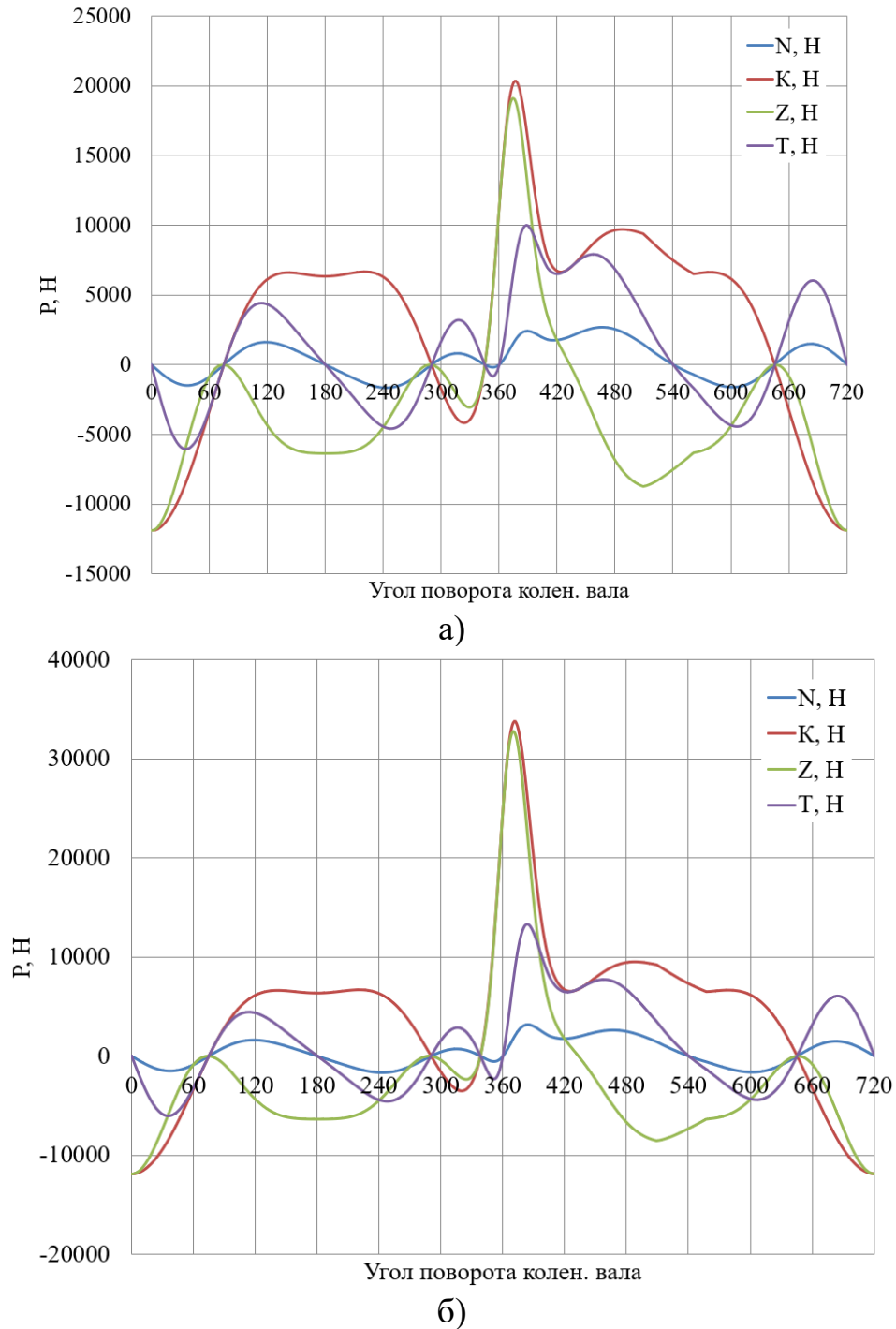


Рисунок 11 – Силы, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки двигателя при работе (а) на бензине и (б) на КПГ=98% и водород 2%

На рисунке 12 приведено сравнение крутящего момента двигателя при работе на бензиновом топливе (рисунок 12а) и на КПГ=98% и водород 2% (рисунок 12б). Также для бензина величина крутящего момента выше, чем для КПГ, но не столь значительно, как если бы двигатель переводился на газ без учета особенностей сгорания КПГ.

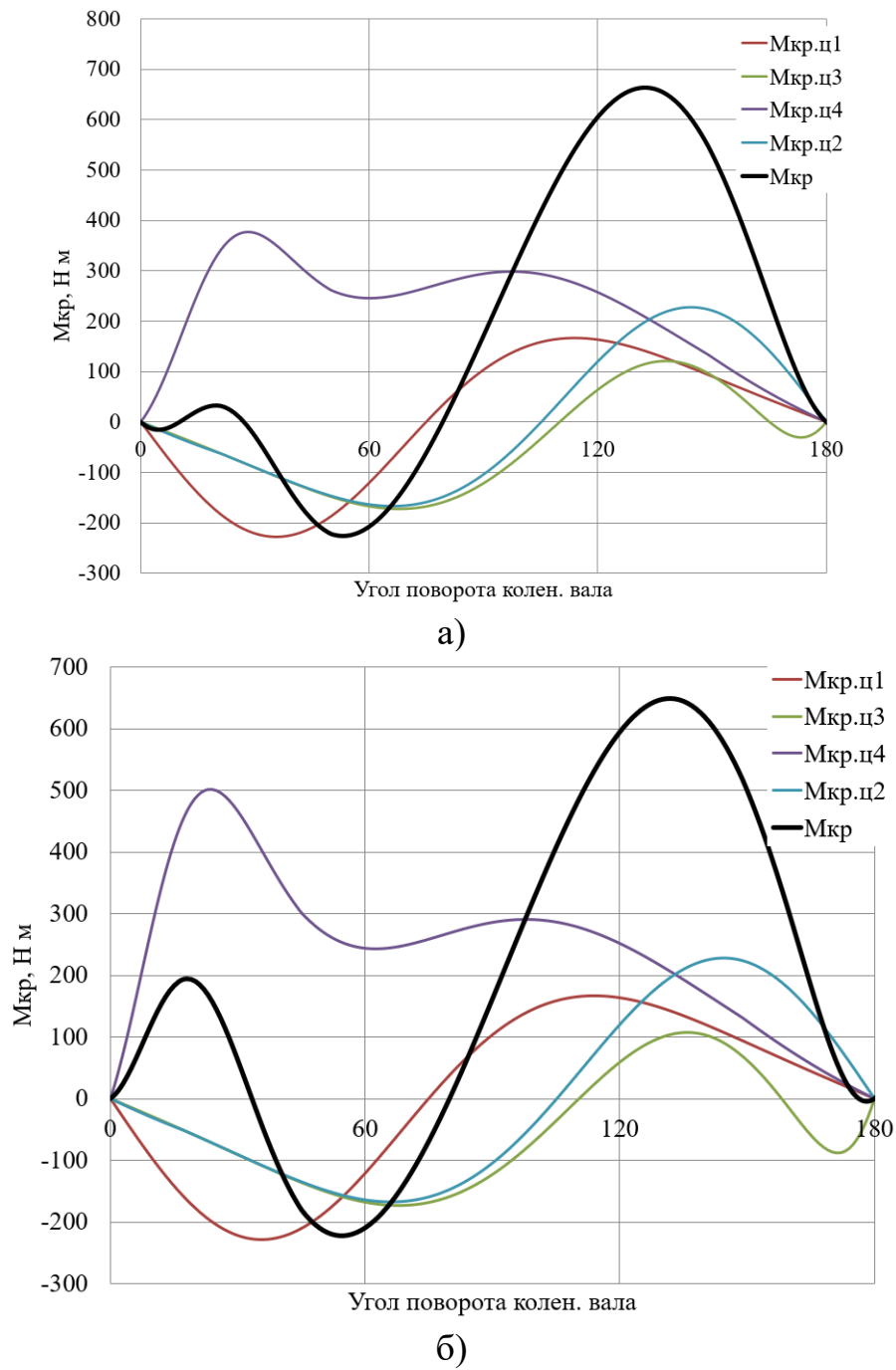


Рисунок 12 – Крутящего момента при работе (а) на бензине и (б) на КПГ=98% и водород 2%

Расчет основных сил и моментов, действующих в КШМ показал, что наибольшие силы возникают при работе на частоте вращения  $6000 \text{ мин}^{-1}$  с топливом КПГ=98% и водород 2%, а причем пиковые значения превышают значения полученные для бензина на 30-40%.

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

На рисунке 13 приведено сравнение суммарной силы, действующую на шатунную шейку в прямоугольных координатах. Величина изменения вида нагрузок на шатунную шейку при изменении вида топлива очень значительна. При работе на КПГ=98% и водород 2% максимальные нагрузки увеличились на 30%.

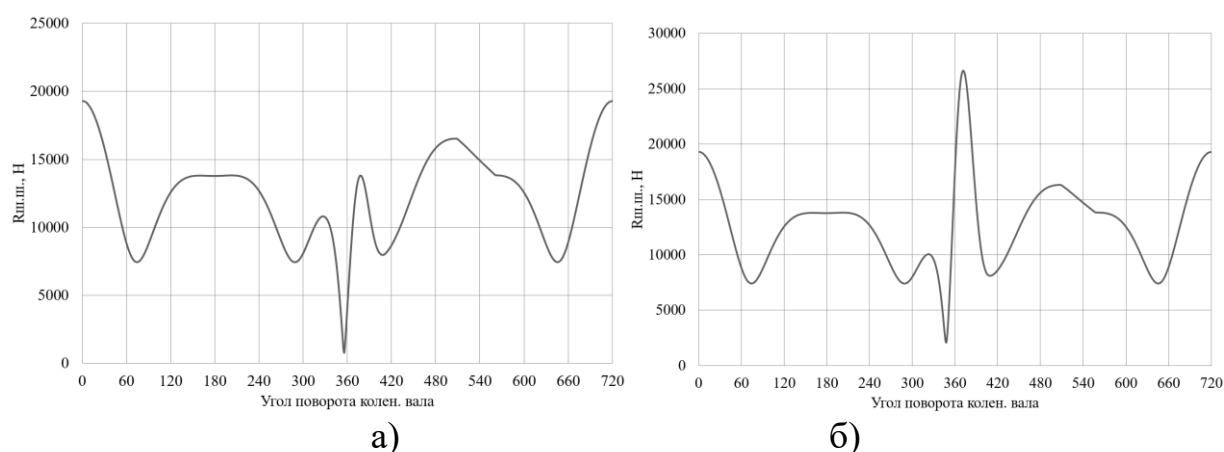
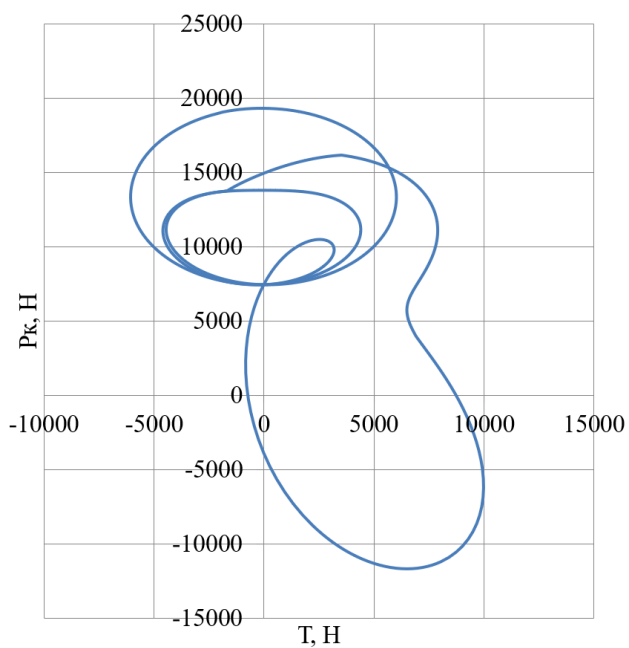


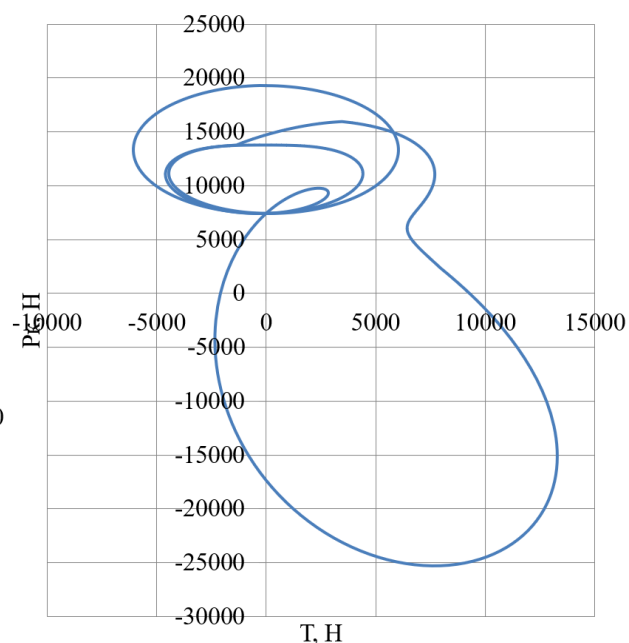
Рисунок 13 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку при работе (а) на бензине и (б) на КПГ=98% и водород 2%

На рисунке 14 приведено сравнение суммарной силы, действующую на шатунную шейку в полярных координатах. И здесь как видим величина изменения вида нагрузок на шатунную шейку при изменении вида топлива также весьма существенны.





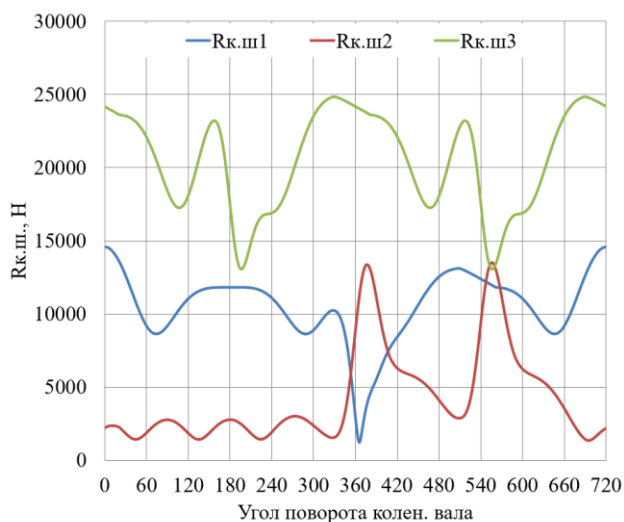
а)



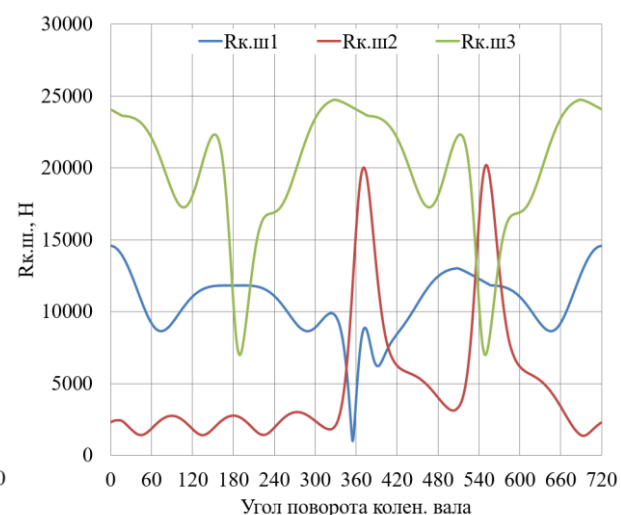
б)

Рисунок 14 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку в полярных координатах при работе (а) на бензине и (б) на КПГ=98% и водород 2%

На рисунке 15 приведено сравнение суммарных сил, действующих на коренные шейки в прямоугольных координатах.



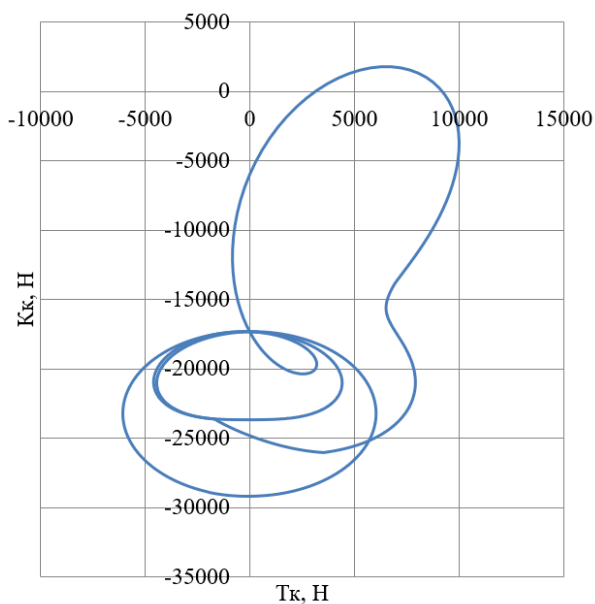
а)



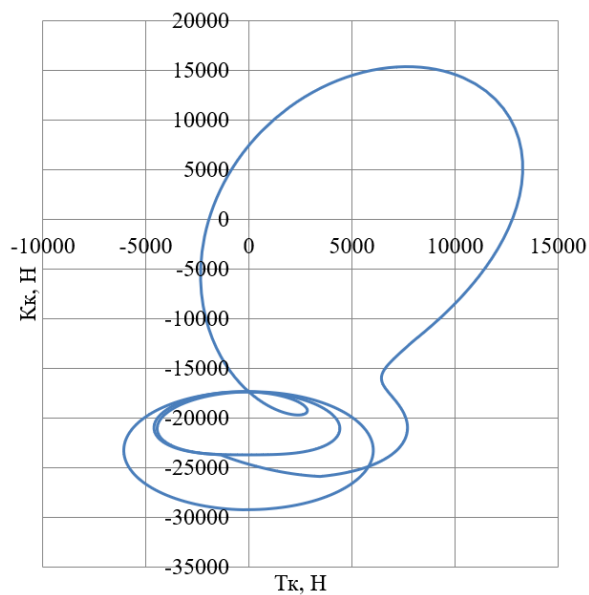
б)

Рисунок 15 – Суммарные силы, действующие на коренные шейки в прямоугольных координатах при работе (а) на бензине и (б) на КПГ=98% и водород 2%

На рисунке 16 приведено сравнение суммарных сил, действующих на 1-ю коренную шейку в полярных координатах.



а)



б)

Рисунок 16 – Суммарные силы, действующие на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при работе (а) на бензине и (б) на КПГ=98% и водород 2%

#### Выводы по 3-му разделу

По результатам динамического расчета получено, что при добавке водорода в компримированный природный газ происходит увеличение нагрузки на элементы кривошипно-шатунного механизма. Так суммарные силы, действующие на поршневой палец, возросли на 20,4% при добавке 2% водорода в КПГ и на 16,5 % при добавке 5% водорода.

Обобщая полученные результаты, можно сказать о необходимости увеличивать прочностные характеристики элементов КШМ при увеличении степени сжатия с 11 до 15 и переходе на низкоуглеродное газовое топливо.

## 4 Анализ термодинамических и эффективных показателей адаптированного двигателя на работу на низкоуглеродном топливе

### 4.1 Анализ термодинамических показателей адаптированного двигателя на работу на низкоуглеродном топливе

Сравнивая величины максимального давления в цилиндре двигателя (рисунок 17), следует отметить, что при работе на КПГ=98% и водород 2% и степенью сжатия 15, против 11 у базового варианта, происходит повышение почти на 3 МПа максимальное давление, но в тоже время максимальная температура повышается в среднем всего на 40 ° С, что говорит о незначительном росте концентрации оксидов азота в отработавших газах, при том что за счет газовых свойств мы имеем более низкие выбросы по продуктам неполного сгорания.

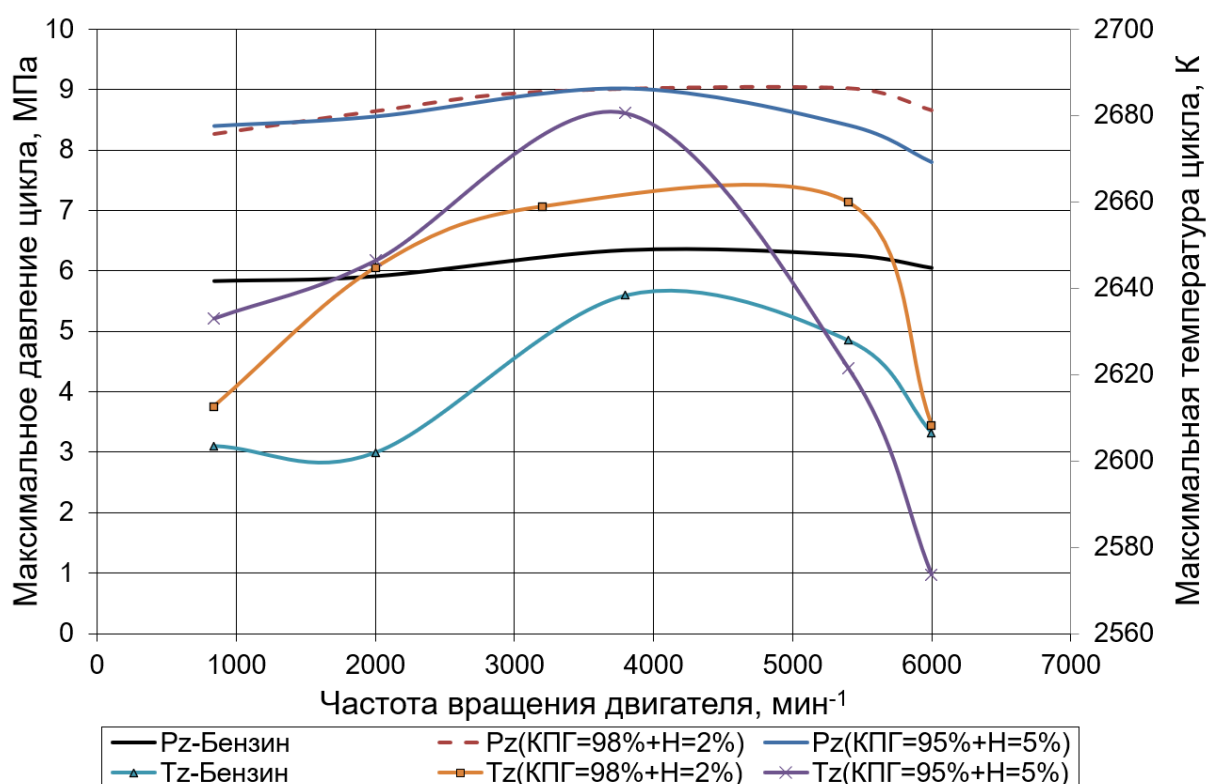


Рисунок 17 – Сравнение величины максимального давления в цилиндре двигателя для исследуемых топлив

Для оценки токсичности проведем сравнение изменения температуры в процессе сгорания (рисунки 18 – 22).

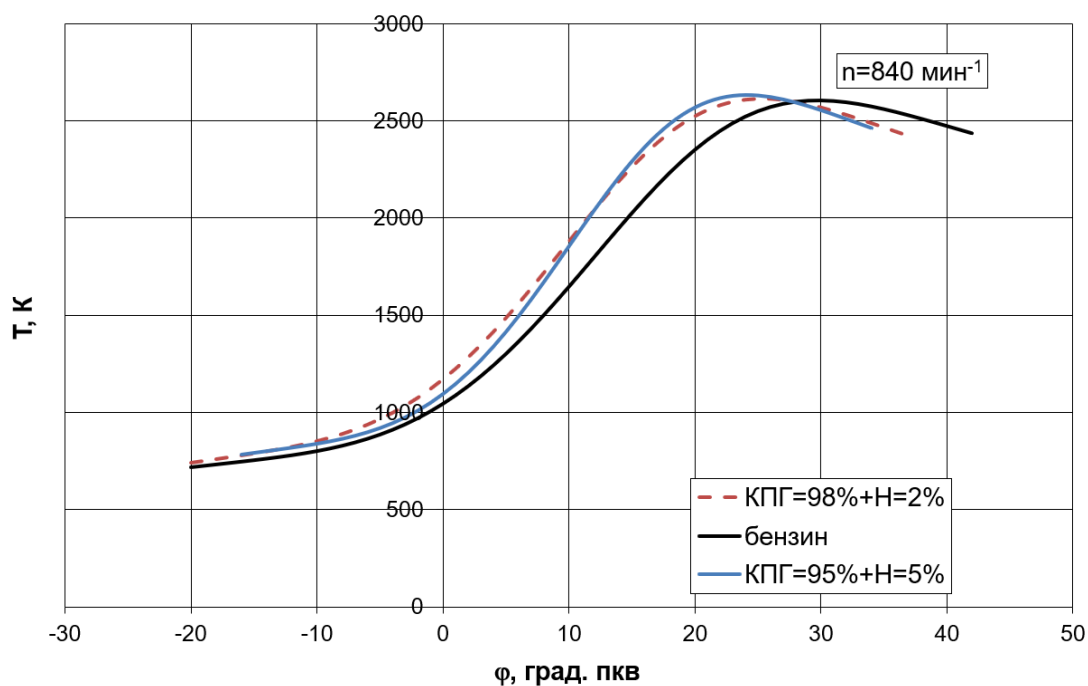


Рисунок 18 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 840 мин<sup>-1</sup>

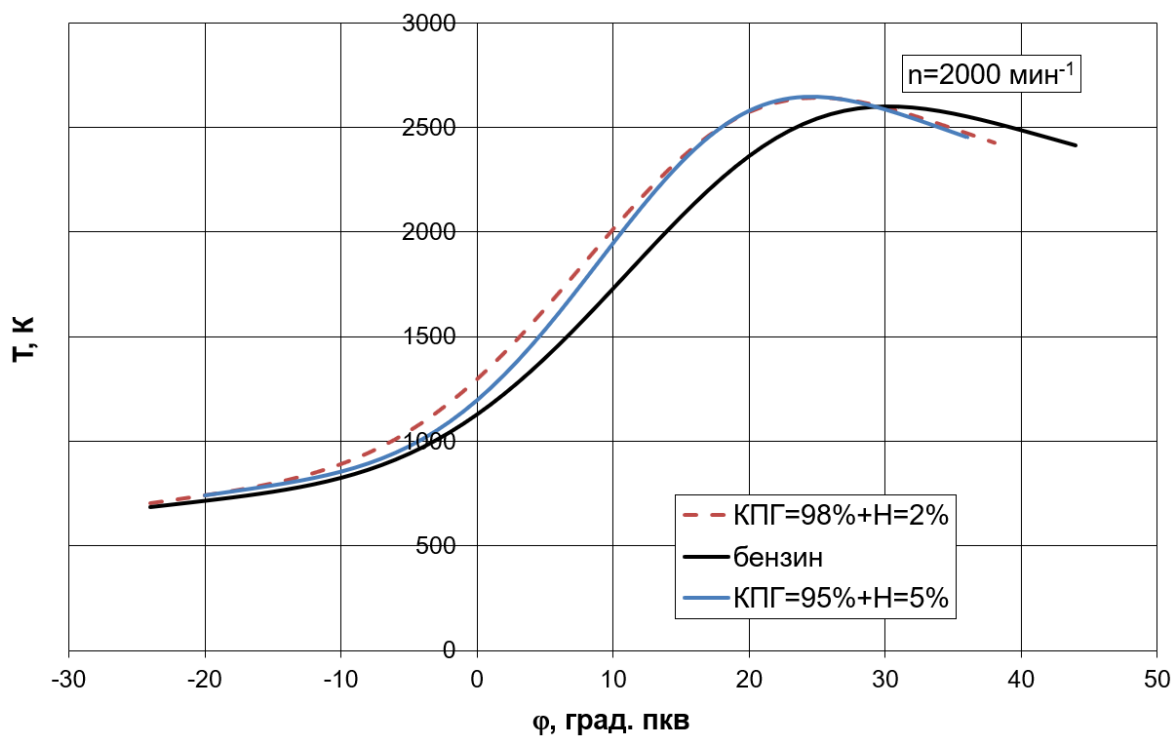


Рисунок 19 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 2000 мин<sup>-1</sup>

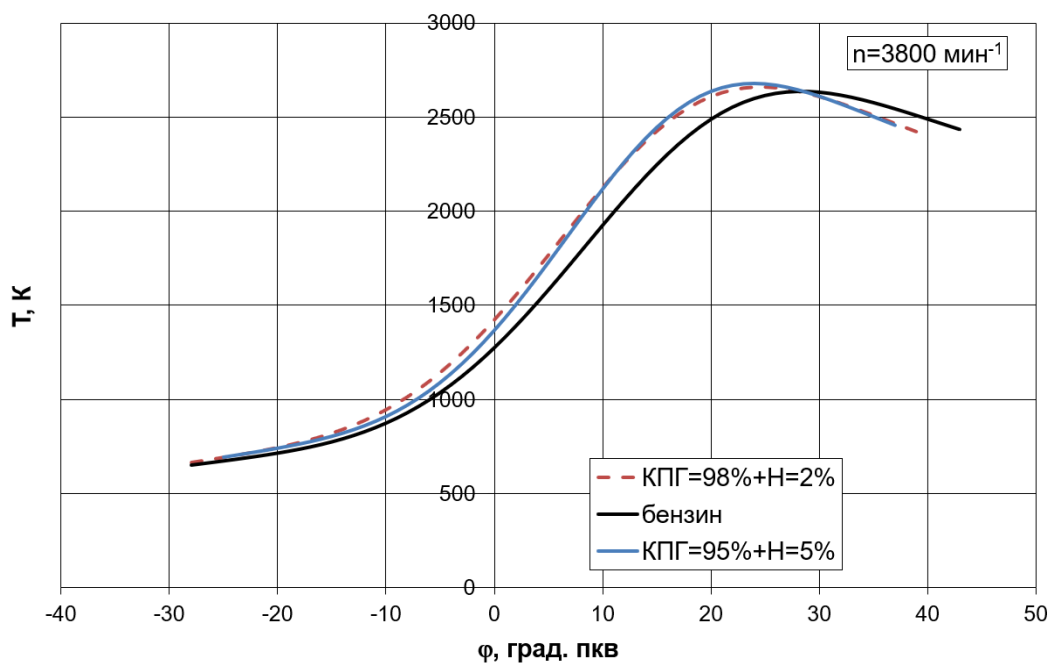


Рисунок 20 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима  $3800 \text{ мин}^{-1}$

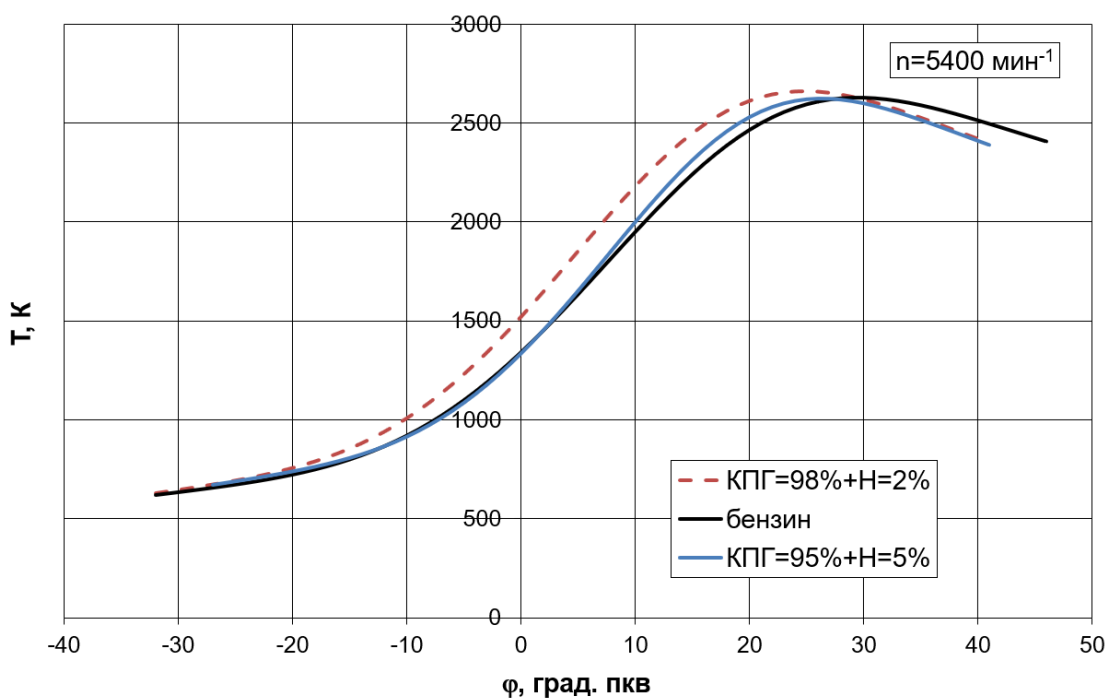


Рисунок 21 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима  $5400 \text{ мин}^{-1}$

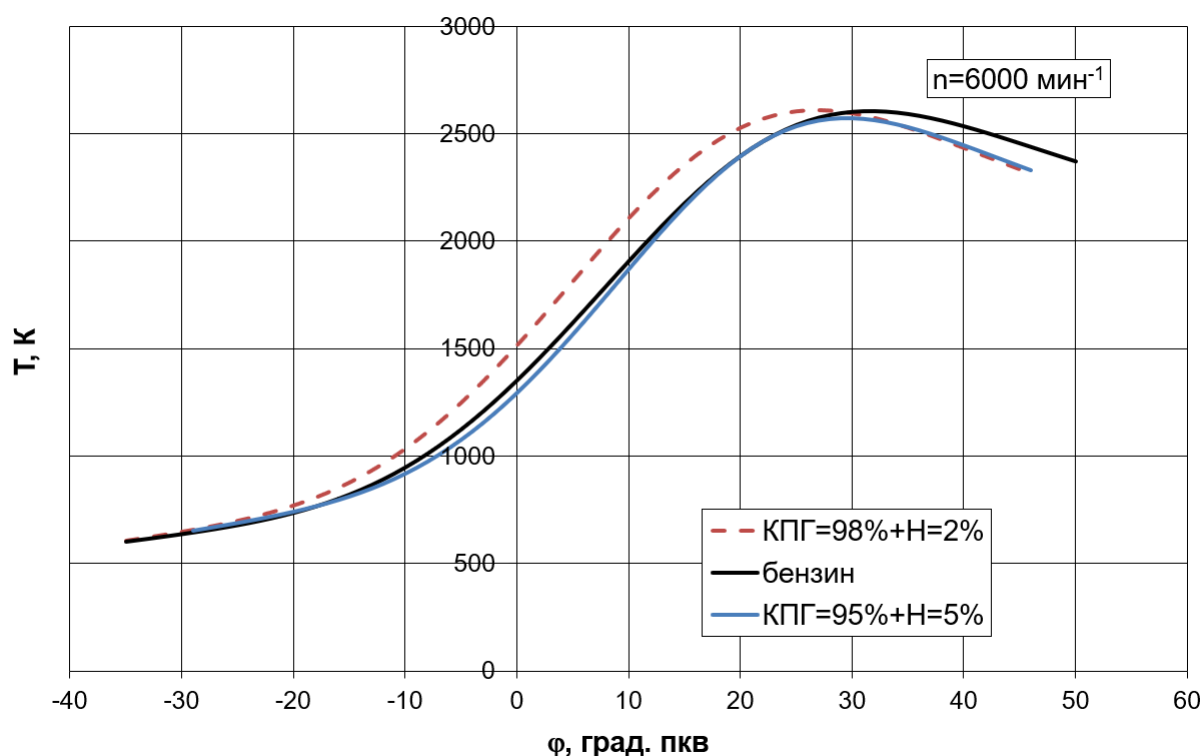


Рисунок 22 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима  $6000 \text{ мин}^{-1}$

Проводя анализ средней температуры в цилиндре двигателя во время сгорания по рисункам 18 – 22, можно отметить, что максимальная температура соответствует рабочему процессу на КПГ=95% и водород 5% за счет более быстрого сгорания. При увеличении угла опережения зажигания при работе на бензине, мы тоже можем получить рост температуры и давления.

#### 4.2 Анализ эффективных показателей адаптированного двигателя на работу на низкоуглеродном топливе

Проводить анализ эффективных показателей работы двигателя правильнее всего по графическому изображению внешней скоростной характеристики (рисунки 23, 24 и 25).

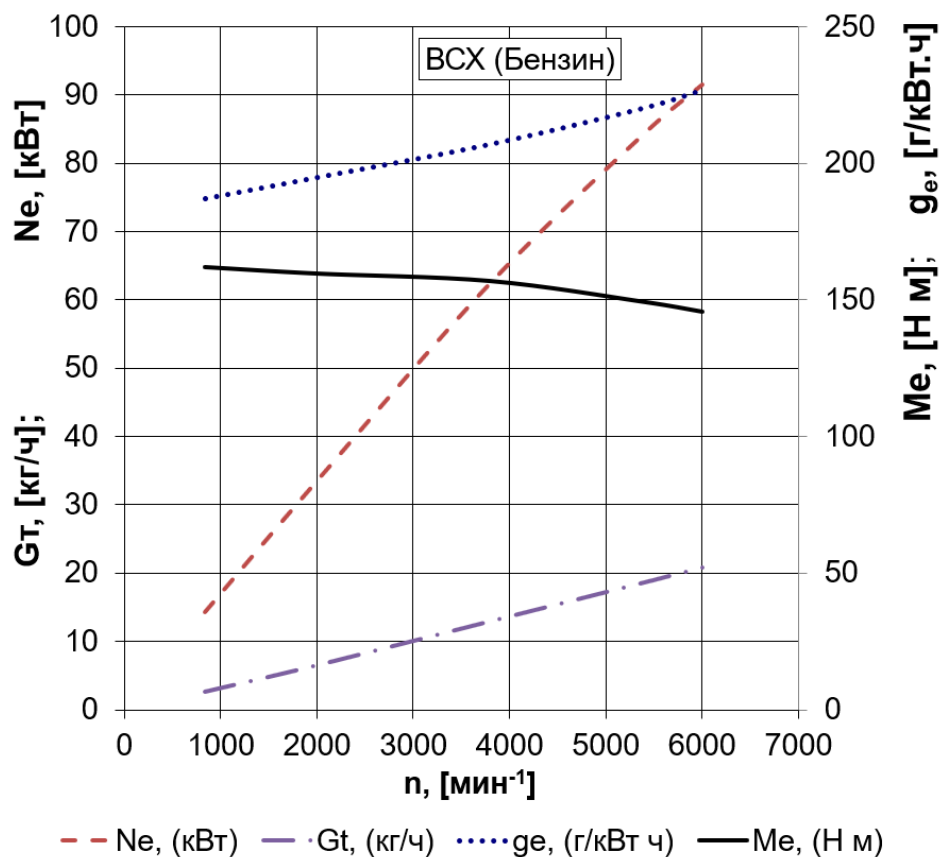


Рисунок 23 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с искровым зажиганием при работе на бензине

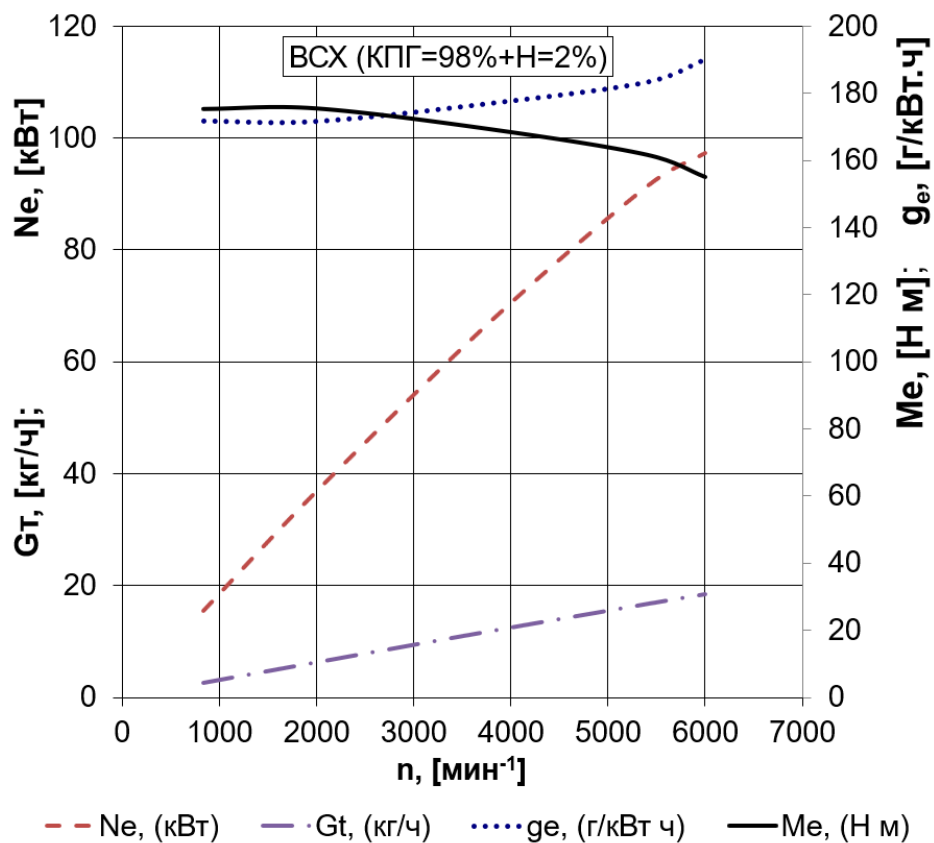


Рисунок 24 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с искровым зажиганием при работе на КПГ

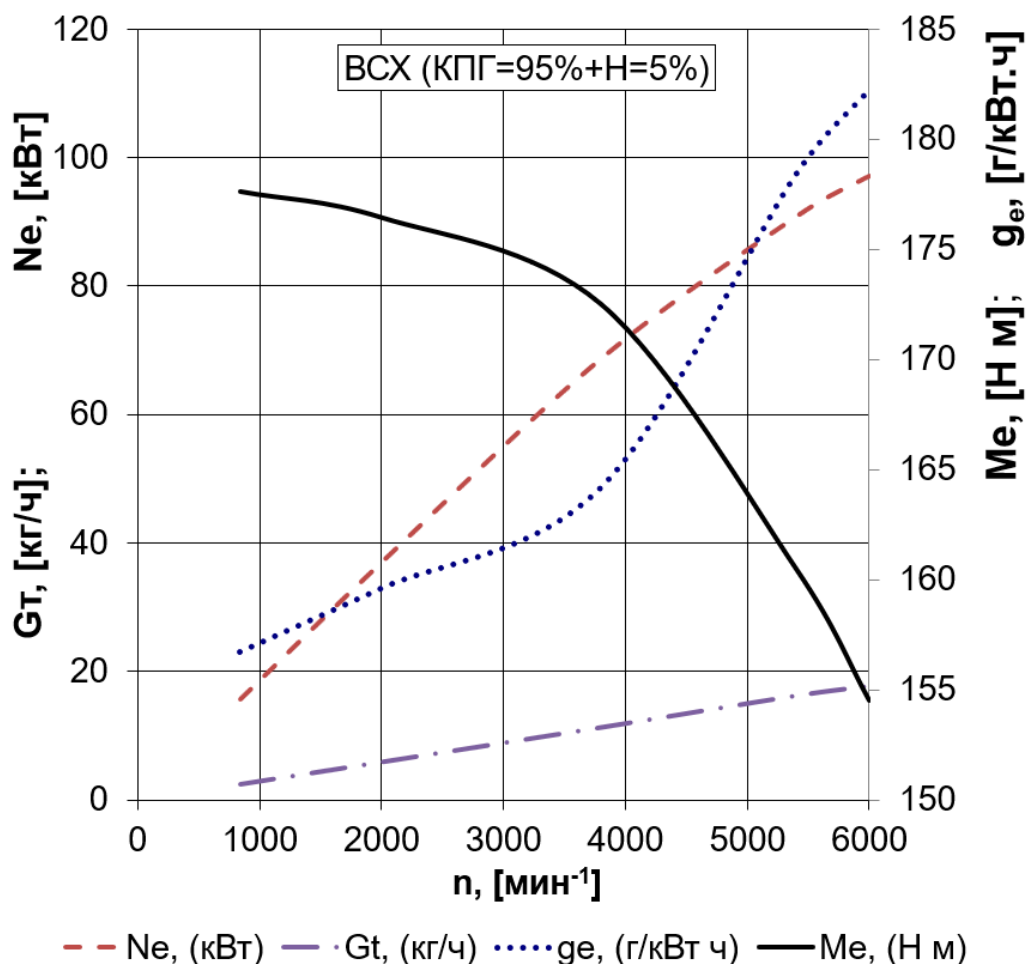


Рисунок 25 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с искровым зажиганием при работе на КПГ

Из графиков внешней скоростной характеристики видно наличие высоких крутящих моментов на низких частотах вращения. Особенно это заметно для условий работы на бензине, где видно, что крутящий момент с ростом оборотов падает на 20%.

#### Выводы по 4-му разделу

Проведенный анализ показал, что максимальная температура и давление при работе на КПГ=98% и водород 2% увеличилась в среднем на 0,8% или 12 градусов и 43% или 2,4 МПа, а при работе на КПГ=98% и водород 2% на 0,6% и 38,8% соответственно. Показано улучшение мощностных и эффективных показателей работы двигателя.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе проведена анализ перспективности применения низкоуглеродного топлива в двигателе с искровым зажиганием, выполнены все необходимые расчеты и проведено конструирование предложенного объекта. Получены основные выводы по работе:

1. Октановое число и следовательно допустимая степень сжатия отличаются на несколько единиц, так в среднем степень сжатия бензинового двигателя составляет 11-12, а для двигателя на сжатом природном газе 14-16, что является существенной разницей при организации рабочего процесса.
2. Холодный пуск на газовом топливе требует системы подогрева газа.
3. В настоящее время использование автомобилей, полностью конвертированных на газ затруднено малым количеством автогазозаправочных станций.
4. Анализ расчетов показал следующие результаты:
  - мощность и крутящий момент возросли при работе на КПП с 2% водорода в среднем на 8,1%, а при работе на КПП с 5% водорода в среднем на 8,7%;
  - эффективный КПД двигателя увеличился при работе на КПП с 2% водорода в среднем на 8,5%, а при работе на КПП с 5% водорода в среднем на 10,7%;
  - удельный эффективный расход топлива снизился при работе на КПП с 2% водорода в среднем на 13,5%, а при работе на КПП с 5% водорода в среднем на 18,7%.
  - максимальная температура и давление при работе на КПП=98% и водород 2% увеличилась в среднем на 0,8% или 12 градусов и 43% или 2,4 МПа, а при работе на КПП=98% и водород 2% на 0,6% и 38,8% соответственно. Показано улучшение мощностных и эффективных показателей работы двигателя.

## Выводы по 1-му разделу

Применение низкоуглеродного газового топлива на серийных автомобилях является большой проблемой для автопроизводителей, так как условия эффективного сгорания низкоуглеродного газового топлива и бензина в двигателе с искровым зажиганием значительно отличаются, а именно:

- Октановое число и следовательно допустимая степень сжатия отличаются на несколько единиц, так в среднем степень сжатия бензинового двигателя составляет 11-12, а для двигателя на сжатом природном газе 14-16, что является существенной разницей при организации рабочего процесса.
- Холодный пуск на газовом топливе требует системы подогрева газа.
- В настоящее время использование автомобилей, полностью конвертированных на газ затруднено малым количеством автогазозаправочных станций.
- Природный газ снижает наполняемость цилиндра, что ведет к снижению мощностных показателей работы двигателя.

## Выводы по 2-му разделу

Тепловой расчет показал, что после адаптации на работу с низкоуглеродным топливом мощностные и экономические характеристики работы изменились следующим образом:

- Мощность и крутящий момент возросли при работе на КПП с 2% водорода в среднем на 8,1%, а при работе на КПП с 5% водорода в среднем на 8,7%;
- Эффективный КПД двигателя увеличился при работе на КПП с 2% водорода в среднем на 8,5%, а при работе на КПП с 5% водорода в среднем на 10,7%;
- Удельный эффективный расход топлива снизился при работе на КПП с 2% водорода в среднем на 13,5%, а при работе на КПП с 5% водорода в среднем на 18,7%.

Для обоих составов топлива наблюдается положительная динамика улучшения результатов, но в связи с высокой стоимостью водорода, более предпочтительно выглядит добавка 2%

#### Выводы по 3-му разделу

По результатам динамического расчета получено, что при добавке водорода в компримированный природный газ происходит увеличение нагрузки на элементы кривошипно-шатунного механизма. Так суммарные силы, действующие на поршневой палец, возросли на 20,4% при добавке 2% водорода в КПГ и на 16,5 % при добавке 5% водорода.

Обобщая полученные результаты, можно сказать о необходимости увеличивать прочностные характеристики элементов КШМ при увеличении степени сжатия с 11 до 15 и переходе на низкоуглеродное газовое топливо.

#### Выводы по 4-му разделу

Проведенный анализ показал, что максимальная температура и давление при работе на КПГ=98% и водород 2% увеличилась в среднем на 0,8% или 12 градусов и 43% или 2,4 МПа, а при работе на КПГ=98% и водород 2% на 0,6% и 38,8% соответственно. Показано улучшение мощностных и эффективных показателей работы двигателя.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вибе, И.И. Уточненный тепловой расчет двигателя / И.И. Вибе// М. Машиностроение, 1971. - с.282
2. ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Общие требования и правила составления. – Москва: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 47 с.
3. Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей / А.И. Колчин, В.П. Демидов // Учебное пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Высшая школа 1980. - с.496.
4. Орлин А.С., Круглов М.Г. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей. – М.: «Машиностроение», 1983.
5. Смоленский, В.В. Автомобильные двигатели: курс лекций / В.В. Смоленский. – Тольятти: ТГУ, 2009. – 183 с.
6. Akmandor, I.S. Novel Thermodynamic Cycle / I.S. Akmandor, N. Ersöz// PTC, WO, 2004. 022919 A1. (March 18th 2004)
7. Alamia, A.; Magnusson, I.; Johnsson, F.; Thunman, H. Well-to-wheel analysis of bio-methane via gasification, in heavy duty engines within the transport sector of the European Union. Appl. Energy 2016, 170, 445–454.
8. Alfredas Rimkus, Tadas Vipartas, Donatas Kriauciunas, Jonas Matijošius and Tadas Ragauskas «The Effect of Intake Valve Timing on Spark-Ignition Engine Performances Fueled by Natural Gas at Low Power» / Energies 2022, 15, 398. doi.org/10.3390/en15020398
9. Ammenberg, J.; Anderberg, S.; Lönnqvist, T.; Grönkvist, S.; Sandberg, T. Biogas in the transport sector: Actor and policy analysis focusing on the demand side in the Stockholm region. Resour. Conserv. Recycl. 2018, 129, 70.
10. Baumeister, T. Mark's Standard Handbook for M. Engineer / T Baumeister // McGraw- Hill Inc., New York, 1966.

11. Beran, R. Entwicklung des H17/24G - Demerstenkoreanischen Gasmotor / R. Beran, T. Baufeld, H. Philipp, J. T. Kim, J. S.Kim // in: 11. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors. Graz. 2007
12. Beran, R., Baufeld, T., Philipp, H., Kim, J. T., Kim, J. S.: Entwicklung des H17/24G - Dem ersten koreanischen Gasmotor. in: 11. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors. Graz. 2007
13. Bonnevie-Svendsen, A. Double-Vibe-Model for heat release in lean burn gas engines with prechamber ignition /A. Bonnevie-Svendsen, K. Boulouchos, Ch. Lämmle, I. Vlakos // in: 6. Dessauer Gasmotoren-Konferenz. Dessau-Roßlau. 2009
14. Bonnevie-Svendsen, A., Boulouchos, K., Lämmle, Ch., Vlakos, I.: Double-Vibe-Model for heat release in lean burn gas engines with prechamber ignition. in: 6. Dessauer Gasmotoren-Konferenz. Dessau-Roßlau. 2009
15. Carbot-Rojas, D. A survey on modeling, biofuels, control and supervision systems applied in internal combustion engines /D.A. Carbot-Rojas , R.F. Escobar-Jiménez, J.F. Gómez-Aguilar, A.C. Téllez-Anguiano // Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Michoacán, CP 58120, Mexico 2017-PP.21-26
16. Cinzia Tornatore, Luca Marchitto, Maria Antonietta Costagliola and Gerardo Valentino « Experimental Comparative Study on Performance and Emissions of E85 Adopting Different Injection Approaches in a Turbocharged PFI SI Engine» / Energies 2019, 12, 1555; doi:10.3390/en12081555
17. Clarke, J. M. Thermodynamic Cycle Requirements for Very High Rotational Efficiencies / J. M. Clarke // J. Mech. Eng. Sci. 1974
18. Defu, Z., Qingping, Z. Investigation on the Combustion Characteristics of the Compression Ignition Divided Chamber Combustion System of the Natural Gas Engine. in: CIMAC Congress. Wien. 2007.

19. Duranti, A. *Ethnography of Speaking: Toward a Linguistics of praxis* / A. Duranti // *Linguistics: The Cambridge Survey*. – Cambridge, 1988. – PP. 210-228.
20. Fuller, D.D. *Theory and Practice of Lubrication for Engineers* / D.D. Fuller // John Wiley & Sons Inc., New York, 1966
21. Haywood, R.W. *A Critical Review of Theorems of Thermodynamics Availability* // R.W. Haywood / *J. Mech. Eng. Sci.* vol.16 MIT Press, 1970.
22. Heinz, C. Mittermayer, F., Sattelmayer, T.: *Investigation of a Novel Pre-Chamber-Concept for Lean Premixed Combustion in Large Bore Gas Motors*. Projektplakat. Technische Universität München. 2005
23. Huan,L.*Study of air fuel ratio on engine performance of direct injection hydrogen fueled engine* / L. Huan //Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Pahang, 26600 Pekan, Pahang, Malaysia 2016-PP.13-21
24. Jensen, S.S.; Winther, M.; Jørgensen, U.; Møller, H.B. *Scenarios for Use of Biogas for Heavy-Duty Vehicles in Denmark and Related GHG Emission Impacts*; Trafikdage: Aalborg, Denmark, 2017.
25. Lönnqvist, T.; Sanches-Pereira, A.; Sandberg, T. *Biogas potential for sustainable transport—a Swedish regional case*. *J. Clean. Prod.* 2015, 108, 1105–1114.
26. Lyng, K.A.; Brekke, A. *Environmental Life Cycle Assessment of Biogas as a Fuel for Transport Compared with Alternative Fuels*. *Energies* 2019, 12, 532.
27. Moteki K, Aoyama S, Ushijima K, Hiyoshi R, Takemura S, Fujimoto H, et al. *A study of a variable compression ratio system with a multi-link mechanism*. SAE Paper No. 2003-01-0921. Warrendale PA, USA: SAE International; 2003
28. Osama H. Ghazal, Gabriel Borowski « *Use of Water Injection Technique to Improve the Combustion Efficiency of the Spark-Ignition Engine: A Model Study*»/ *Journal of Ecological Engineering* Vol. 20(2), 2019. - 226–233. – doi.org/10.12911/22998993/99689

29. Paolo Iodice, Amedeo Amoresano, Giuseppe Langella «A review on the effects of ethanol/gasoline fuel blends on NOX emissions in spark-ignition engines» / *Biofuel Research Journal* 32 (2021) 1465-1480. DOI: 10.18331/BRJ2021.8.4.2
30. Renegar, D.C. The Quasiturbine / D.C. Renegar // USA Patent No:6629065 September 12th 2003
31. Rory, R. D. The Ball Piston Engine: A New Concept in High Efficient Power Machines / R. D. Rory // Convergence Eng. Corporation.
32. Shaik A, Shenbaga Vinayaga Moorthi N, Rudramoorthy R. Variable compression ratio engine: A future power plant for automobiles—An overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IMEchE); Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2007;221(D9):1159-1168
33. Stephen, R. T. *An Introduction to Combustion* / R.T.Stephen // McGraw-Hill Series in Mech. Eng. 1996.
34. Thomasson, A. Co-Surge in Bi-Turbo Engines - Measurements, Analysis and Control / Thomasson A, Eriksson L. // *Control Engineering Practice*, (32) 2014, 113-122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.08.001>  
Copyright: Elsevier
35. Verhelst, S. A critical review of experimental research on hydrogen fueled SI engines / S. Verhelst, R. Sierens, S. Verstraeten // SAE. - 2006. - №2006-01-0430.
36. Wonjae Choi, Han Ho Song «Composition-considered Woschni heat transfer correlation: Findings from the analysis of over-expected engine heat losses in a solid oxide fuel cell-internal combustion engine hybrid system» / *Energy* 203 (2020) 117851: [doi.org/10.1016/j.energy.2020.117851](https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117851)
37. Woś P, Balawender K, Jakubowski M, Kuszewski H, Lejda K, Ustrzycki A. Design of Affordable Multi-Cylinder Variable Compression Ratio (VCR) Engine for Advanced Combustion Research Purposes. SAE Paper No. 2012-01-0414. Warrendale PA, USA: SAE International; 2012