

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 Перспективы применения добавки водорода в бензиновых ДВС с искровым  
зажиганием

Студент

Р. Ш. Ибрагимов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент В.В. Смоленский

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

Тольятти 2021

## АННОТАЦИЯ

Повышение эффективности рабочего процесса в бензиновых двигателях при снижении токсичности отработавших газов является актуальной задачей исследования. Многими исследователями показано, что основными режимами, снижающими эффективность работы двигателя, являются режимы глубокого дросселирования. Поэтому в бакалаврской работе представлен способ повышения эффективности рабочего процесса в бензиновом двигателе с помощью применения добавки водорода, позволяющей активировать процесс сгорания и повысить его эффективность.

Цель работы – выявление перспективы применения добавки водорода в бензиновых ДВС с искровым зажиганием

Поэтому в данном бакалаврской работе представлены результаты проектирования бензинового двигателя с системой подачи водорода для повышения эффективности процесса сгорания. Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка состоит из аннотации, введения, 4 разделов, заключения с основными результатами и выводами, содержит 40 рисунков, 13 таблиц, списка использованных источников (33 источников). Основной текст изложен на 58 страницах.

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

## **ABSTRACT**

Improving the efficiency of the working process in gasoline engines while reducing the toxicity of exhaust gases is an urgent research task. Many researchers have shown that the main modes that reduce the efficiency of the engine are deep throttling modes. Therefore, in the bachelor's work, a method is presented to increase the efficiency of the working process in a gasoline engine by using a hydrogen additive, which makes it possible to activate the combustion process and increase its efficiency.

The purpose of the work is to identify the prospects for the use of hydrogen additives in gasoline internal combustion engines with spark ignition.

Therefore, this bachelor's work presents the results of designing a gasoline engine with a hydrogen supply system to improve the efficiency of the combustion process. The bachelor's work consists of an explanatory note and a graphic part.

The explanatory note consists of an annotation, an introduction, 4 sections, a conclusion with the main results and conclusions, contains 40 figures, 13 tables, a list of sources used (33 sources). The main text is presented on 58 pages.

The graphic part of the work contains 8 sheets of A1 format illustrating the material presented in the explanatory note.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Анализ состояния вопроса.....	7
1.1 Особенности сгорания ТВС при добавке водорода.....	7
1.2 Работа двигателя на двойном топливе .....	8
1.3 Рассмотрим результаты известных исследований по влиянию водорода на процесс сгорания в бензиновом ДВС.....	9
2 Тепловой расчет проектируемого двигателя .....	17
3 Кинематический и динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя .....	26
3.1 Кинематический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя.....	26
3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя	28
4 Анализ влияния добавки водорода в бензовоздушную смесь на рабочий процесс ДВС с искровым зажиганием .....	39
4.1 Влияние добавки водорода в бензовоздушную смесь на рабочий процесс ДВС с искровым зажиганием на максимальную температуру и давление цикла.....	39
4.2 Влияние добавки водорода в бензовоздушную смесь на рабочий процесс ДВС с искровым зажиганием на эффективные показатели цикла .....	47
Заключение .....	52
Список используемых источников.....	55

## ВВЕДЕНИЕ

В 1920-х годах Рикардо [7] использовал водород в одноцилиндровом двигателе с переменной степенью сжатия и наблюдал интенсивный стук и обратную вспышку в коллекторе. Позже Эррен и Кэмпбелл [8] использовали метод прямого впрыска водорода в камеру сгорания во время такта сжатия, чтобы исключить обратную вспышку, но детонация все еще была серьезной проблемой. Затем, в 1942 году, Оемичен [9] провел дальнейшие исследования и пришел к выводу, что водород имеет очень низкую стойкость к детонации; однако привлекательность водорода сохранялась, поскольку сообщалось о повышении термического КПД.

Многие из этих ранних усилий были резюмированы Л.М. Дасом в статье, озаглавленной «Взгляд в прошлое и взгляд в будущее» [10]. Большинство из них сталкивались с проблемами сгорания водородно-воздушных смесей. Возгорание часто возникает во время такта впуска. Когда впускной клапан открывается, топливно-воздушные смеси вступают в контакт с горячими точками, и воспламенение смеси может происходить во впускном коллекторе. Предварительное зажигание определяется как самовоспламенение, которое происходит без искры. Это явление обычно возникает в водородных двигателях из-за низкой энергии воспламенения водорода и возникновения воспламенения из внутренних горячих точек. Детонация – это явление, возникающее в результате теплового воспламенения в одной части двигателя, в то время как искровое зажигание топливно-воздушной смеси происходит в другой.

Эффективность двигателя внутреннего сгорания (ДВС) ограничена степенью сжатия двигателя. Чтобы значительно повысить КПД двигателя, требуется увеличение степени сжатия. Повышенная степень сжатия приводит к увеличению максимальной температуры в цилиндре. Поскольку образование  $\text{NO}_x$  тесно связано с температурой газа в цилиндрах,

повышенная температура в цилиндрах приводит к соответствующему увеличению производства  $\text{NO}_x$ .

Растущие уровни парниковых газов, пик добычи нефти, более высокие мировые цены на нефть и ограничение на повышение теплового КПД ДВС создали потребность в альтернативной топливной энергетической системе. В результате исследователи сосредоточили внимание на водороде. Его свойства делают его отличным кандидатом для использования в качестве моторного топлива. Водород можно получить несколькими способами, такими как электролиз воды, природный газ и газификация угля. При сжигании водорода на воздухе образуется только вода и некоторые оксиды азота (при сжигании обедненной смеси). Недавние исследования показывают, что желаемые характеристики горения водорода делают его наиболее вероятным кандидатом на замену нефтяного топлива (Azar et al., 2003). Хотя многие утверждают, что создание экономики, основанной на водороде, все еще далеко, переход на обычное топливо с использованием водорода представляет собой жизнеспособное среднесрочное решение для перехода к этой новой экономике.

## 1 Анализ состояния вопроса

### 1.1 Особенности сгорания ТВС при добавке водорода

В качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания водород оказался очень взрывоопасным веществом, поэтому необходимо учитывать безопасность. Из-за низкой энергии зажигания преждевременное зажигание является серьезной проблемой. Небольшое расстояние гашения водородом позволяет пламени проходить через узкие отверстия (впускные и выпускные клапаны всегда создают такие отверстия), и возникает обратное пламя во впускной коллектор. Детонация двигателя стехиометрическими или богатыми смесями - еще один аспект, который, по-видимому, довольно часто встречается в двигателях, работающих на чистом водороде. Но эта же характеристика позволяет работать с бензиновым двигателем, обогащенным водородом, в крайне обедненных условиях без детонации, обратного воспламенения или пропусков зажигания [4]. Многие экспериментальные и теоретические исследования были выполнены с использованием водорода в качестве топлива для двигателей с искровым зажиганием.

В таблице 1 представлены некоторые характеристики этих альтернативных видов топлива. Большинство из них являются углеводородами и, следовательно, будут производить некоторое количество оксида углерода, диоксида углерода, углеводородов и оксидов азота. Единственное исключение - водород, который производит только выбросы  $\text{NO}_x$ . Можно использовать природный газ, который представляет собой комбинацию 90%  $\text{CH}_4$  и 10% этана ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) в зависимости от источника. Сжимая природный газ до высокого давления, это топливо можно хранить в резервуарах и безопасно транспортировать. Природный газ действительно горит чисто, а количество углеводородов и оксида углерода уменьшается, хотя количество  $\text{NO}_x$ , вероятно, остается прежним.

Таблица 1 – Характеристики топлива водорода, пропана, метанола, этанола, метана и бензина, [5,49, 52, 54]

Характеристики топлива	Водород H <sub>2</sub>	Пропан C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Метанол CH <sub>3</sub> OH	Этанол C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Метан CH <sub>4</sub>	Бензин C <sub>8</sub> H <sub>15</sub>
Молекулярный вес	2,016	44,097	32,042	46,069	16,043	-110,0
Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	0,09	1,97	787	783	0,716	748,5
Нижняя теплота сгорания (МДж/г)	119,93	46,4	20	26,9	50,02	44
Высшая теплота сгорания (МДж/г)	141,86	50,4	22,7	29,7	55,53	47,3
Диапазон горения на воздухе (об.%)	0,4-75	2,1-9,5	6,7-36	3,3-19	5,0-15	1,3-7,1
Дальность детонации в воздухе (Vbl%)	18,3-59	-	-	-	63-13,15	1,1-3,3
Стехиометрическое соотношение A / F (кг/кг)	34,3	15,67	6,47	9	17,23	14,6
Мин. энергия зажигания (МДж)	0,02	0,25	-	-	0,28	0,25
Температура самовозгорания	400	458	385	365	540	440
Температура адиабатического пламени °К	2384	2268	-	-	2227	2270
Максимум. скорости горения в воздухе (см/сек)	325	46,4	50,4	-	44,8	58,2
Коэффициент диффузии (см <sup>2</sup> /сек)	0,63	-	-	-	0,2	0,08

## 1.2 Работа двигателя на двойном топливе

Jingding и соавторы сообщили [43], что предел воспламеняемости карбюраторной бензиново-воздушной смеси может быть увеличен путем обогащения небольшим количеством водорода. Это позволяет увеличить скорость распространения пламени и увеличивает скорость горения смеси. В этом случае они заявляют, что выбросы CO на обедненной смеси на 20 раз ниже, чем при работе без добавления водорода при той же нагрузке. Тепловой КПД и, следовательно, экономия топлива системы улучшаются, а также снижается уровень загрязняющих веществ.

Аль-Джанаби и Аль-Багдади [44] провели несколько экспериментов по смешиванию водорода с бензином. При использовании бензина с 8%



энергии, обеспечиваемой смешиванием водорода, тепловой КПД двигателя был максимальным. При 10% -ной энергетической смеси выбросы CO снизились на 73,8%, но NO<sub>x</sub> увеличились на 100% по сравнению с работой на бензине. Однако выбросы NO<sub>x</sub> можно снизить за счет работы на обедненной смеси.

Две дополнительные работы этих же авторов расширили их экспериментальную работу на исследование двух дополнительных видов топлива к бензину [45]. Их работа проводилась на работающем бензиновом двигателе SI с двойным добавлением 4% водорода и 30% этилового спирта, что показывает улучшение характеристик двигателя и сокращение выбросов CO на 49% и выбросов NO<sub>x</sub>. Однако, если содержание этилового спирта превышает 30%, работа двигателя становится нестабильной.

Дальнейшее исследование [46] показало, что бензиновый двигатель, работающий с добавкой водорода и этилового спирта, улучшает характеристики и снижает выбросы. Аль-Багдади [47] сообщает, что работа бензинового двигателя с двойным добавлением водорода и этилового спирта улучшает характеристики двигателя и снижает выбросы NO<sub>x</sub>.

### **1.3 Рассмотрим результаты известных исследований по влиянию водорода на процесс сгорания в бензиновом ДВС**

Представленная концепция SI-двигателя состоит из комбинированного впрыска бензина и водорода. Водород впрыскивается дополнительно к бензину внутри двигателя через отдельную систему впрыска.

Основными элементами, делающими водород перспективным топливом, являются:

- Благодаря более низкой минимальной энергии воспламенения водорода может быть получено более стабильное воспламенение.
- Ламинарная скорость горения водорода выше, чем у бензина.

- Продолжительность сгорания водородного двигателя меньше, чем у бензинового, увеличивается доля сгорания постоянного объема и увеличивается тепловой КПД двигателя [14].
- Более высокий коэффициент диффузии водорода может улучшить процесс смешивания, что также может повысить эффективность двигателя и помочь произвести меньше несгоревших углеводородов.
- Более того, добавление водорода увеличивает предел обедненной смеси из-за его более низкого предела воспламеняемости в воздухе.
- Добавление водорода также приводит к повышению адиабатической температуры пламени в воздухе, что вызывает опасения по поводу выбросов  $\text{NO}_x$ .

Водород обладает множеством привлекательных внутренних свойств, которые делают его многообещающим топливом (таблица 2).

Таблица 2 – Свойства бензина и водорода

Свойства	Бензин	Водород
Молекулярная масса (г/моль)	110	2,015
Стехиометрическое соотношение топлива и воздуха (F/A)	14,6	34,3
Минимальная энергия зажигания (мДж)	0,24	0,02
Температура возгорания (К)	530	858
Температура адиабатического пламени (К)	2270	2384
Скорость пламени при 20 С (см/с)	41,5	237
Пределы воспламеняемости (об.% В воздухе)	1,5 / 7,6	4,1 / 75
Закалочный зазор (см)	0,2	0,06
Низшая теплота сгорания (МДж/кг)	44	120
Коэффициент диффузии при стехиометрическом	0,05	0,61

На рисунке 1 показано изменение эффективной мощности в зависимости от отношения воздух-топливо –  $\lambda$ . Видно значительное увеличение мощности при добавлении водорода. Когда коэффициент избытка воздуха увеличивается, можно увидеть уменьшение полезной мощности, но все же выше, чем мощность стандартного двигателя. Более

высокая эффективная мощность двигателя, получаемая за счет добавления водорода, обусловлена лучшими характеристиками сгорания водорода, более короткой продолжительностью сгорания, выделением тепла при циклическом горении, а также увеличением скорости тепловыделения.

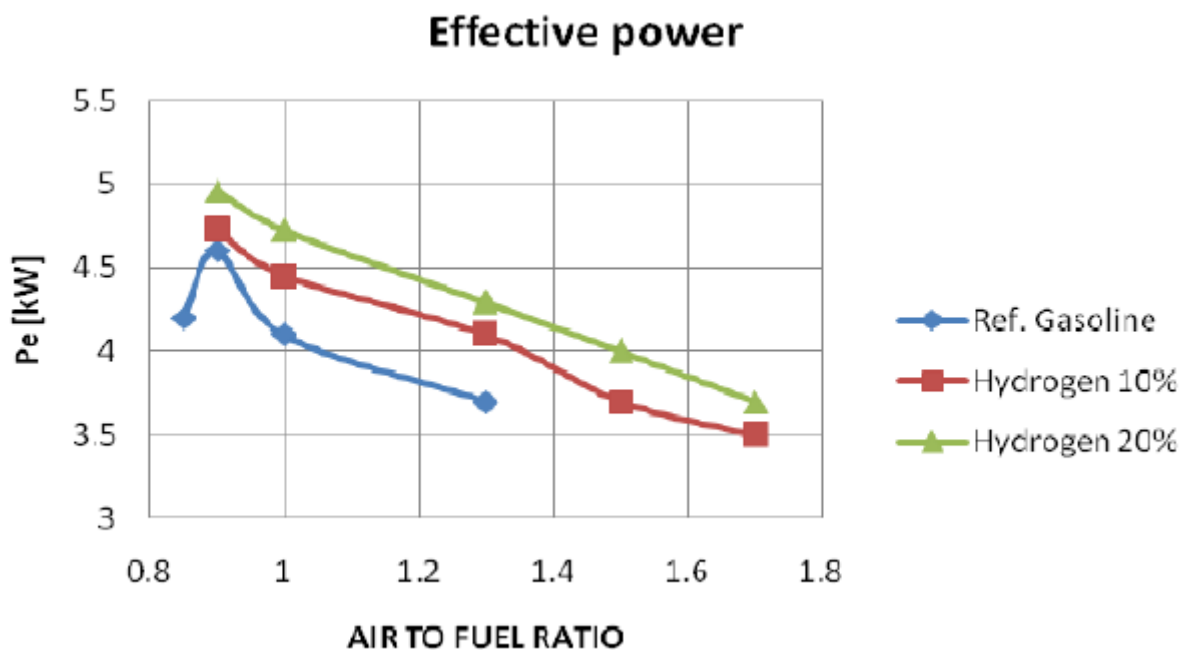


Рисунок 1 – Эффективная мощность в зависимости от отношения воздуха к топливу при 10% и 20% водорода

На рисунке 2 представлены значения, полученные для удельного расхода топлива энергетического торможения при  $3000 \text{ мин}^{-1}$  и стехиометрическом соотношении воздух-топливо. Влияние добавления водорода приводит к снижению удельного расхода топлива. По сравнению с бензиновым двигателем EBSFC меньше для заправки водородом за счет улучшения сгорания (лучшего качества топливоздушная смеси и лучших горючих свойств). Работа бензинового двигателя с соотношением воздух-топливо выше 1,3 практически невозможна, но при добавлении водорода его работа становится возможной в области очень бедных смесей (до 1,7).

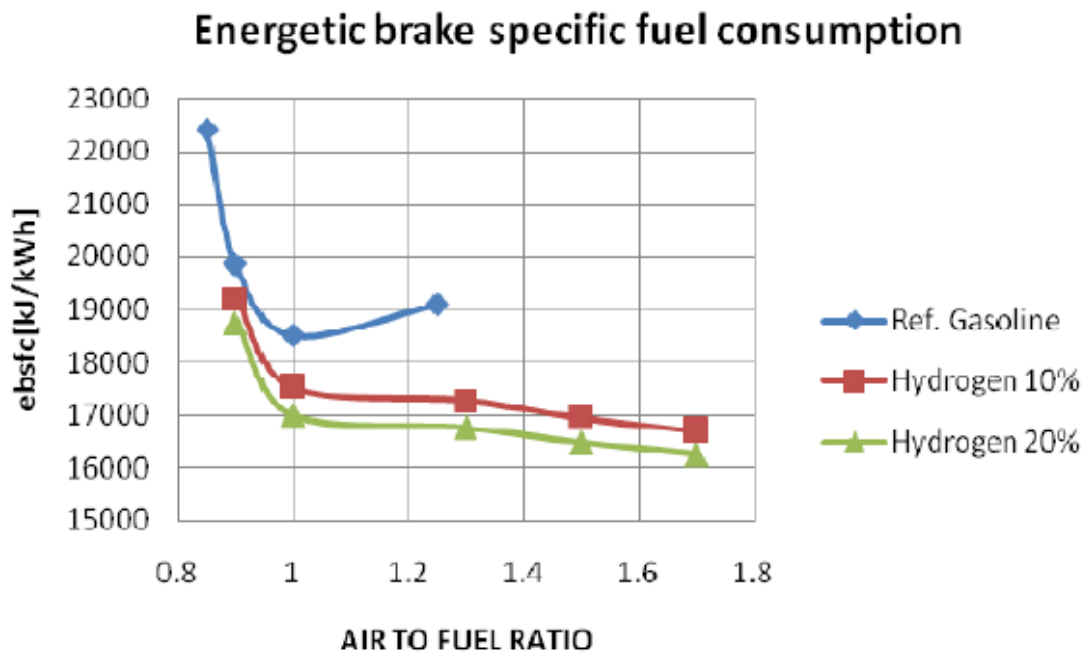


Рисунок 2 – EBSFC в зависимости от соотношения воздух-топливо при 10% и 20% водорода.

На рисунке 3 показана зависимость продолжительности горения от времени, при варьировании процентным содержанием водорода. Видно, что в процессе сгорания продолжительность сгорания уменьшается с увеличением количества водорода в цилиндре. Это свойство связано с тем, что водород сгорает в стехиометрических дозах до 20 раз быстрее, чем обычное топливо.

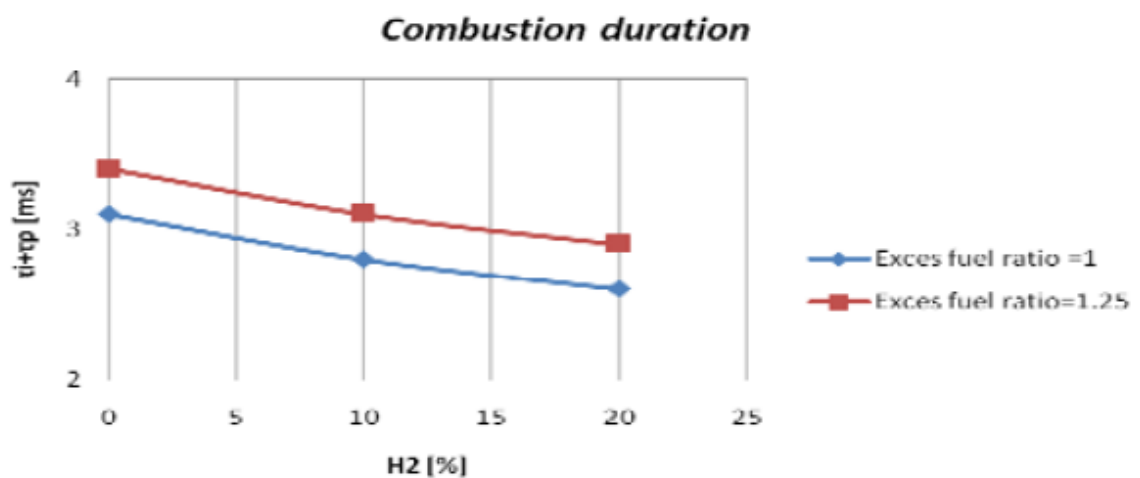


Рисунок 3 – Продолжительность горения относительно H<sub>2</sub>, частота вращения 3000 мин<sup>-1</sup>.

Водород имеет гораздо более высокую скорость горения, чем бензин. Следовательно, продолжительность сгорания водородно-бензиновой смеси короче, чем у чистого бензина, и уменьшенный период сгорания символизирует уменьшенную продолжительность дожигания двигателя, обогащенного водородом, и, следовательно, вызывает повышенную удельную теплоемкость во время такта расширения (рисунок 4) [15]. Уменьшение продолжительности дожигания также означает, что выделяется меньше тепла, но при более высокой скорости горения, когда поршень движется вниз, что приводит к уменьшению потерь на охлаждение и выхлопных газов.

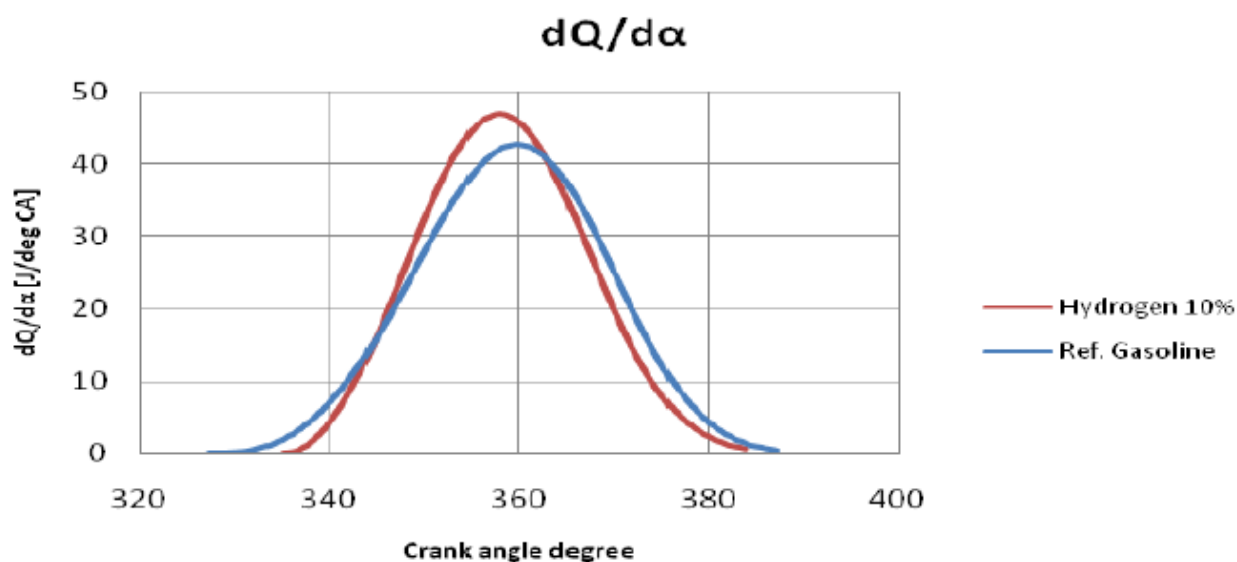


Рисунок 4 – Скорость тепловыделения в зависимости от угла поворота коленчатого вала при частоте вращения  $3000 \text{ мин}^{-1}$  и составе смеси  $\lambda = 1$ .

Исследование выбросов загрязняющих веществ всегда было важной задачей в автомобильной промышленности. Улучшение смесеобразования используется как средство снижения выбросов выхлопных газов. Использование водорода в дополнение к качеству топливовоздушной смеси лучше по сравнению с бензиновым двигателем, и, кроме того, лучшие свойства сгорания водорода улучшают процесс сгорания. Как видно на Рисунке 5, уровни выбросов  $\text{CO}_2$  меньше у двигателя, работающего с

добавлением водорода, чем у бензинового двигателя. Снижение уровня выбросов  $\text{CO}_2$  более выражено при использовании бедных смесей.

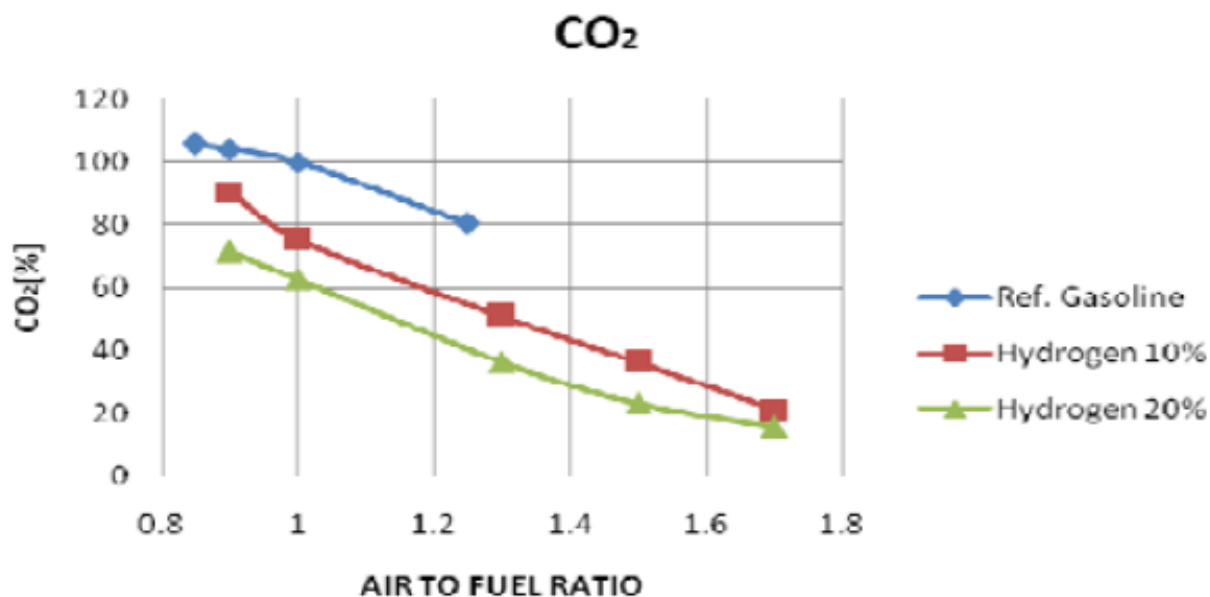


Рисунок 5 – Токсичность по  $\text{CO}_2$  в зависимости от отношения воздуха к топливу при 10% и 20% водорода

На рисунке 6 показано изменение выбросов  $\text{NO}_x$ , которое увеличивается при добавлении водорода. Для диапазона  $\lambda = 1 - 1,4$  уровни  $\text{NO}_x$  самые высокие из-за самых высоких пиковых температур возгорания. Для бедной водородной смеси с коэффициентом избытка воздуха ( $\lambda > 1,4$ ) температура сгорания снижается и, конечно, уровень выбросов  $\text{NO}_x$  очень сильно снижается. Для снижения уровня выбросов  $\text{NO}_x$  при заправке водородом на  $\lambda = 1 - 1,4$  могут применяться различные методы нейтрализации путем пассивной газовой очистки. Проще использовать качественную регулировку нагрузки двигателя, которая позволяет двигателю работать на обедненной смеси.

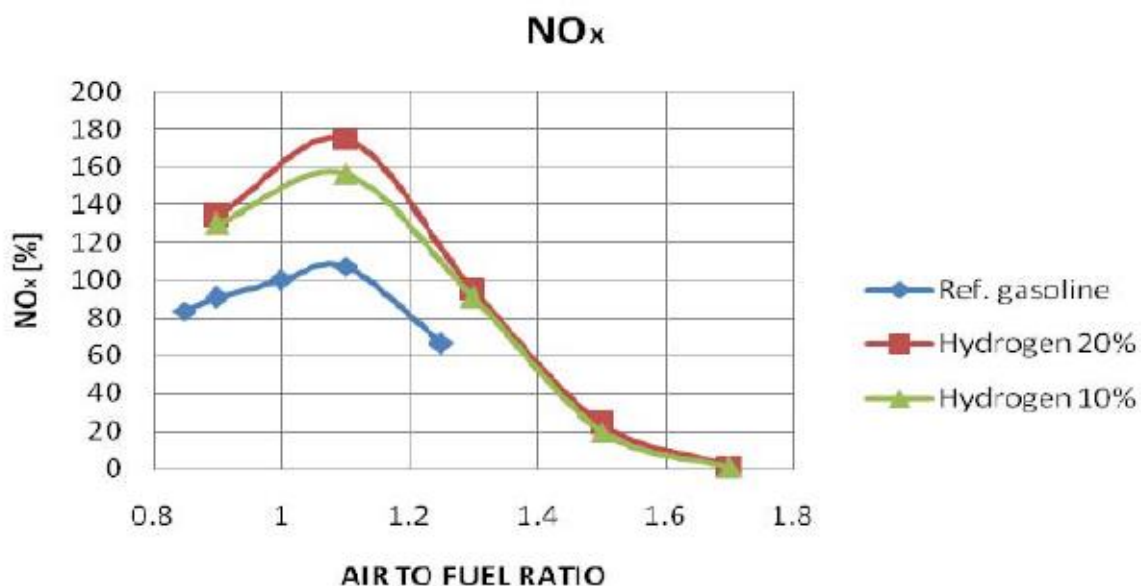


Рисунок 6 – Токсичность по NO<sub>x</sub> в зависимости от отношения воздуха к топливу при 10% и 20% водорода

Улучшение процесса горения происходит за счет добавления водорода, поэтому выброс углеводородов уменьшается [11,12,13] (Рисунок 7). Снижение этого уровня выбросов более выражено при использовании обедненных смесей.

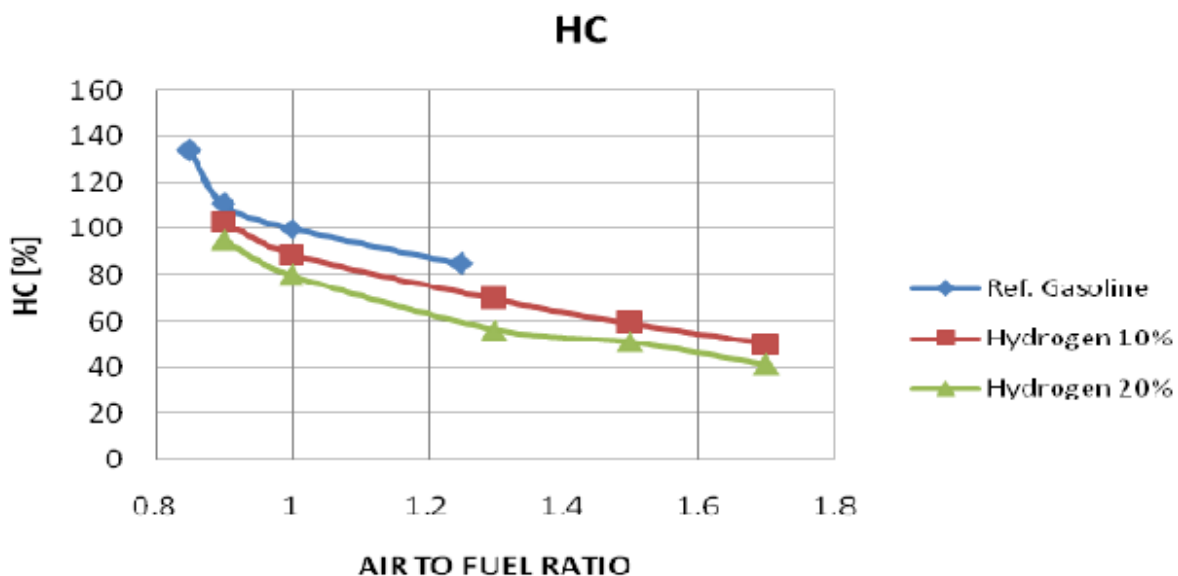


Рисунок 7 – Токсичность по HC против воздуха соотношение топлива на 10% и 20% водорода

Из анализа экспериментальных результатов, полученных при добавлении водорода, можно сделать следующие выводы:

- Стабильная работа двигателя на обедненных смесях по сравнению с бензиновым двигателем.
- Увеличение мощности двигателя за счет добавления водорода по сравнению с нормальной работой на бензине.
- Выраженное снижение EBSFC по сравнению с бензиновым двигателем.
- Уровень выбросов HC и CO явно ниже по сравнению с бензиновым двигателем.
- Уровень  $\text{NO}_x$  выше для  $\lambda = 1-1,4$  по сравнению с бензиновым двигателем. За счет применения качественной регулировки нагрузки двигателя (эффективного управления нагрузкой) уровень выбросов  $\text{NO}_x$ , очевидно, снижается.

#### **Выводы по первому разделу**

Таким образом из обзора литературы, показано, что добавление водорода оказывает большое влияние не только на характеристики двигателя и выбросы, но и на более низкий предел обедненной смеси и пропуски зажигания. Было обнаружено, что увеличение добавки водорода улучшает крутящий момент двигателя при, когда коэффициенте избытка воздуха равном или большем 1,098.

Из литературных источников получено, что нежелательных явлений сгорания, таких как обратное воспламенение и преждевременное воспламенение, можно избежать за счет использования распределенного впрыска в коллектор двух видов топлива. Кроме того, результаты показывают, что задержка по времени как для впрыска бензина, так и для бензина с впрыском водорода не требуется, и что обе форсунки могут запускаться в ВМТ.



## 2 Тепловой расчет проектируемого двигателя

Согласно заданию на бакалаврскую работу, требуется провести тепловой расчет для оценки влияния добавки водорода на рабочий процесс бензинового ДВС с искровым зажиганием. Для этого приводиться сравнение результатов расчета для 3-х видов топлива (таблица 3): бензин (базовое топливо), бензин с 1% водорода от массы топлива и бензин с 3% водорода от массы топлива. Анализ литературы показал, что значительные добавки водорода к топливу не приносят ощутимого эффекта, по этой причине выбраны малые добавки водорода позволяющие интенсифицировать процесс сгорания, но не снижающие значительно мощности двигателя.

Таблица 3 – Физико-технические характеристики исследуемых топлив

Характеристика топлива	Бензин	Водород	Бензин с 1% водорода	Бензин с 3% водорода
Октановое число по исследовательскому методу	95	118	98	100
Молекулярная масса	115	2	113,87	111,61
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	760	0,089	752,4009	737,2027
Массовая теплота сгорания, МДж/кг	43929,5	120000	44690,21	46211,62
Элементарный состав, % (массы)				
– Углерод	85,5	0	84,64	82,94
– Водород	14,5	100	15,36	17,06

Основные параметры двигателя Honda CBR600RR выбранного как прототип для дальнейшей проработки, принятого для расчета приведены в таблице 4, а общий вид двигателя Honda CBR600RR представлен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Двигатель Honda CBR600RR выбранного как прототип для дальнейшей проработки

Таблица 4 – Технические параметры двигателя Honda CBR600RR выбранного как прототип для дальнейшей проработки

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

Тепловой расчет производится по методике И.И. Вибге, с учетом рекомендаций по расчету основных параметров, предложенных в учебниках [2,3]. Результаты расчета представлены в виде таблиц и графиков.

Так как при изменении скоростного режима при работе на внешней скоростной характеристике максимальный коэффициент избытка воздуха ограничен 1 в связи с требованиями к токсичности отработавших газов, то результаты расчета параметров рабочего тела проводятся (таблица 5) для каждого вида топлива, без учета частоты вращения.

Таблица 5 – Результаты расчета параметров рабочего тела

$L_0$ , кмоль возд./кг топл.	$I_0$ , кг возд./кг топл.	$M_1$ , кмоль гор.см./кг топл.	$M_{CO_2}$ , кмоль $CO_2$ /кг топл.	$M_{H_2O}$ , кмоль $H_2O$ /кг топл.	$M_{N_2}$ , кмоль $N_2$ /кг топл.	$M_2$ , кмоль пр.сг./кг топл.	$\mu_0$
Бензин Аи-95							
0,51683	14,957	0,52552	0,07125	0,0725	0,409327	0,553077	1,052432
Бензин с 1% водорода							
0,52372	15,156	0,5325	0,070533	0,0768	0,414785	0,562118	1,055621
Бензин с 3% водорода							
0,53734	15,55	0,5463	0,069117	0,0853	0,425573	0,57999	1,06167

Анализ результатов расчета процесса впуска (таблица 6) показал снижение температуры отработавших газов при повышении удельного объема рабочего тела в конце процесса наполнения при работе с добавками водорода, что показывает снижение количества заряда поступившего в цилиндр двигателя в связи с вытеснением водородом воздуха из впускного коллектора.

Таблица 6 – Результаты расчета процесса впуска

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$\Delta p_a$ , Мпа	$p_a$ , Мпа	$T_r$ , К	$p_r$ , Мпа	$\gamma_r$	$T_a$ , К	$\eta_v$	$V_a$ , м <sup>3</sup> /кг	$\omega_{вп}$ , м/с
Бензин Аи-95									
1400	0,0001	0,099895	935	0,103697	0,031445	301,50773	0,9232	0,82755	8,07731
4000	0,00085	0,099146	955	0,105111	0,0312	305,90157	0,9234	0,8459581	23,07803
7000	0,00262	0,097384	985	0,108434	0,031697	311,6796	0,909	0,8775322	40,38655
10000	0,00534	0,094661	1020	0,113569	0,031546	317,196	0,9238	0,9187534	57,69507
12000	0,00769	0,092311	1050	0,118	0,033384	320,5034	0,881105	0,9519596	69,23409
Бензин с 1% водорода									
1400	0,0001	0,099895	870	0,103697	0,034645	301,2903	0,9005	0,9399492	8,07731
4000	0,00085	0,099146	890	0,105111	0,033478	305,2271	0,9234	0,9571021	23,07803
7000	0,00262	0,097384	920	0,108434	0,033936	311,0045	0,909	0,988665	40,38655
10000	0,00534	0,094661	955	0,113569	0,034458	317,0087	0,9033	1,0312776	57,69507

Продолжение таблицы 6

12000	0,00769	0,092311	990	0,118	0,03647	322,49409	0,855421	1,070969	69,23409
Бензин с 3% водорода									
1400	0,0001	0,099895	790	0,103697	0,038639	300,5	0,8892	1,1637219	8,07731
4000	0,00085	0,099146	805	0,105111	0,037463	304,4	0,9123	1,1807884	23,07803
7000	0,00262	0,097384	830	0,108434	0,037616	309,9	0,909	1,2115678	40,38655
10000	0,00534	0,094661	870	0,113569	0,037824	315,98	0,9033	1,2543705	57,69507
12000	0,00769	0,092311	905	0,118	0,039896	321,43181	0,855421	1,2939436	69,23409

В связи с тем, что граница без детонационной работы расширяется с добавкой водорода, перспективно повышать степень сжатия для двигателей с работающими с добавками водорода. Это позволит снизить эффект снижения мощности из-за снижения наполнения цилиндра воздухом. Также величина разряжения, коэффициент остаточных газов и удельного объема рабочего тела в конце процесса наполнения увеличивается с ростом числа оборотов.

Анализ результатов расчета параметров в конце сжатия и начала воспламенения (таблица 7) показал увеличение коэффициента молекулярного изменения рабочей смеси при добавке водорода в бензиновое топливо.

Таблица 2.5 – Результаты расчета параметров в конце сжатия и начала воспламенения

$n, \text{мин}^{-1}$	$\mu$	$n_l$	Угол опережения зажигания, ° ПКВ	$V_y, \text{м}^3/\text{кг}$	$P_y, \text{МПа}$	$T_y, \text{К}$
Бензин Аи-95						
1400	1,0508338	1,3374	10	0,07472	2,490411	678,6802
4000	1,0508459	1,3369	12	0,079463	2,341833	678,7045
7000	1,050821	1,3364	13	0,08424	2,231501	685,6096
10000	1,05083	1,3358	15	0,092433	2,034506	685,875
12000	1,050738	1,3355	16	0,098195	1,917625	686,7725
Бензин с 1% водорода						
1400	1,053758	1,3374	9	0,083386	2,54978	682,2336
4000	1,053819	1,337	11	0,088082	2,407126	681,9908
7000	1,053795	1,3364	12	0,092868	2,297496	689,2109
10000	1,053768	1,3358	14	0,101294	2,100761	691,0148
12000	1,05366365	1,3353	15	0,107747	1,981737	696,5312
Бензин с 3% водорода						
1400	1,0594	1,3775	9	0,103238	2,809747	749,8232
4000	1,0594	1,3771	11	0,108668	2,648776	748,431
7000	1,0594	1,3765	12	0,113806	2,525828	755,0195

Продолжение таблицы 7

10000	1,0594	1,3759	14	0,123207	2,305627	755,9424
12000	1,05930392	1,3754	15	0,13018	2,172904	761,2061

Анализ результатов коэффициентов термодинамического расчета (таблица 8) показал повышение коэффициента использования теплоты в связи со снижением тепловых потерь в стенку цилиндра и систему охлаждения, связанных с сокращением продолжительности сгорания при работе добавке водорода в бензин.

Таблица 8 – Коэффициенты термодинамического расчета

n, мин <sup>-1</sup>	$\xi$	q <sub>z</sub> , Дж/кг	E <sub>2</sub> , МПа	$\varphi_z$ , град, пкв.	m
Бензин Аи-95					
1400	0,75	2001,9	59,024013	42	2,8
4000	0,76	2029	58,523444	48	2,85
7000	0,77	2054,7	57,132526	55	2,9
10000	0,775	2068,4	54,931555	62	2,95
12000	0,78	2078,026	53,26259	66	3
Бензин с 1% водорода					
1400	0,755	2011	52,203627	40	2,8
4000	0,765	2040	52,005732	46	2,85
7000	0,775	2065,7	50,980976	53	2,9
10000	0,78	2078	49,164954	60	2,95
12000	0,785	2087,24	47,553806	64	3
Бензин с 3% водорода					
1400	0,76	2020,5	42,363252	39	2,8
4000	0,77	2049,4	42,348272	44	2,85
7000	0,78	2075,7	41,802262	51	2,9
10000	0,785	2088,6	40,626516	57	2,95
12000	0,79	2097,67	39,555929	61	3

Анализ результатов расчета процесса расширения и выпуска (таблица 9) показал, что при переходе на бензин с добавками водорода происходит снижение температуры конца сгорания и отработавших газов, что приводит к ухудшению условий прогрева трехкомпонентного каталитического нейтрализатора.

Таблица 9 – Результаты расчета процесса расширения и выпуска

$n, \text{мин}^{-1}$	$V_z', \text{м}^3$	$T_z', \text{К}$	$P_z', \text{МПа}$	$\delta$	$n_2$	$P_b, \text{МПа}$	$T_b, \text{К}$	$T_r, \text{К}$	$\Delta, \%$
Бензин Аи-95									
1400	0,136	2371,9	5,025426	6,08591	1,1975	0,578058	1660,42	936,452	0,1553
4000	0,1566	2339,03	4,30265	5,40128	1,198	0,57067	1676	953,391	-0,1684
7000	0,193	2290,79	3,418751	4,54572	1,198	0,5571	1697	983,404	-0,162
10000	0,2315	2248,75	2,798368	3,9684	1,1988	0,53606	1709,5	1019,1	-0,0881
12000	0,2593	2230,46	2,478427	3,6719	1,199	0,52099	1722	1049,43	-0,0543
Бензин с 1% водорода									
1400	0,1499	2181,696	4,780761	6,272396	1,205	0,52295	1496,89	872,892	0,3324
4000	0,172	2154,2	4,102167	5,56341	1,205	0,51841	1515	889,772	-0,0256
7000	0,2115	2113,67	3,260458	4,67514	1,206	0,5076	1538	919,651	-0,038
10000	0,2531	2080,55	2,667673	4,0751	1,206	0,49	1557,4	956,646	0,1724
12000	0,2843	2071,44	2,353261	3,76695	1,206	0,47535	1576	990,588	0,0594
Бензин с 3% водорода									
1400	0,18	1932,48	4,399511	6,465113	1,216	0,454514	1290,72	788,692	-0,1655
4000	0,1999	1921,01	3,914391	5,90563	1,216	0,45152	1308,62	805,012	0,0014
7000	0,2448	1885,79	3,107012	4,94931	1,217	0,44383	1333	833,479	0,4192
10000	0,2837	1871,42	2,625771	4,42117	1,217	0,43036	1356	869,815	-0,0213
12000	0,3175	1868,13	2,315813	4,07512	1,216	0,41958	1379	903,673	-0,1466

Анализ результатов расчета индикаторных показателей рабочего цикла (таблица 10) показал, что максимальные мощностные индикаторные показатели работы двигателя обеспечиваются при работе на бензине, а добавка водорода снижает мощность. При этом возрастает и удельный эффективный расход топлива, что немного противоречит общепринятой концепции, но расчет был многократно перепроверен и ошибки не обнаружено. Что интересно, при добавке водорода увеличивается индикаторная работа цикла, но снижение других показателей связан с большим объемом рабочего тела при добавке водорода.

Таблица 10 – Результаты расчета индикаторных показателей рабочего цикла

$n, \text{мин}^{-1}$	$L_i, \text{кДж}$	$P_i, \text{Мпа}$	$N_i, \text{кВт}$	$\eta_i$	$g_i, \text{г/кВт ч}$
Бензин Аи-95					
1400	1,1238566	1,479307	10,34412	0,467217	175,3992
4000	1,1188885	1,440721	28,78372	0,454931	180,136
7000	1,0914522	1,354826	47,36839	0,434543	188,5876
10000	1,0638775	1,261347	63,00016	0,398093	205,8552
12000	1,0389938	1,188875	71,25653	0,393408	208,3065

Бензин с 1% водорода					
1400	1,1385689	1,319461	9,226392	0,427111	189,3083
4000	1,1305223	1,286657	25,70572	0,406182	199,0625
7000	1,0980249	1,209776	42,29705	0,387924	208,4317
10000	1,0754898	1,135985	56,73874	0,36657	220,5738
12000	1,0605238	1,078662	64,65077	0,367564	219,9773
Бензин с 3% водорода					
1400	1,1643664	1,089889	7,621096	0,35713	220,5844
4000	1,1698383	1,079184	21,56069	0,344667	228,5603
7000	1,1434794	1,028069	35,9441	0,329508	239,0754
10000	1,1112378	0,96499	48,19813	0,31125	253,1
12000	1,0996496	0,925722	55,48418	0,315304	249,8452

Анализ результатов расчета эффективных показателей рабочего цикла (таблица 11) показал, повышение мощности при работе на бензине, но добавка водорода снижает часовой расход топлива. Увеличение удельного эффективного расхода топлива при добавке водорода связано с увеличением доли тепловых потерь на охлаждение, по сравнению с вводимой энергией в цилиндр двигателя.

Таблица 11 – Результаты расчета эффективных показателей рабочего цикла

$n, \text{мин}^{-1}$	$V_{п.ср}, \text{м/с}$	$p_m, \text{Мпа}$	$p_e, \text{Мпа}$	$\eta_m$	$\eta_e$	$g_e, \text{г/(кВт.ч)}$	$N_e, \text{кВт}$	$M_e, \text{Н.м}$	$G_t, \text{кг/ч}$
Бензин Аи-95									
1400	1,983	0,112403	1,422896	0,961866	0,4494	182,3531	9,949661	67,8659	1,814351
4000	5,6667	0,098033	1,342687	0,931955	0,423976	193,2882	26,82514	64,04031	5,184984
7000	9,9167	0,146058	1,208767	0,892194	0,387697	211,3752	42,2618	57,65292	8,933094
10000	14,167	0,194083	1,067263	0,84613	0,336838	243,2902	53,30633	50,9038	12,96891
12000	17	0,2261	0,962775	0,80982	0,31859	257,2256	57,70498	45,92016	14,8432
Бензин с 1% водорода									
1400	1,9833	0,112403	1,26305	0,957246	0,408851	197,7634	8,831931	60,24195	1,746632
4000	5,6667	0,098033	1,188623	0,923808	0,375235	215,4805	23,74714	56,69213	5,117045
7000	9,9167	0,146058	1,063717	0,879268	0,341089	237,0513	37,19045	50,73466	8,816044
10000	14,167	0,194083	0,941901	0,82915	0,303941	266,0241	47,04491	44,92458	12,51508
12000	17	0,2261	0,852562	0,790388	0,290518	278,3154	51,09922	40,66347	14,2217
Бензин с 3% водорода									
1400	1,9833	0,112403	0,977486	0,896867	0,320298	245,9499	6,835111	46,62179	1,681095
4000	5,667	0,155867	0,923317	0,85557	0,294887	267,1439	18,44668	44,0382	4,927918
7000	9,9167	0,206017	0,822053	0,799608	0,263477	298,9906	28,7412	39,20832	8,593349
10000	14,167	0,256167	0,708824	0,73454	0,228625	344,5696	35,40344	33,80779	12,19895
12000	17	0,2896	0,636122	0,687163	0,216666	363,5893	38,12669	30,34026	13,86246

Анализ результатов расчета теплового баланса (таблица 12) показал, значительное увеличение доли потерь на теплоотдачу в окружающую среду с ростом количества добавляемого водорода. Как отмечалось ранее температура при добавке водорода за счет сокращения продолжительности сгорания остается на примерно том же уровне что и при работе на бензине, а общая вводимая энергия с топливом снижается, что и приводит к росту удельных потерь при добавке водорода в топливо. Но за счет снижения температуры отработавших газов, потери теплоты с выхлопными газами при добавке водорода снижаются.

Таблица 12 – Результаты расчета теплового баланса

$n, \text{мин}^{-1}$	$Q_0, \text{Дж/с}$	$Q_e, \text{Дж/с}$	$q_e, \%$	$Q_B, \text{Дж/с}$	$q_B, \%$	$Q_r, \text{Дж/с}$	$q_r, \%$	$Q_{\text{ост}}, \text{Дж/с}$	$q_{\text{ост}}, \%$
Бензин Аи-95									
1400	22139,87	9949,661	44,94001	5622,553	25,3956	5735,377	25,9052	832,279	3,759186
4000	63270,49	26825,14	42,39756	18949,32	29,9497	16944,46	26,78098	551,5658	0,871758
7000	109007,3	42261,8	38,76969	33506,04	30,73742	30633,89	28,1026	2605,593	2,390292
10000	158254,9	53306,33	33,68384	56420,22	35,65148	46932,89	29,65651	1595,493	1,008179
12000	181126,2	57704,98	31,859	64510,88	35,61655	56146,84	30,99875	2763,462	1,525711
Бензин с 1% водорода									
1400	21601,85	8831,931	40,88508	7689,519	35,59658	5001,785	23,15443	78,6115	0,363911
4000	63286,14	23747,14	37,52345	22394,21	35,38565	15200,61	24,01887	1944,173	3,072036
7000	109034,3	37190,45	34,10895	39819,48	36,52015	27611,27	25,32348	4413,083	4,047427
10000	154782,9	47044,91	30,39412	61616,28	39,8082	41570,95	26,85759	4550,763	2,940094
12000	175889,9	51099,22	29,05182	70516,32	40,09117	49960,97	28,40468	4313,383	2,45232
Бензин с 3% водорода									
1400	21339,84	6835,111	32,02981	10516,34	49,28032	3850,315	18,04285	138,0745	0,647027
4000	62555,07	18446,68	29,48871	31276,63	49,99855	11649,85	18,62335	1181,914	1,889397
7000	109084,1	28741,2	26,34774	56239,38	51,55598	21375,8	19,5957	2727,741	2,500585
10000	154853,7	35403,44	22,86251	80256,04	51,82703	32773,31	21,16406	6420,855	4,146402
12000	175970,3	38126,69	21,66655	92099,99	52,33838	39679,7	22,54909	6063,9	3,445979

### Выводы по 2-му разделу бакалаврской работы

Тепловой расчет показал значительное влияние добавки водорода на мощностные и экономические характеристики работы. Получено:

- Повышение индикаторной мощности при работе на бензине в 9,2% по сравнению работой на бензине с добавкой 1% и на 22% с добавкой 3% водорода, но добавка водорода снижает часовой расход топлива.



- Увеличение удельного эффективного расхода топлива при добавке водорода связано с увеличением доли тепловых потерь на охлаждение, по сравнению с вводимой энергией в цилиндр двигателя. Это же сказывается и на снижении индикаторного коэффициента полезного действия с увеличением доли добавляемого водорода в бензовоздушную смесь.
- Температура в процессе сгорания при добавке водорода за счет сокращения продолжительности сгорания остается на примерно том же уровне что и при работе на бензине, а общая вводимая энергия с топливом снижается, что и приводит к росту удельных потерь при добавке водорода в топливо. Но за счет снижения температуры отработавших газов, потери теплоты с выхлопными газами при добавке водорода снижаются.

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

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

Кинематический расчет для центрального кривошипно-шатунного механизма проектируемого двигателя (радиус кривошипа 21,25 мм, а длина шатуна 109 мм) проводился по известным методикам приведенным в [1,2], при частоте вращения коленчатого вала  $12000 \text{ мин}^{-1}$ .

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

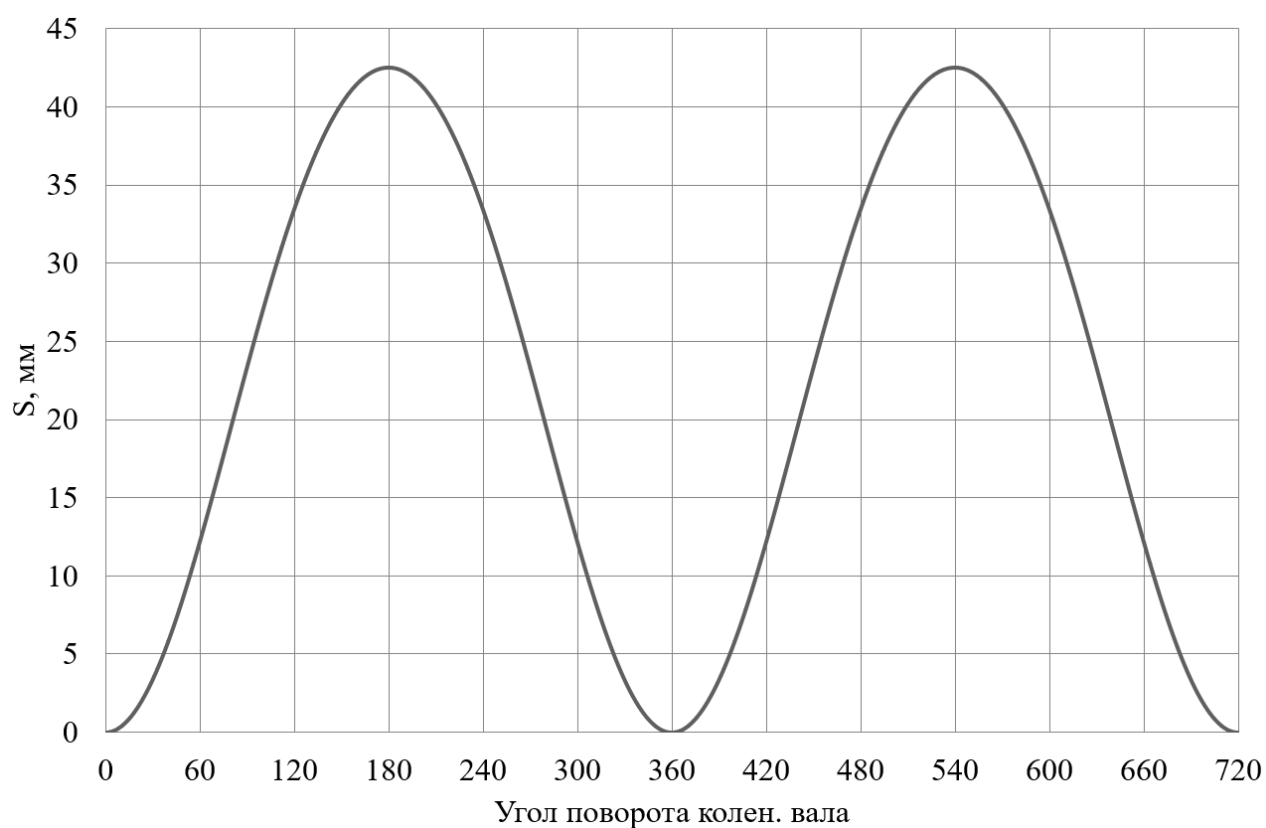


Рисунок 9 – Диаграмма изменения хода поршня

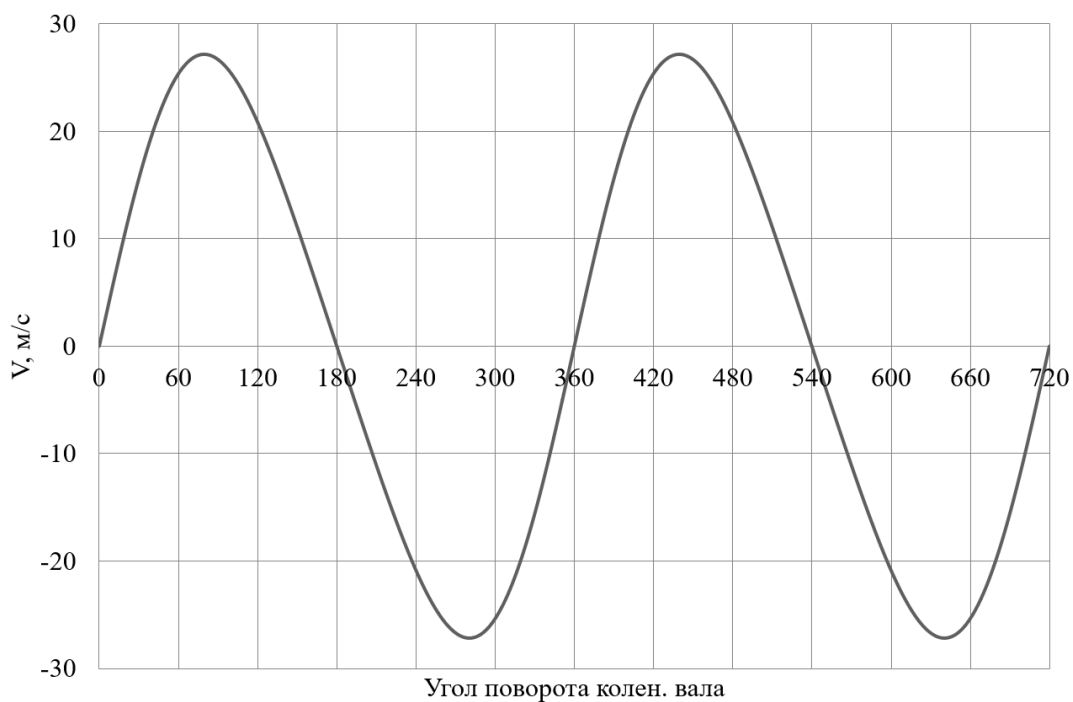


Рисунок 10 – Диаграмма изменения скорости поршня

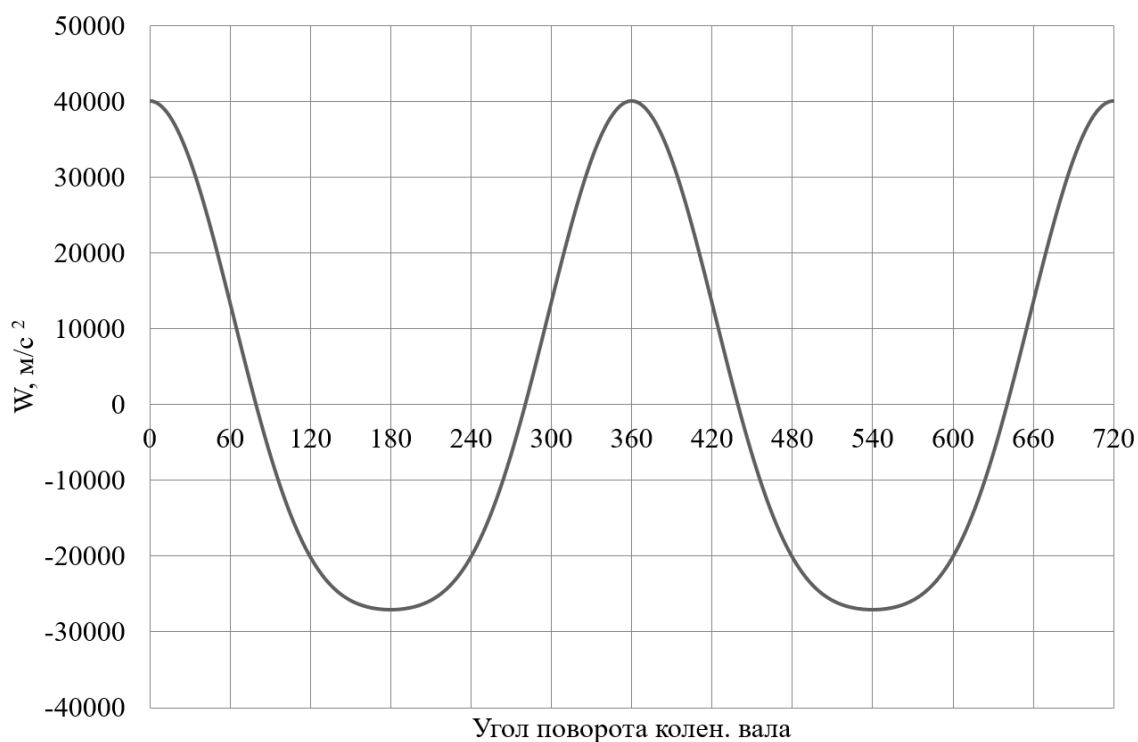


Рисунок 11 – Диаграмма изменения ускорения поршня

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

## 3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя

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

Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма проектируемого двигателя проводился по известным методикам приведенным в [1,2], при частоте вращения коленчатого вала  $12000 \text{ мин}^{-1}$ , для условий работы на бензине, бензине с 1% водорода и бензине с 3% водорода.

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

Таблица 13 – Приведение масс кривошипно-шатунного механизма

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

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

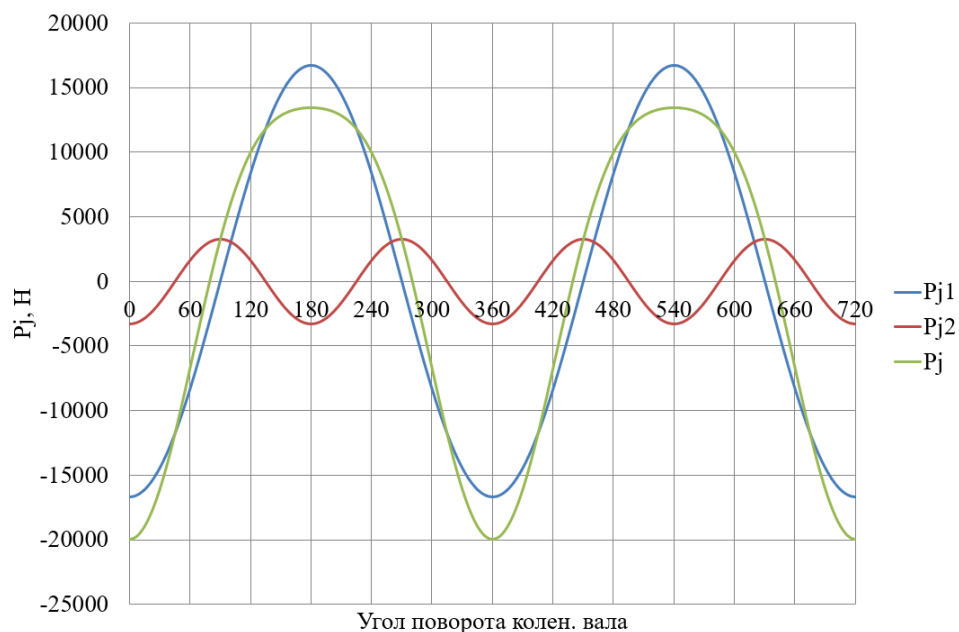


Рисунок 12 – Силы инерции возвратно-поступательного движения поршня и шатуна

На рисунках 13 – 15 приведено сравнение суммарных сил, действующих на поршневой палец двигателя при работе на бензине (рисунок 13), бензине с 1% водорода (рисунок 14) и бензине с 3% водорода (рисунок 15).

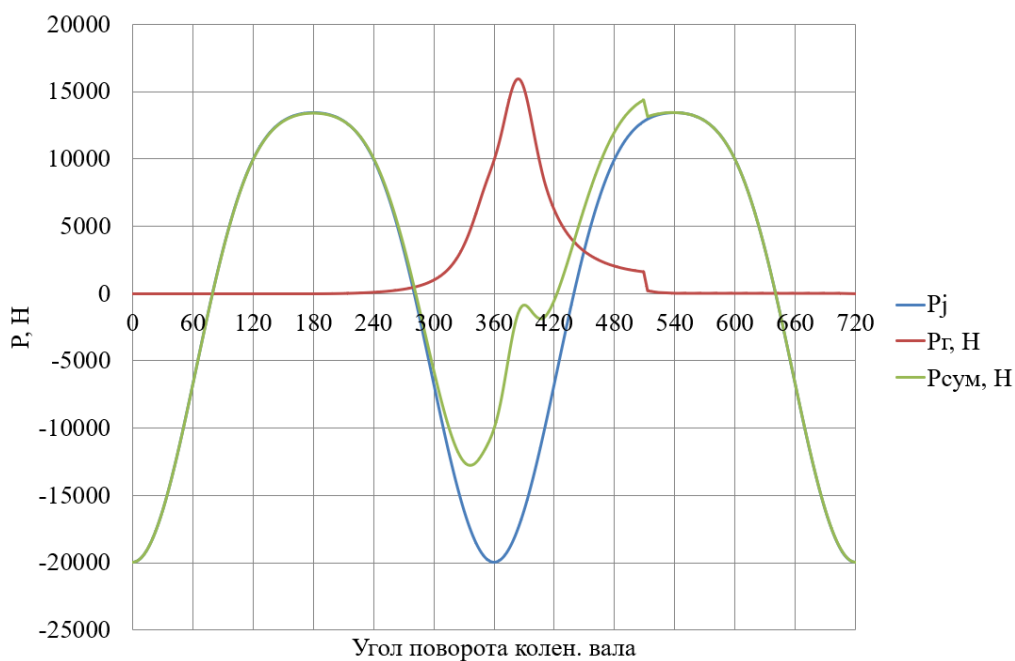


Рисунок 13 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец двигателя при работе на бензине

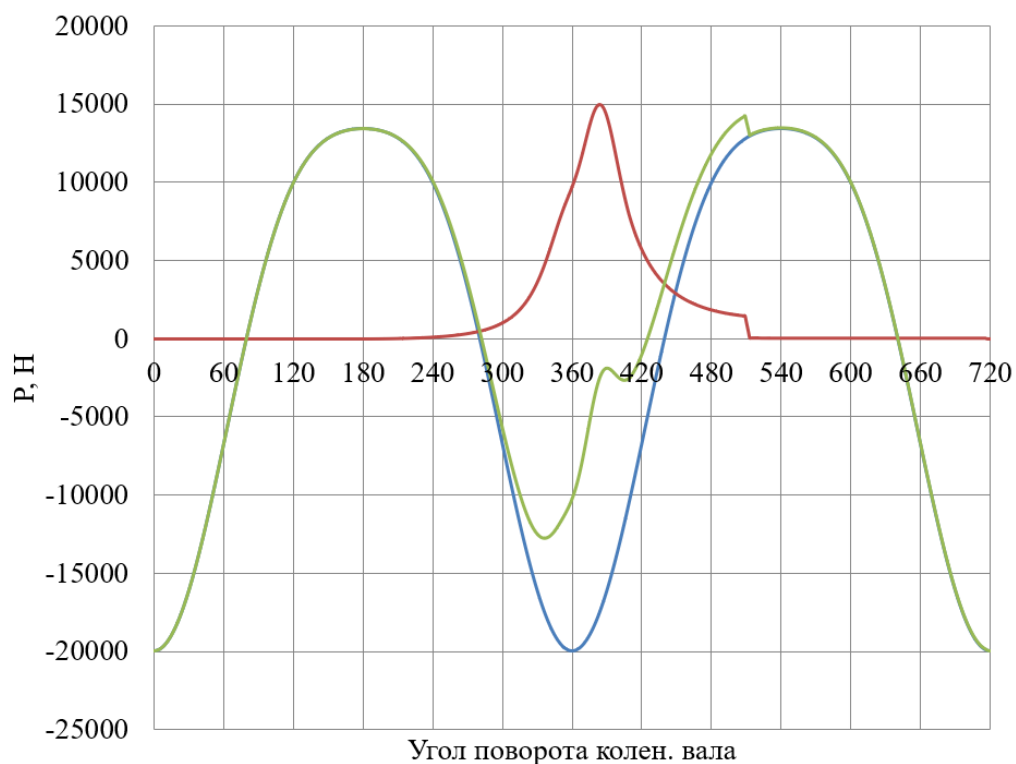


Рисунок 14 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец двигателя при работе на бензине с 1% водорода

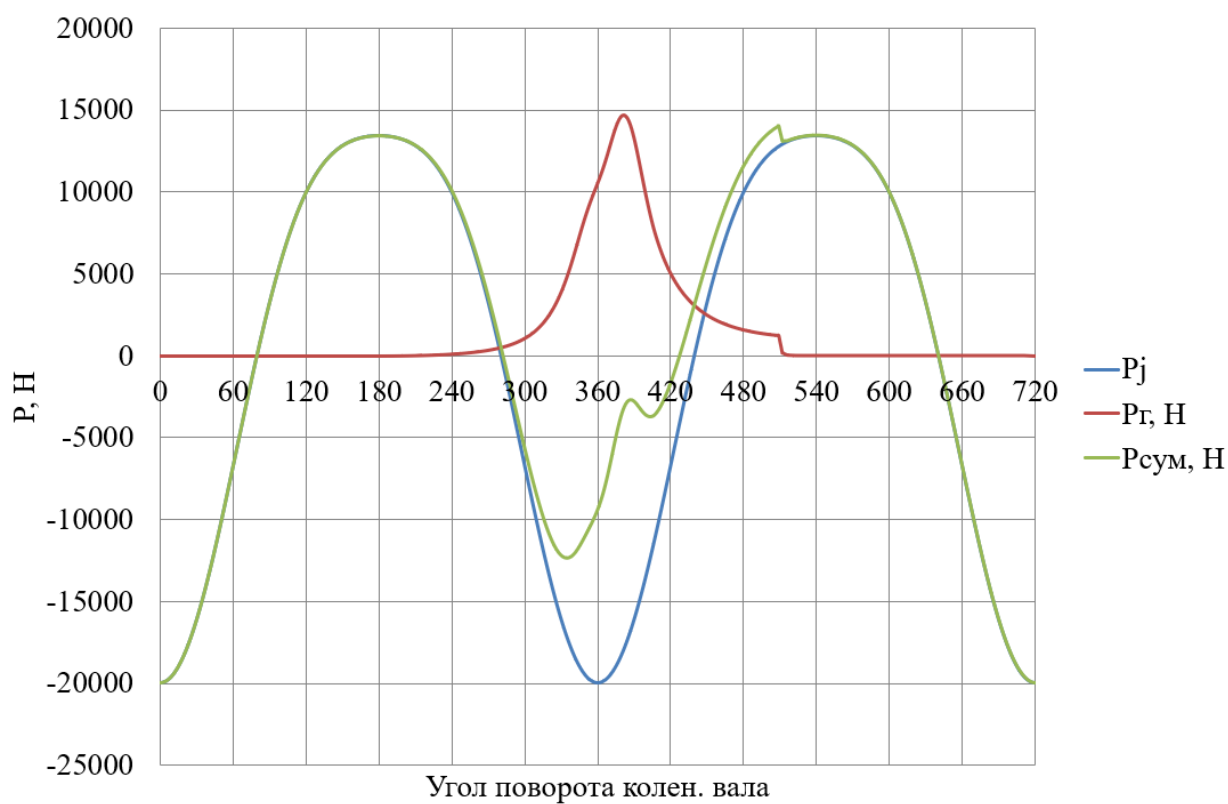


Рисунок 15 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец двигателя при работе на бензине с 3% водорода

На рисунках 16 – 18 приведено сравнение сил, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки при работе на бензине (рисунок 16), бензине с 1% водорода (рисунок 17) и бензине с 3% водорода (рисунок 18).

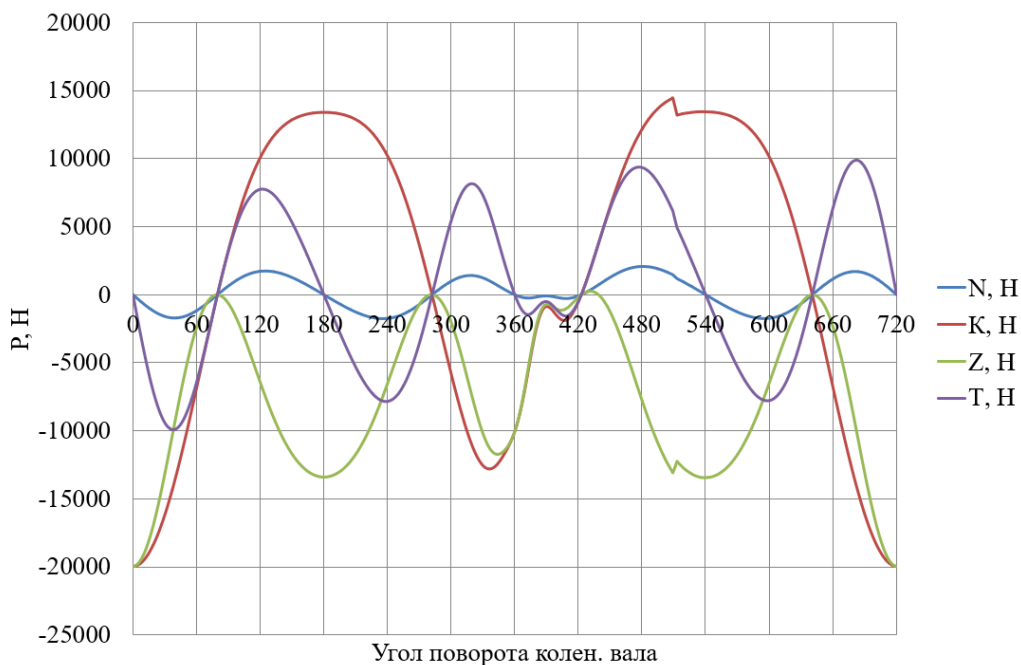


Рисунок 16 – Силы, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки двигателя при работе на бензине

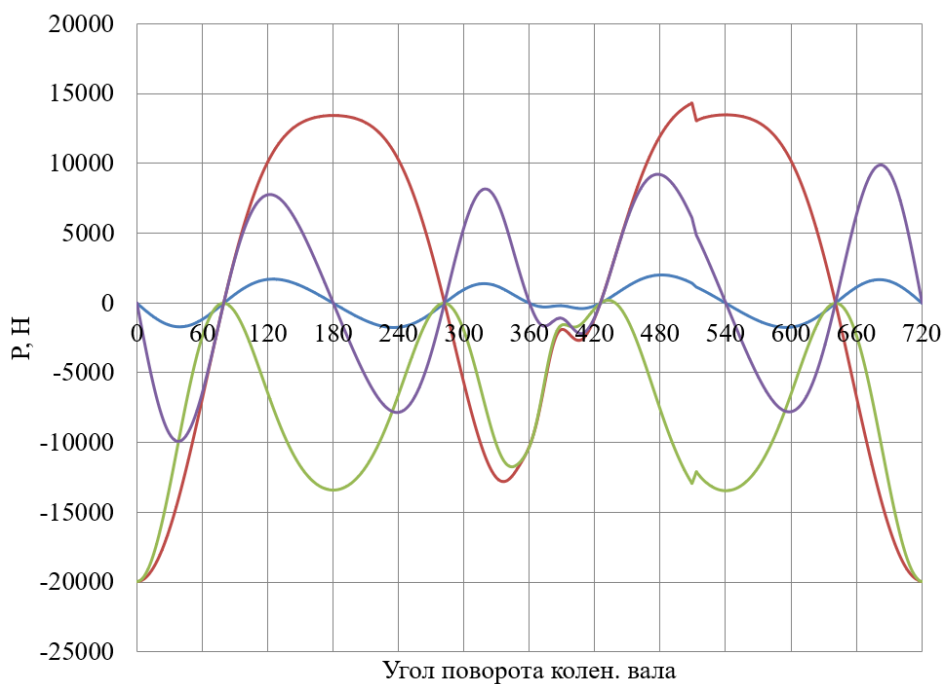


Рисунок 17 – Силы, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки двигателя при работе на бензине с 1% водорода

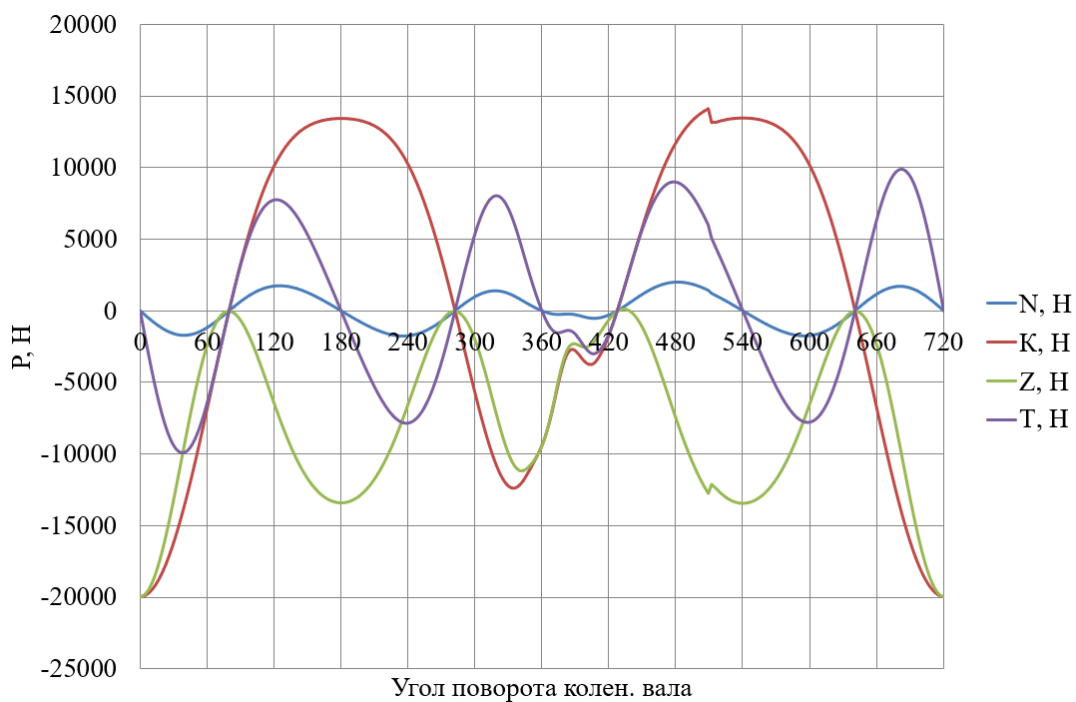


Рисунок 18 – Силы, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки двигателя при работе на бензине с 3% водорода

На рисунке 19 – 21 приведено сравнение крутящего момента двигателя при работе бензине (рисунок 19), бензине с 1% водорода (рисунок 20) и бензине с 3% водорода (рисунок 21).

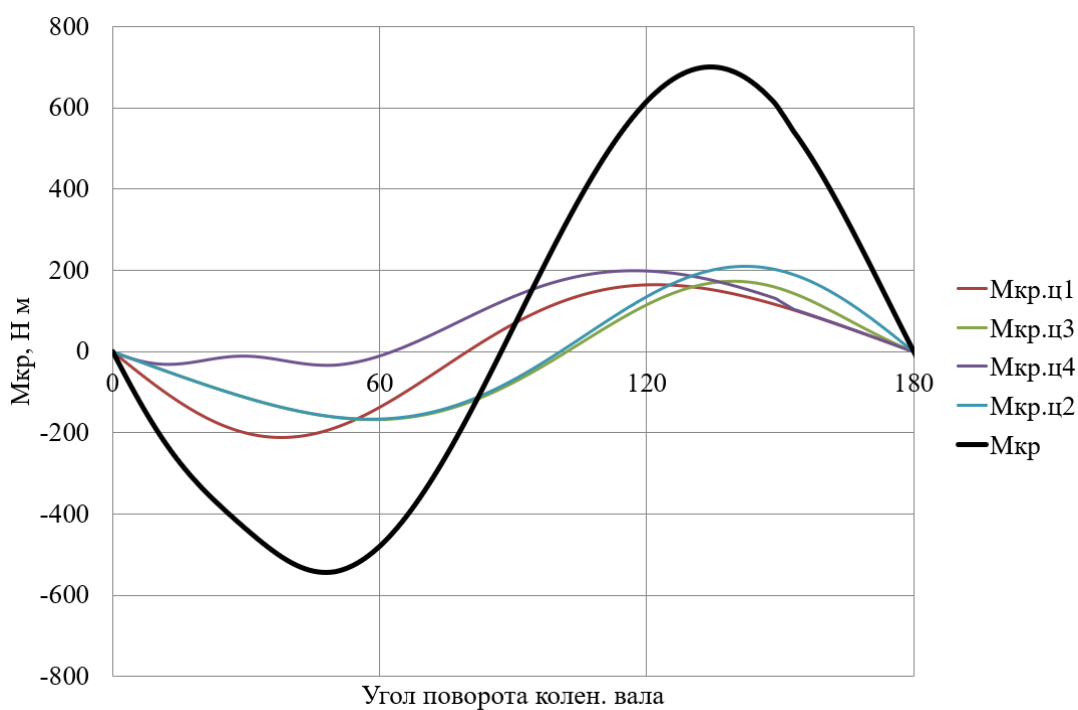


Рисунок 19 – График крутящего момента при работе на бензине



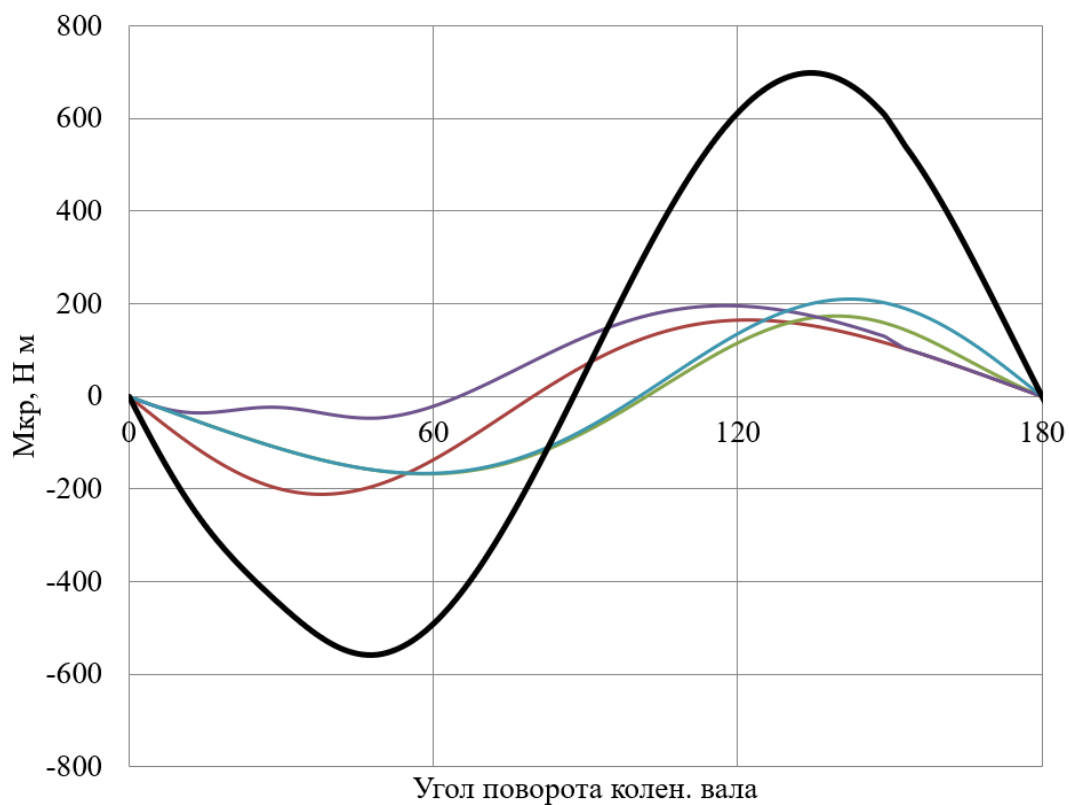


Рисунок 20 – График крутящего момента при работе на бензине с 1% водорода

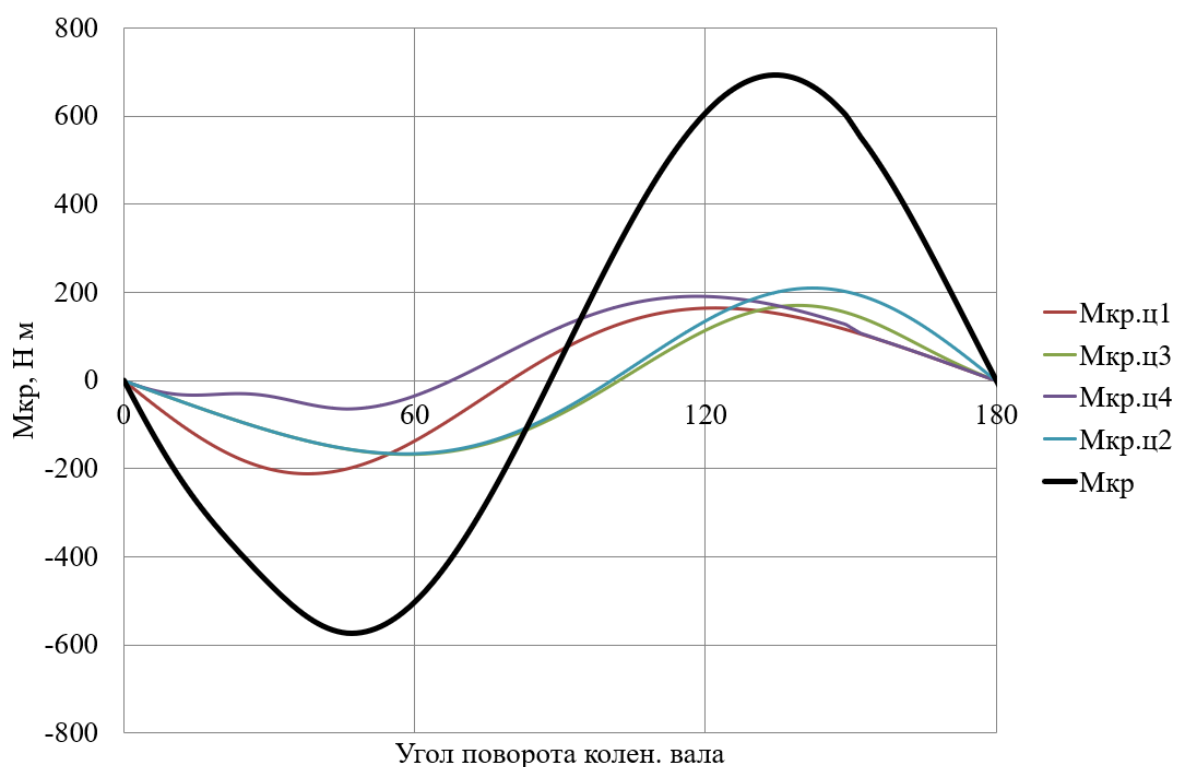


Рисунок 21 – График крутящего момента при работе на бензине с 3% водорода

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

На рисунке 22 приведено сравнение суммарной силы, действующую на шатунную шейку в прямоугольных координатах при работе на 3-х исследуемых топливах.

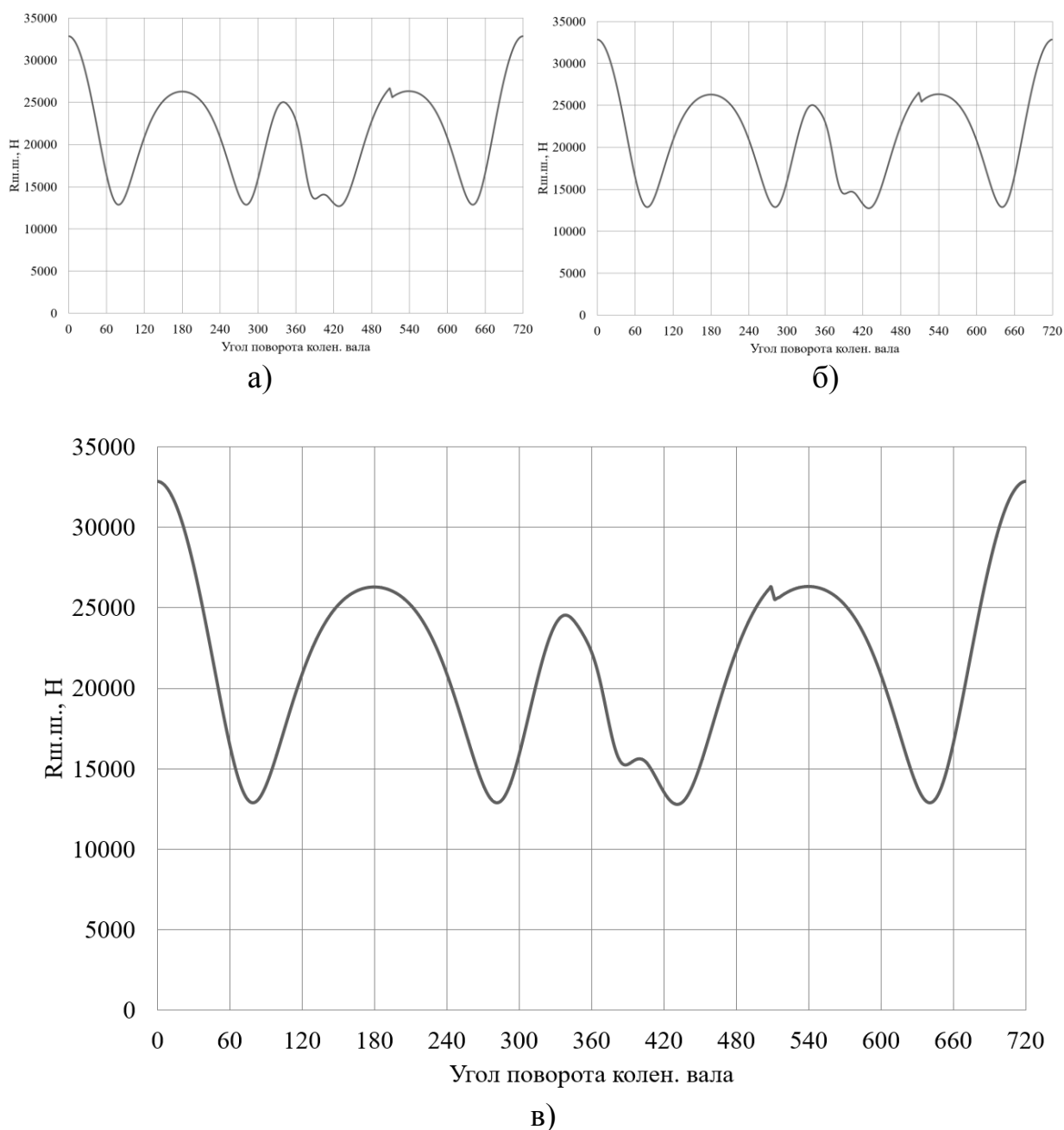


Рисунок 22 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку при работе на: (а) бензине; (б) бензине с 1% водорода и (в) бензине с 3% водорода

На рисунке 23 приведено сравнение суммарной силы, действующую на шатунную шейку в прямоугольных и полярных координатах при работе на 3-х исследуемых топливах.

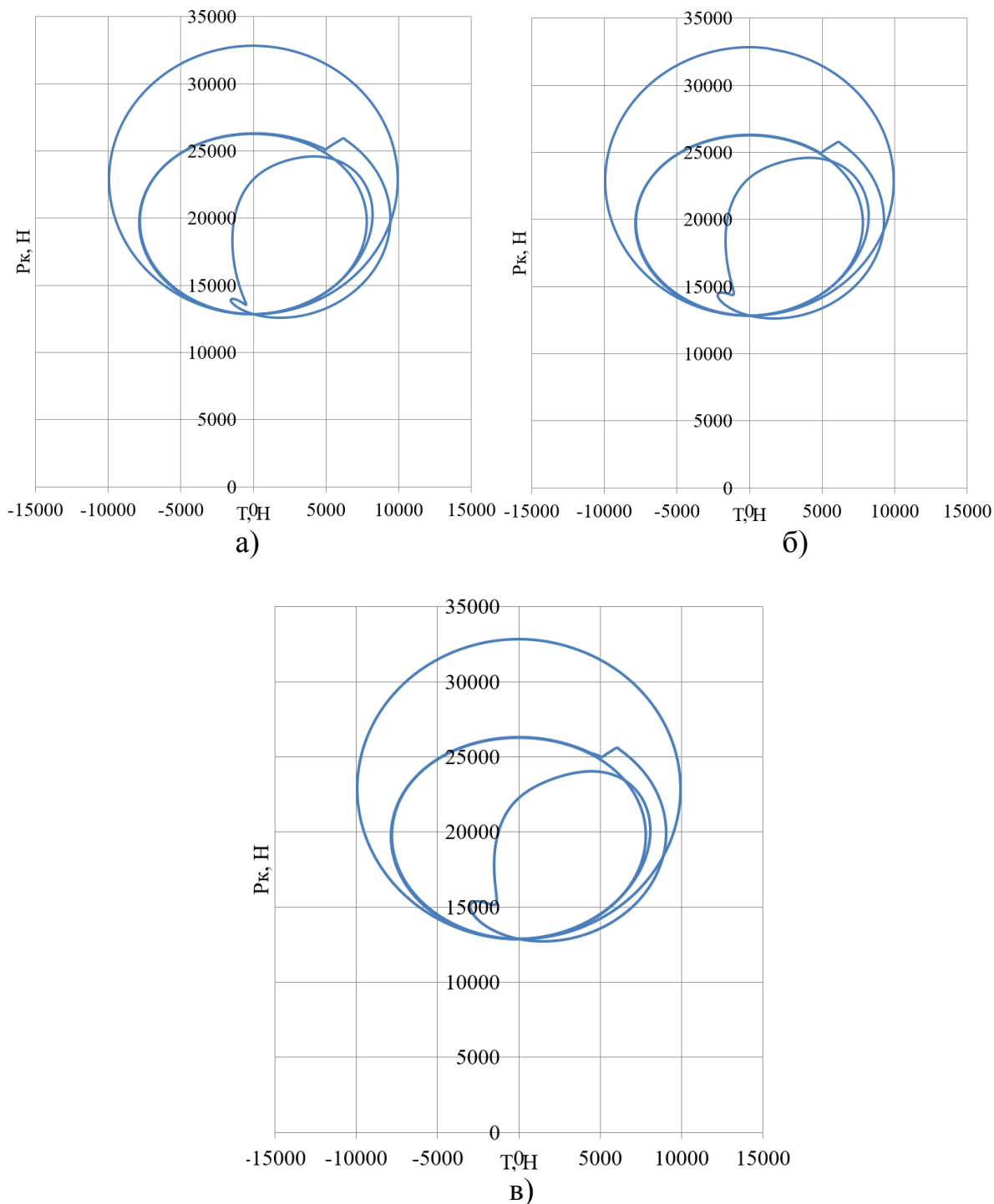


Рисунок 23 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку в полярных координатах при работе на: (а) бензине; (б) бензине с 1% водорода и (в) бензине с 3% водорода

На рисунке 24 приведено сравнение суммарных сил, действующих на коренные шейки в прямоугольных координатах при работе на 3-х исследуемых топливах.

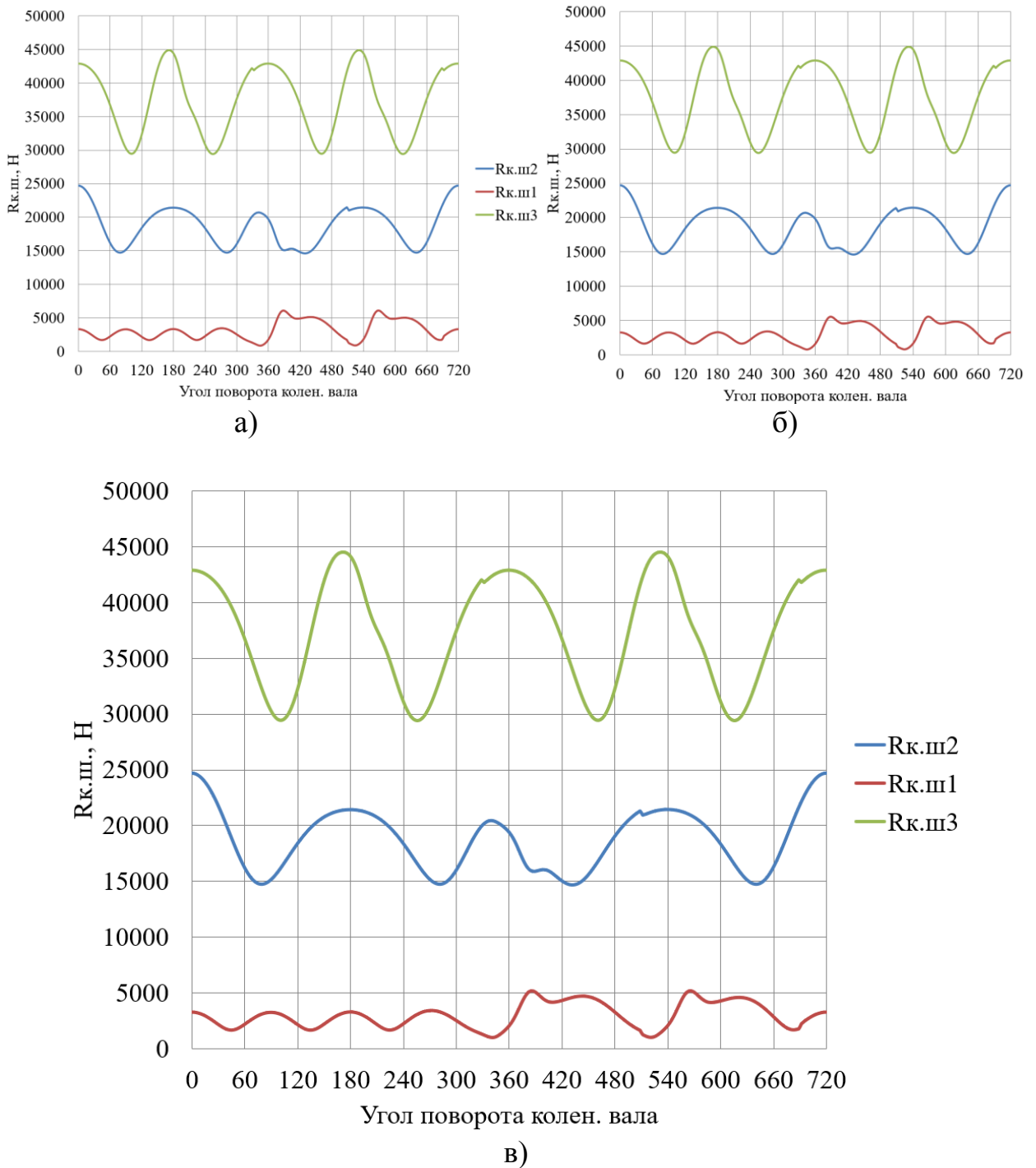


Рисунок 24 – Суммарные силы, действующие на коренные шейки в прямоугольных координатах при работе на: (а) бензине; (б) бензине с 1% водорода и (в) бензине с 3% водорода

На рисунке 25 приведено сравнение суммарных сил, действующих на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при работе на 3-х исследуемых топливах.

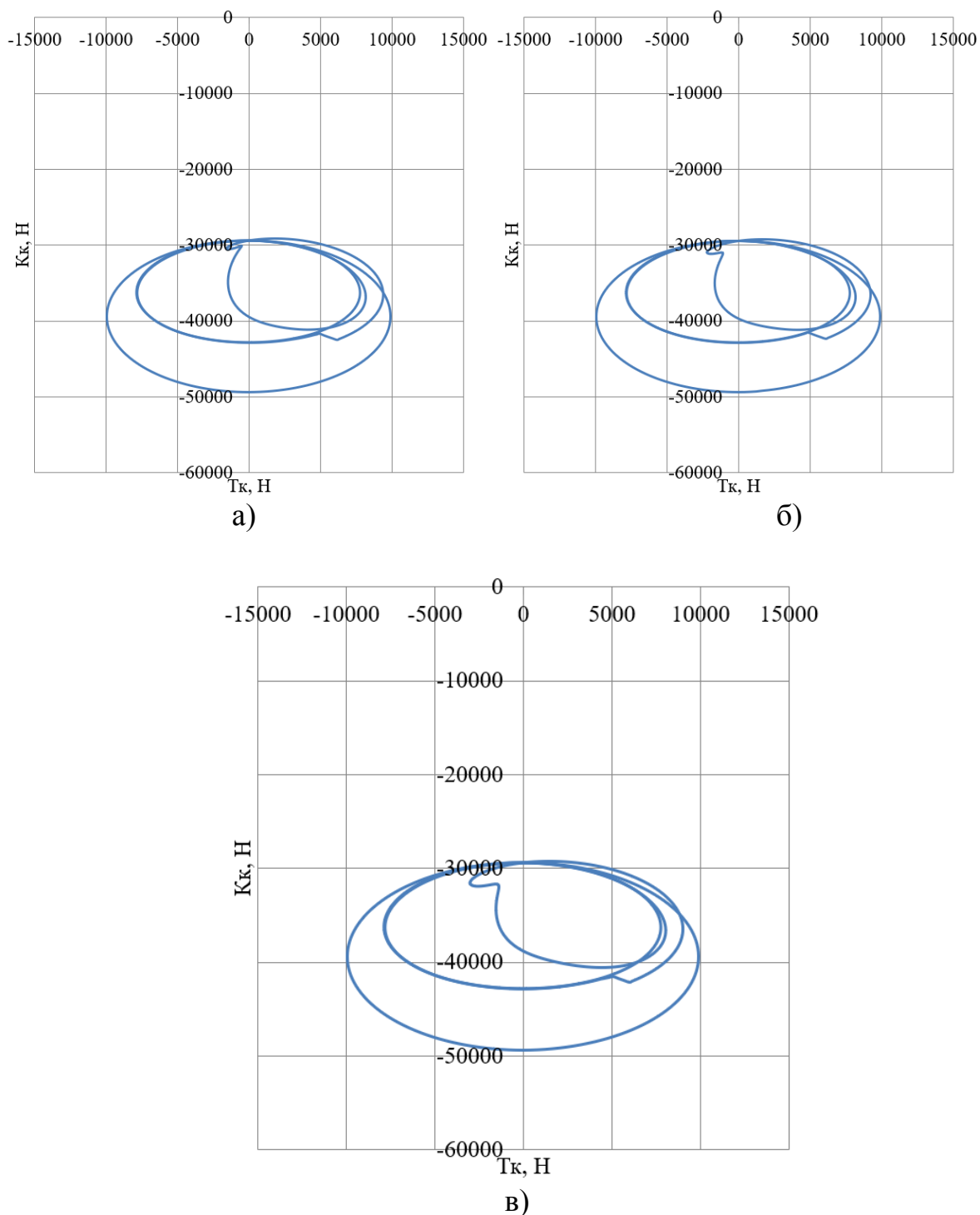


Рисунок 25 – Суммарные силы, действующие на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при работе на: (а) бензине; (б) бензине с 1% водорода и (в) бензине с 3% водорода

### **Выводы по 3-му разделу**

Как мы видим переход бензинового двигателя на работу с добавками водорода практически не снизил нагрузки, действующие на коренные и шатунные шейки. В связи со значительными инерционными нагрузками, связанными с большой частотой вращения ( $12000 \text{ мин}^{-1}$ ), разница в давлении не приводит к ощутимому различию в условиях нагружения деталей кривошипно-шатунного механизма.

Следует отметить, что не смотря на то что при добавке водорода нагрузки в элементах кривошипно-шатунного механизма не выросли, все равно следует ответственно отнестись к проектированию деталей соприкасающихся с водородом, так как велика вероятность оводороживания поверхности металла с его охрупчиванием, что может снизить ресурс двигателя.

## 4 Анализ влияния добавки водорода в бензовоздушную смесь на рабочий процесс ДВС с искровым зажиганием

### 4.1 Влияние добавки водорода в бензовоздушную смесь на рабочий процесс ДВС с искровым зажиганием на максимальную температуру и давление цикла

Сравнивая величины максимального давления в цилиндре двигателя (рисунки 26 – 30), следует отметить снижение давления с ростом оборотов двигателя, а также снижение максимального давления с увеличением доли водорода в топливе. Проведем сравнение индикаторных диаграмм в P-V координатах для всех 3-х рассматриваемых топлив (рисунок 26 – 30).

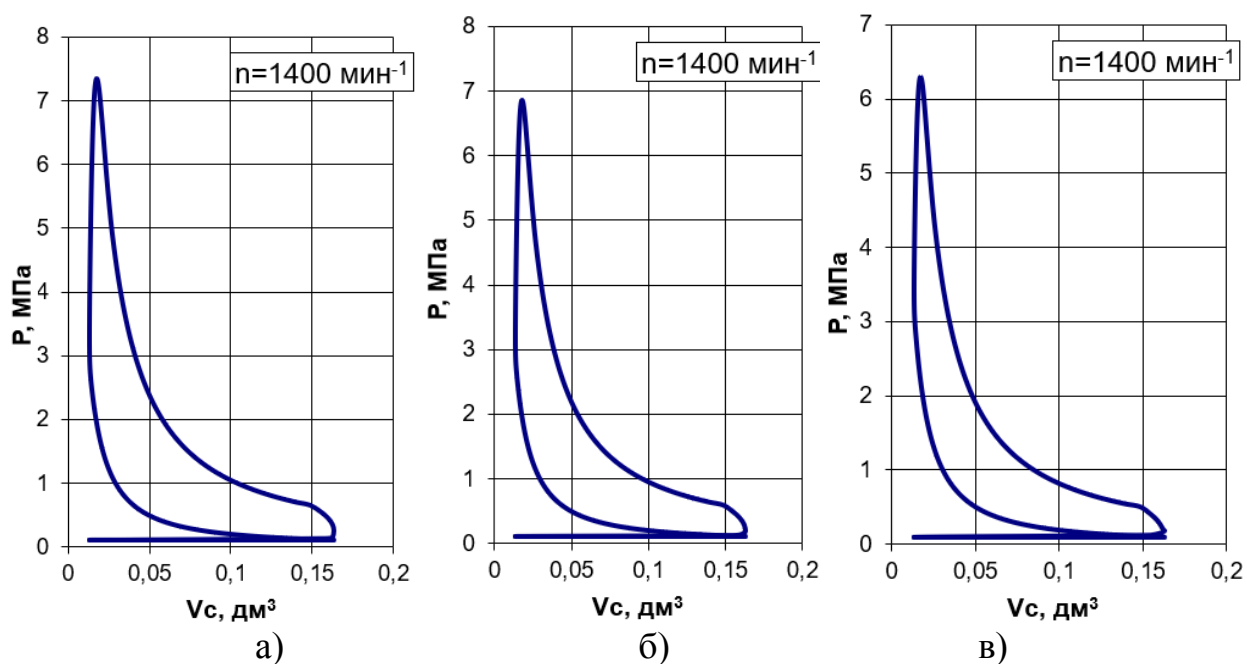


Рисунок 26 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима  $1400 \text{ мин}^{-1}$  при работе на: (а) бензине; (б) бензине с 1% водорода и (в) бензине с 3% водорода

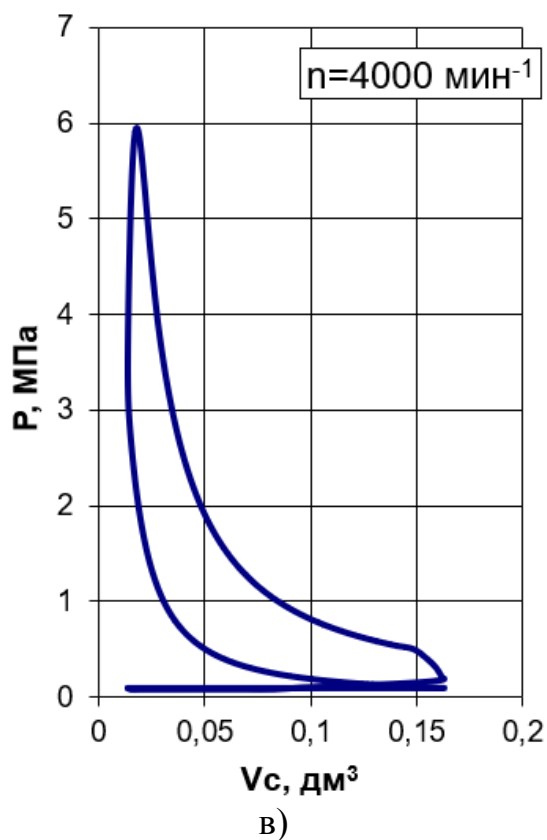
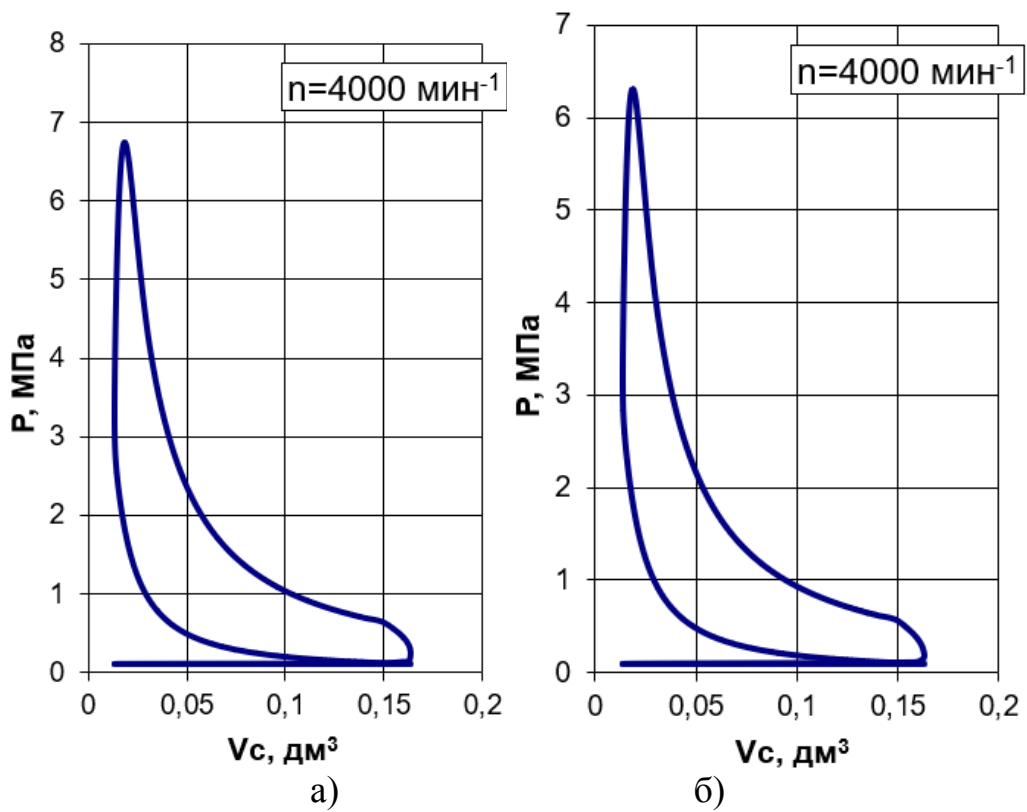


Рисунок 27 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима  $4000 \text{ мин}^{-1}$  при работе на: (а) бензине; (б) бензине с 1% водорода и (в) бензине с 3% водорода



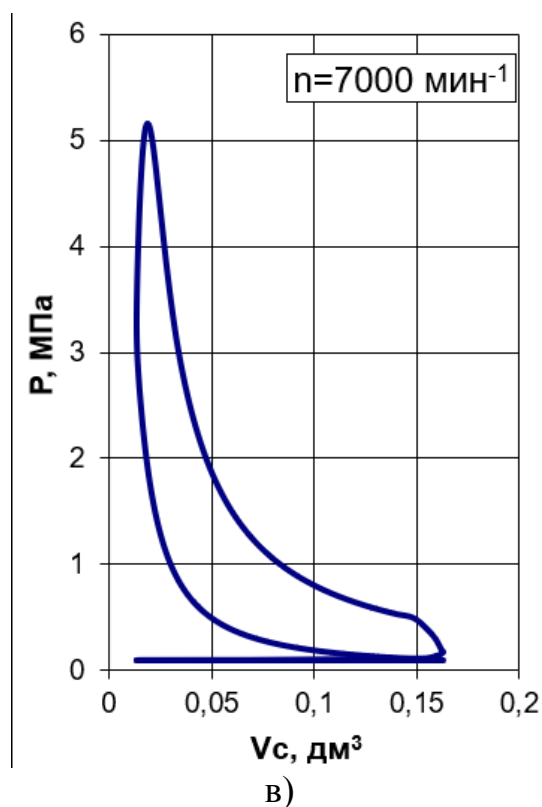
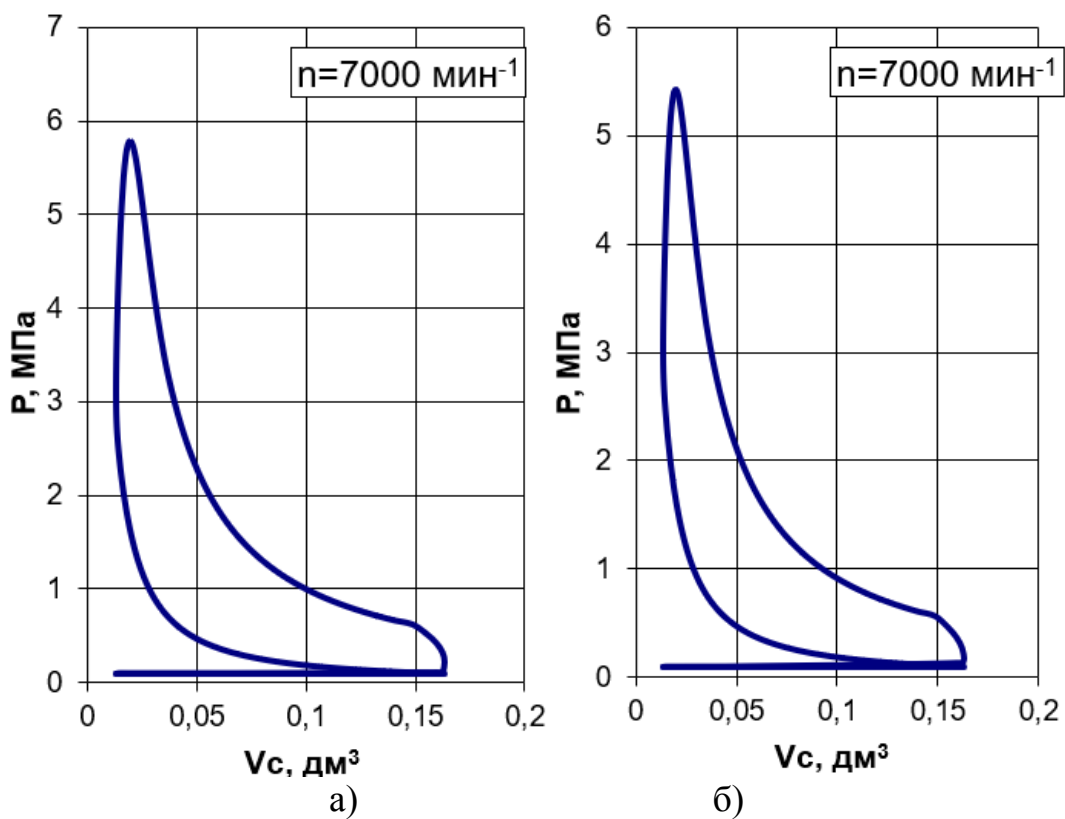


Рисунок 28 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима  $7000 \text{ мин}^{-1}$  при работе на: (а) бензине; (б) бензине с 1% водорода и (в) бензине с 3% водорода

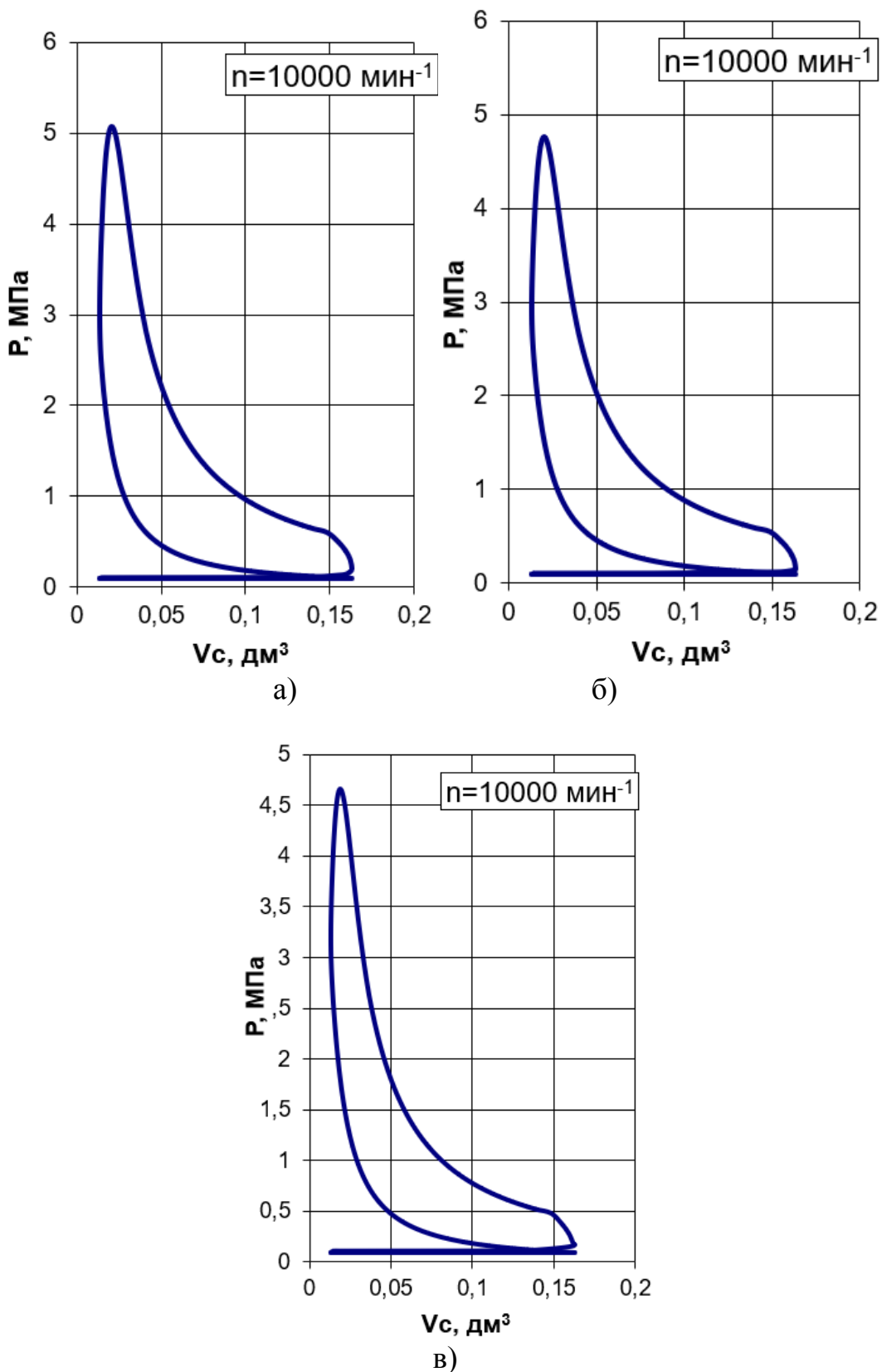


Рисунок 29 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима 10000 мин<sup>-1</sup> при работе на: (а) бензине; (б) бензине с 1% водорода и (в) бензине с 3% водорода

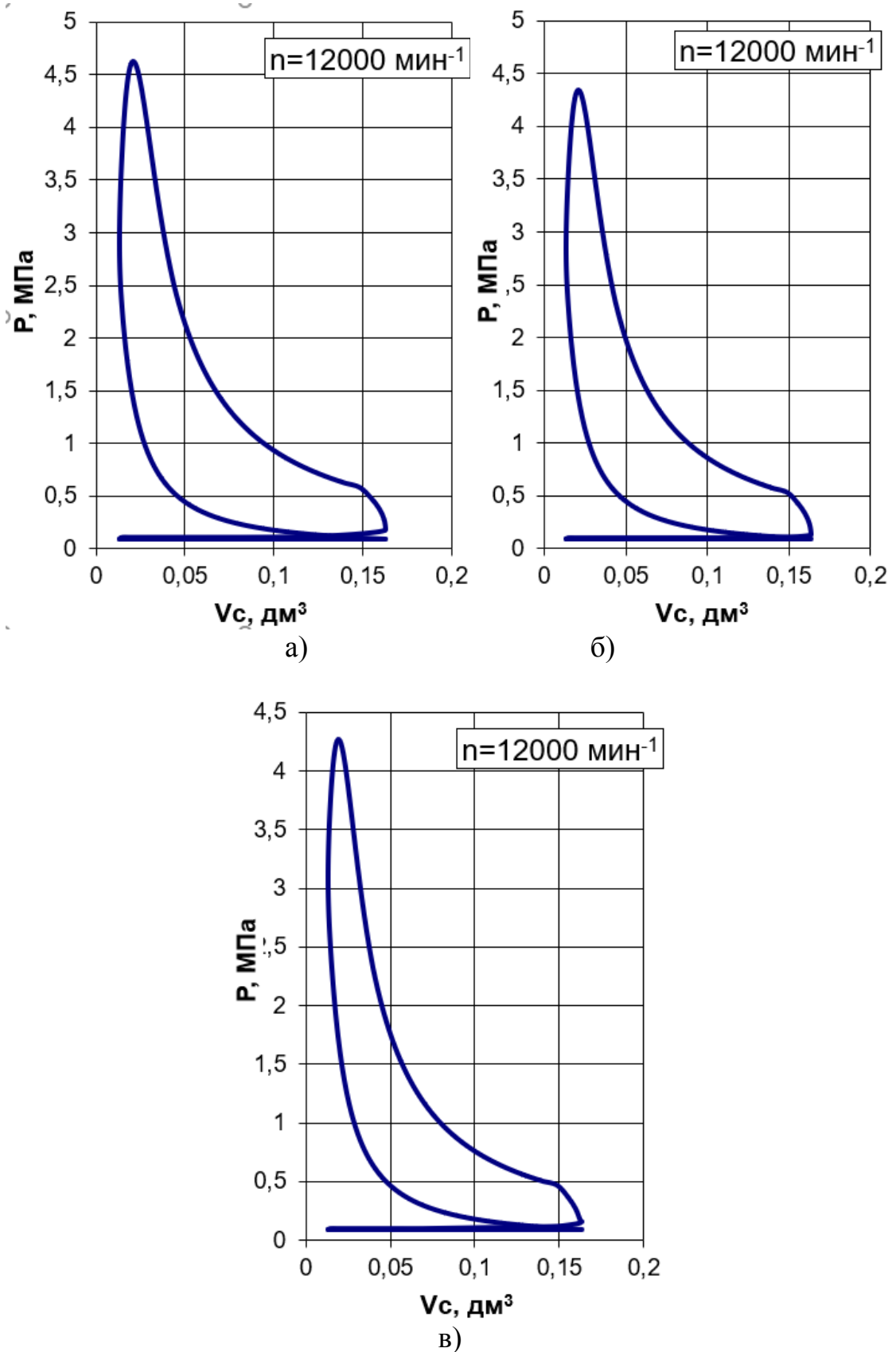


Рисунок 30 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима  $12000 \text{ мин}^{-1}$  при работе на: (а) бензине; (б) бензине с 1% водорода и (в) бензине с 3% водорода

Максимальное индикаторное давление в среднем снижается на 0,5 МПа при изменении частоты вращения на  $3000 \text{ мин}^{-1}$ . Добавка водорода в среднем снижает максимальное давление на 0,15 – 0,2 МПа. Рассмотрим, как это сказывается на температуре в цилиндре двигателя.

Для оценки токсичности проведем сравнение изменения температуры в процессе сгорания (рисунках 31 – 35). Видно, что максимальная температура цикла, отвечающая за образование оксидов азота, снижается в среднем на 150 К на каждые 1% водорода о массы топлива, добавляемого в бензин.

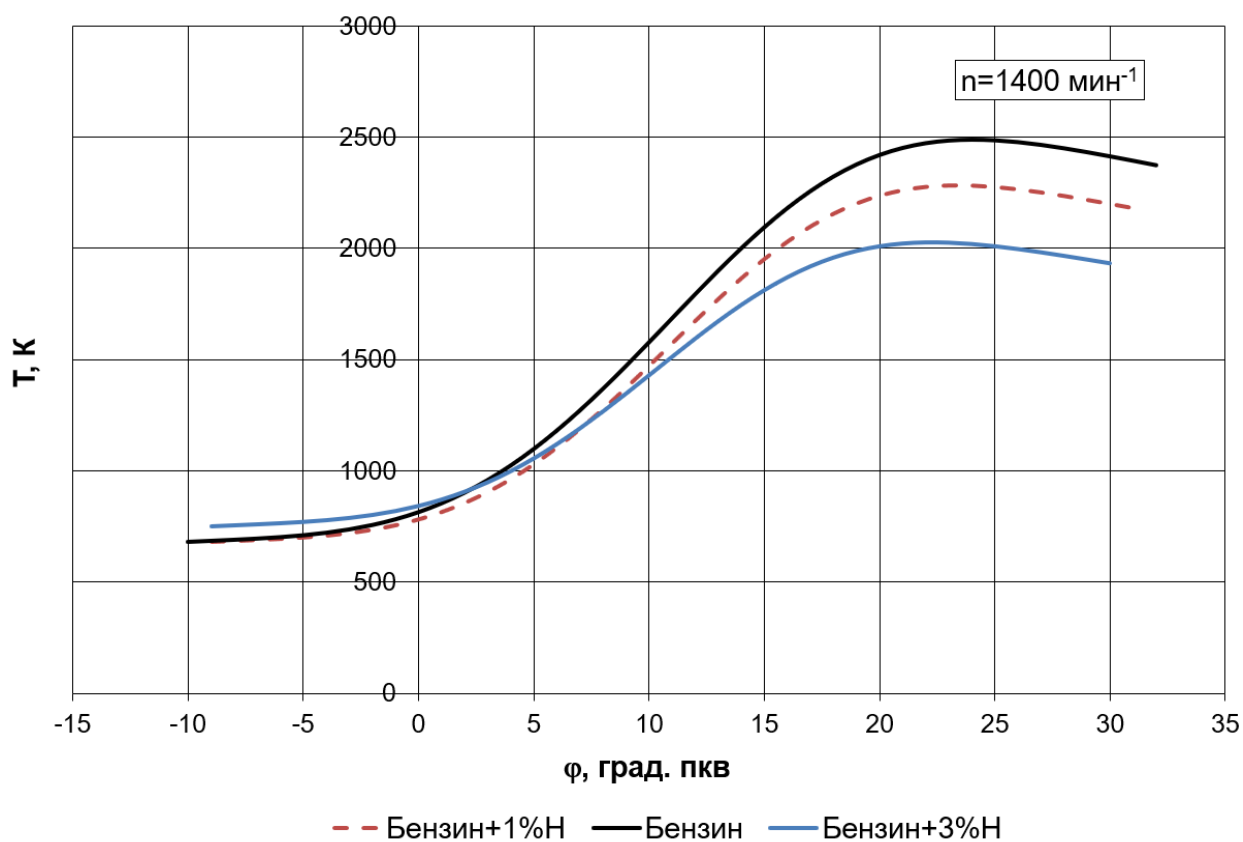


Рисунок 31 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима  $1400 \text{ мин}^{-1}$

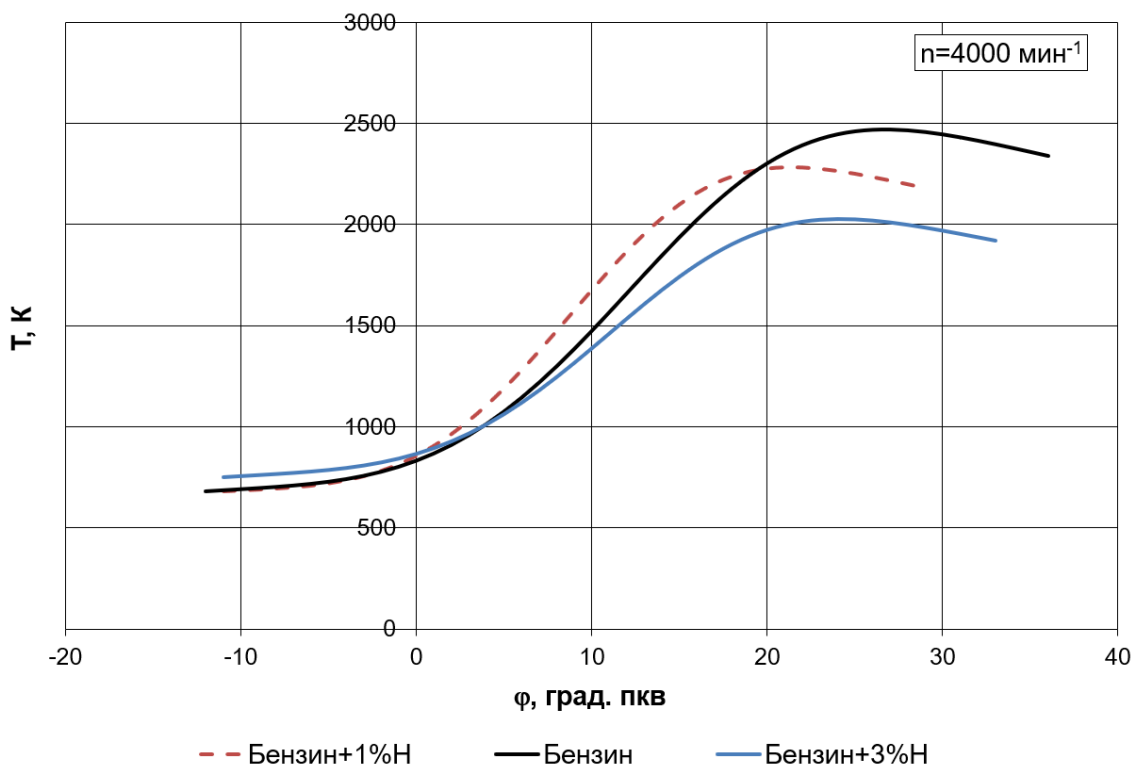


Рисунок 32 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима  $4000 \text{ мин}^{-1}$

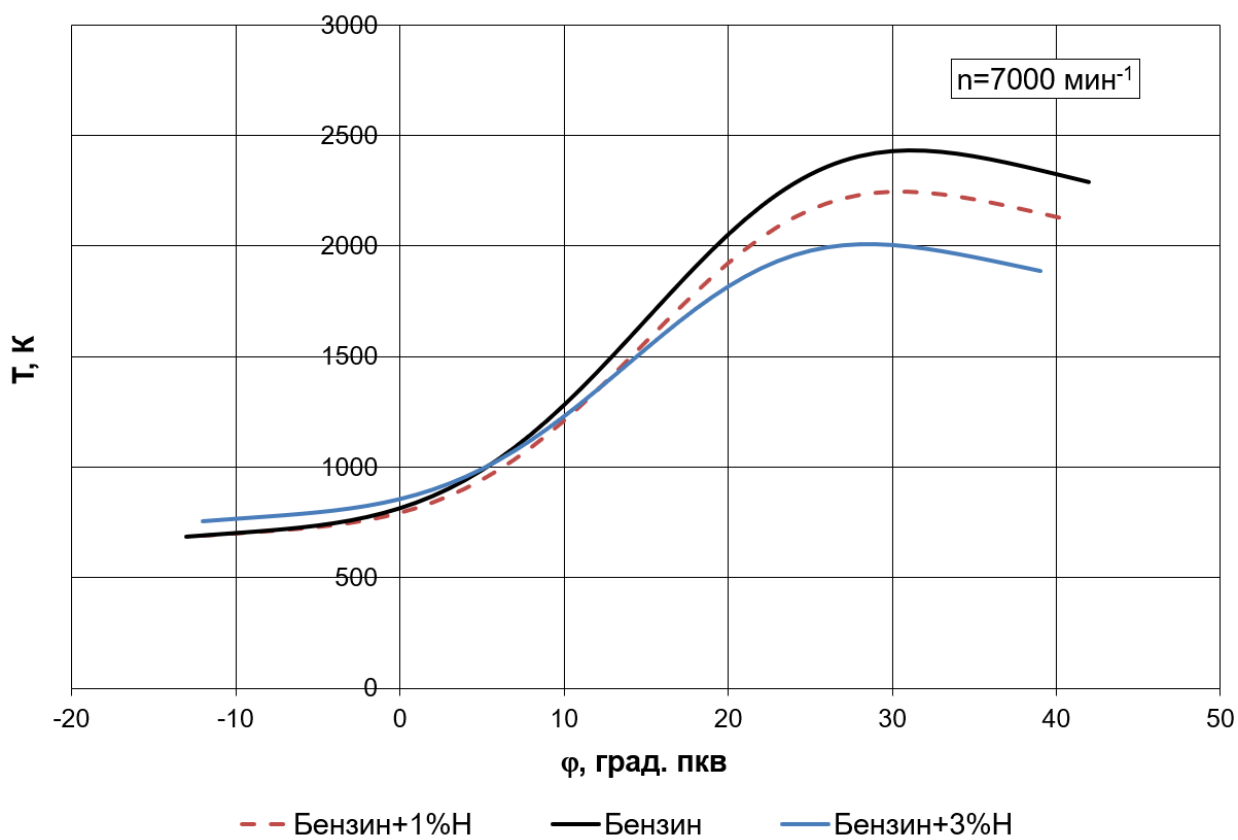


Рисунок 33 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима  $7000 \text{ мин}^{-1}$

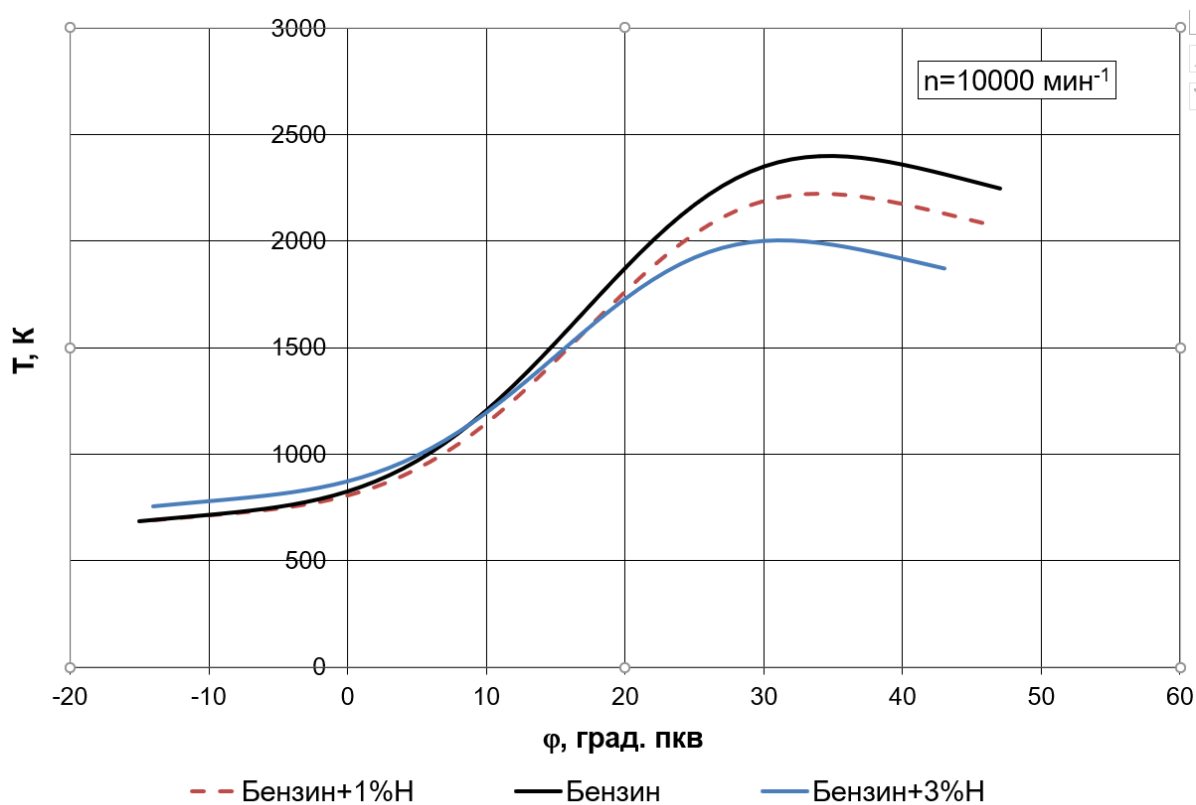


Рисунок 34 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 10000 мин<sup>-1</sup>

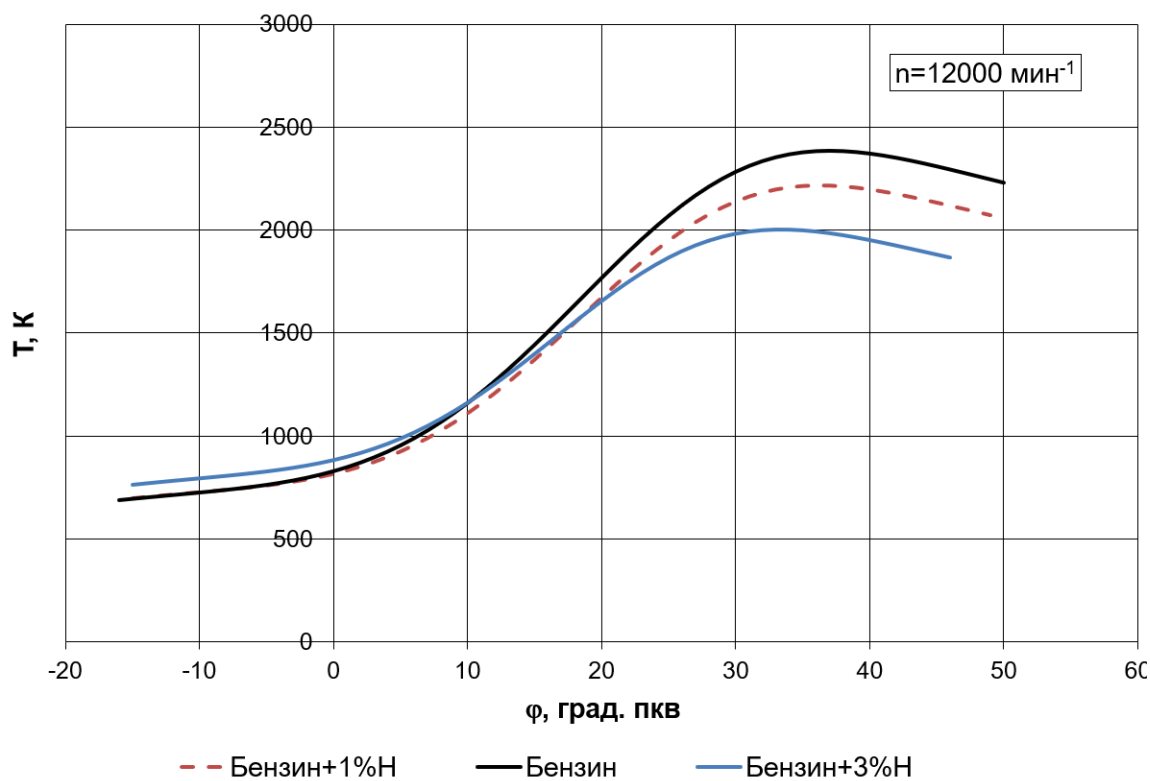


Рисунок 35 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима 12000 мин<sup>-1</sup>

Добавка водорода снижает максимальные давление и температуру цикла, что в сумме с повышенной реакционной способностью водорода приводит к улучшению условий, показывающих высокие перспективы снижения токсичности:

- По оксидам азота за счет снижения температуры цикла.
- По несгоревшим углеводородам, за счет снижения толщины и плотности пристеночного слоя, связанного с давлением в цилиндре двигателя и реакционной способностью топлива.
- По оксидам углерода, за счет общего снижения концентрации углерода в топливе.

#### **4.2 Влияние добавки водорода в бензовоздушную смесь на рабочий процесс ДВС с искровым зажиганием на эффективные показатели цикла**

Проводить анализ эффективных показателей работы двигателя правильнее всего по графическому изображению внешней скоростной характеристики (рисунки 36 – 38). Для условий работы на бензине наглядно видно (рисунок 36), наличие максимума крутящего момента для минимальной частоты вращения. С ростом доли водорода в топливе снижается часовой расход топлива и эффективные показатели работы, в том числе удельный эффективный расход топлива. Снижение мощностных показателей при 1% добавляемого водорода составило 11%, а при 3% добавляемого водорода уже на 31-33% в зависимости от частоты вращения. Ухудшение удельного эффективного расхода топлива при 1% добавляемого водорода составило от 7 до 10%, а при 3% добавляемого водорода уже на 25-29% в зависимости от частоты вращения. Уменьшение массы расходуемого топлива при 1% добавляемого водорода составило от 2 до 4%, а при 3% добавляемого водорода уже от 4 до 7% в зависимости от частоты вращения.

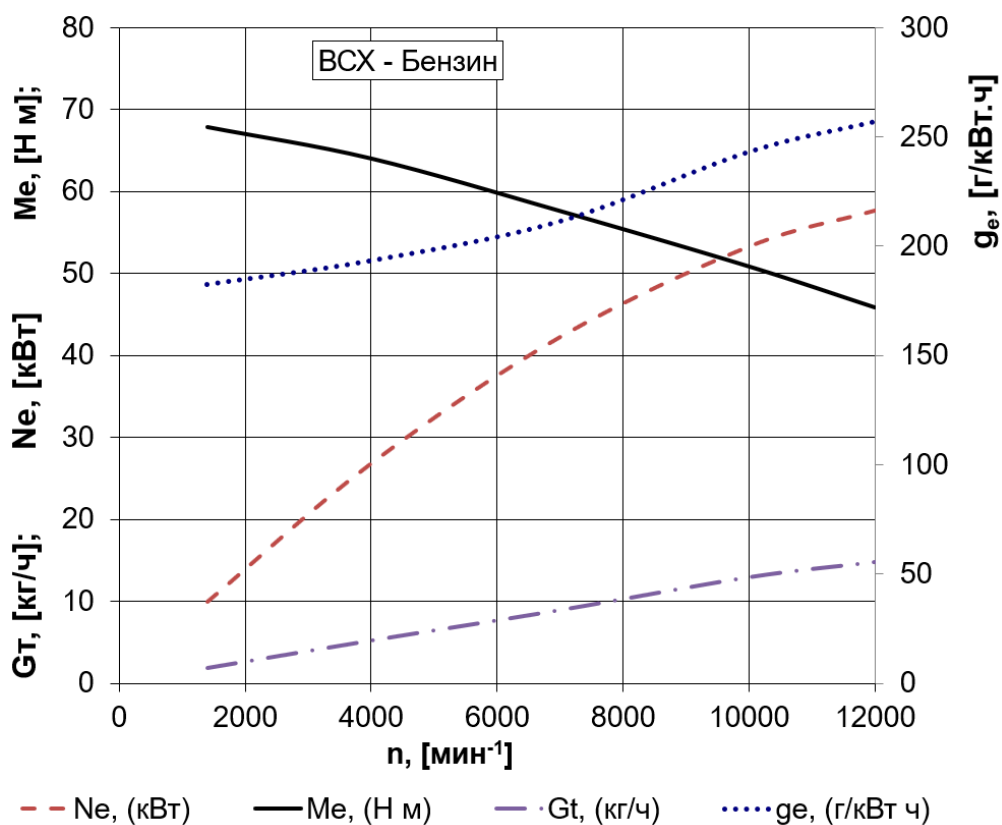


Рисунок 36 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с искровым зажиганием при работе на бензине

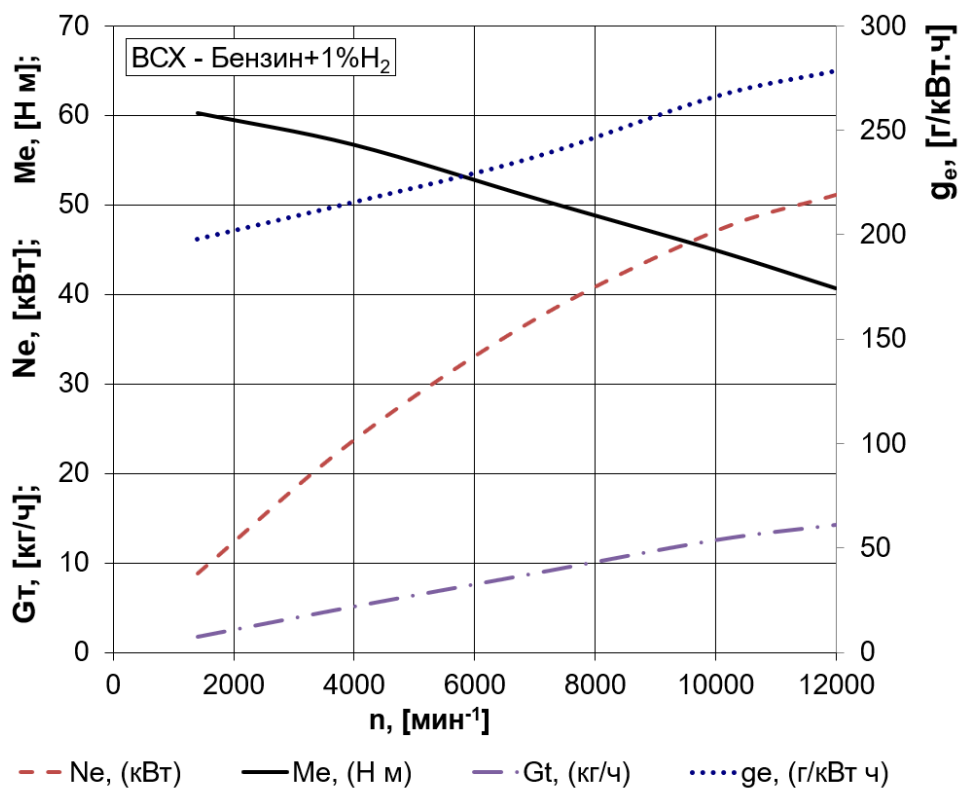


Рисунок 37 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с искровым зажиганием при работе на бензине с 1% H<sub>2</sub>



Из графиков внешней скоростной характеристики видно наличие высоких крутящих моментов на низких частотах вращения. Это говорит о влиянии гидравлических потерь во впускной системе на характеристики работы.

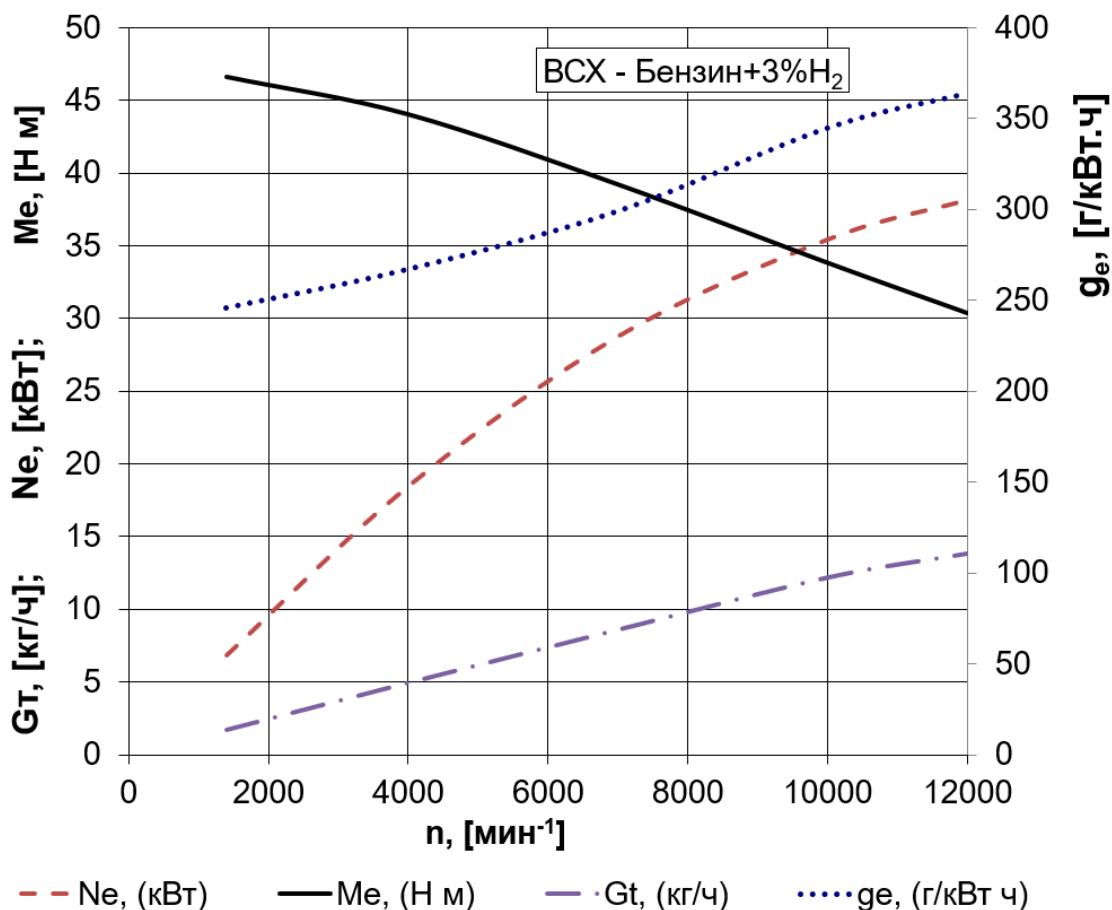


Рисунок 38 – Внешняя скоростная характеристика двигателя с искровым зажиганием при работе на бензине с 3% водорода

Наглядно распределение тепловых потерь хорошо иллюстрируют графики внешнего теплового баланса (рисунки 39 и 40). На графиках отчетливо видно увеличение доли тепла отданного в систему охлаждения при работе с добавками водорода, но зато при добавке водорода снижаются тепловые потери с отработавшими газами. Также при работе с добавками водорода наблюдается заметная доля неучтенных потерь теплоты до 4%.

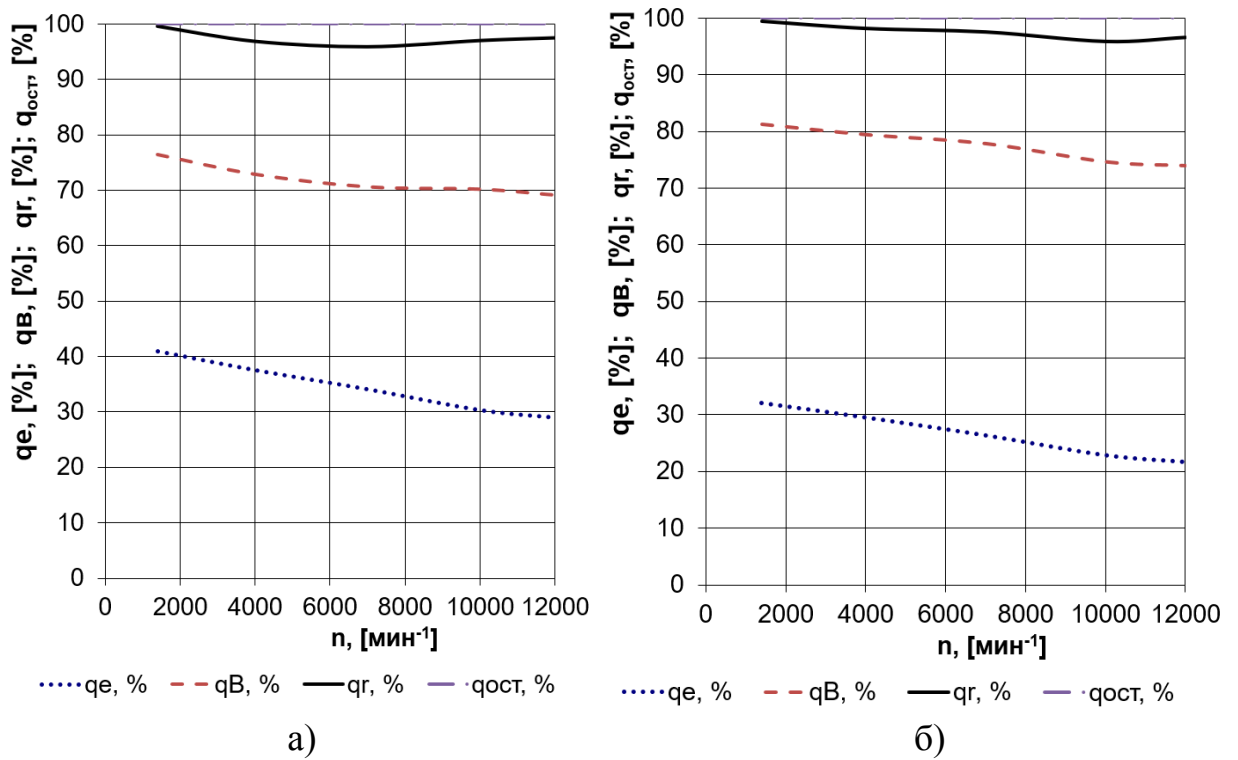


Рисунок 39 – Внешний тепловой баланс при работе на: (а) бензине с 1% водорода; (б) бензине с 3% водорода

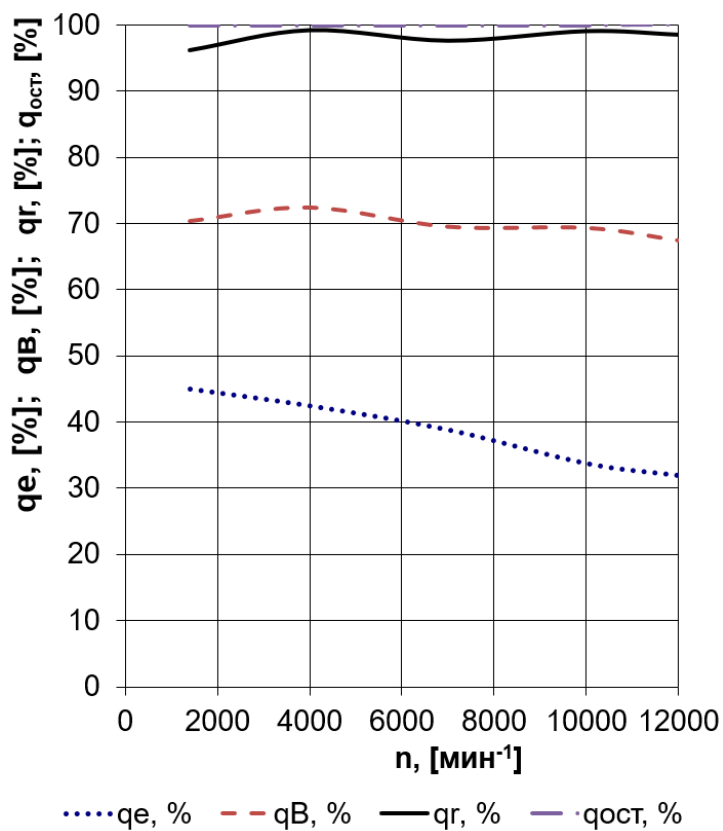


Рисунок 40 – Внешний тепловой баланс при работе на бензине

## **Выводы по 4-му разделу**

Добавка водорода снижает максимальные давление и температуру цикла, что в сумме с повышенной реакционной способностью водорода приводит к улучшению условий, показывающих высокие перспективы снижения токсичности:

- По оксидам азота за счет снижения температуры цикла.
- По несгоревшим углеводородам, за счет снижения толщины и плотности пристеночного слоя, связанного с давлением в цилиндре двигателя и реакционной способностью топлива.
- По оксидам углерода, за счет общего снижения концентрации углерода в топливе.

С ростом доли водорода в топливе снижается часовой расход топлива и эффективные показатели работы, в том числе удельный эффективный расход топлива. Снижение мощностных показателей при 1% добавляемого водорода составило 11%, а при 3% добавляемого водорода уже на 31-33% в зависимости от частоты вращения. Ухудшение удельного эффективного расхода топлива при 1% добавляемого водорода составило от 7 до 10%, а при 3% добавляемого водорода уже на 25-29% в зависимости от частоты вращения. Уменьшение массы расходуемого топлива при 1% добавляемого водорода составило от 2 до 4%, а при 3% добавляемого водорода уже от 4 до 7% в зависимости от частоты вращения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе проведен анализ влияния добавки водорода на рабочий процесс ДВС с искровым зажиганием. Получены основные выводы по работе:

- Добавление водорода в бензиновом ДВС позволяет повысить границы без детонационной работы и обеспечить возможность повышения степени сжатия.
- Водород снижает токсичность во всем диапазоне нормируемых токсичных компонентов.
- Доля добавляемого водорода должна быть минимальной для достижения необходимых эффектов, так как заправка водородом в ближайшее будущее мало реализуема, поэтому остается только возможности генерации водорода на борту автомобиля, а это как правило небольшие объемы.

### **Выводы по 1-му разделу.**

Таким образом из обзора литературы, показано, что добавление водорода оказывает большое влияние не только на характеристики двигателя и выбросы, но и на более низкий предел обедненной смеси и пропуски зажигания. Было обнаружено, что увеличение добавки водорода улучшает крутящий момент двигателя при, когда коэффициенте избытка воздуха равном или большем 1,098.

Из литературных источников получено, что нежелательных явлений сгорания, таких как обратное воспламенение и преждевременное воспламенение, можно избежать за счет использования распределенного впрыска в коллектор двух видов топлива. Кроме того, результаты показывают, что задержка по времени как для впрыска бензина, так и для бензина с впрыском водорода не требуется, и что обе форсунки могут запускаться в ВМТ.

### **Выводы по 2-му разделу.**

Тепловой расчет показал значительное влияние добавки водорода на мощностные и экономические характеристики работы. Получено:

- Повышение индикаторной мощности при работе на бензине в 9,2% по сравнению работой на бензине с добавкой 1% и на 22% с добавкой 3% водорода, но добавка водорода снижает часовой расход топлива.
- Увеличение удельного эффективного расхода топлива при добавке водорода связано с увеличением доли тепловых потерь на охлаждение, по сравнению с вводимой энергией в цилиндр двигателя. Это же сказывается и на снижении индикаторного коэффициента полезного действия с увеличением доли добавляемого водорода в бензовоздушную смесь.
- Температура в процессе сгорания при добавке водорода за счет сокращения продолжительности сгорания остается на примерно том же уровне что и при работе на бензине, а общая вводимая энергия с топливом снижается, что и приводит к росту удельных потерь при добавке водорода в топливо. Но за счет снижения температуры отработавших газов, потери теплоты с выхлопными газами при добавке водорода снижаются.

### **Выводы по 3-му разделу.**

Как мы видим переход бензинового двигателя на работу с добавками водорода практически не снизил нагрузки, действующие на коренные и шатунные шейки. В связи со значительными инерционными нагрузками, связанными с большой частотой вращения ( $12000 \text{ мин}^{-1}$ ), разница в давлении не приводит к осязательному различию в условиях нагружения деталей кривошипно-шатунного механизма.

Следует отметить, что не смотря на то что при добавке водорода нагрузки в элементах кривошипно-шатунного механизма не выросли, все равно следует ответственно относиться к проектированию деталей соприкасающихся с водородом, так как велика вероятность оводороживания

поверхности металла с его охрупчиванием, что может снизить ресурс двигателя.

#### **Выводы по 4-му разделу.**

Добавка водорода снижает максимальные давление и температуру цикла, что в сумме с повышенной реакционной способностью водорода приводит к улучшению условий, показывающих высокие перспективы снижения токсичности:

- По оксидам азота за счет снижения температуры цикла.
- По несгоревшим углеводородам, за счет снижения толщины и плотности пристеночного слоя, связанного с давлением в цилиндре двигателя и реакционной способностью топлива.
- По оксидам углерода, за счет общего снижения концентрации углерода в топливе.

С ростом доли водорода в топливе снижается часовой расход топлива и эффективные показатели работы, в том числе удельный эффективный расход топлива. Снижение мощностных показателей при 1% добавляемого водорода составило 11%, а при 3% добавляемого водорода уже на 31-33% в зависимости от частоты вращения. Ухудшение удельного эффективного расхода топлива при 1% добавляемого водорода составило от 7 до 10%, а при 3% добавляемого водорода уже на 25-29% в зависимости от частоты вращения. Уменьшение массы расходуемого топлива при 1% добавляемого водорода составило от 2 до 4%, а при 3% добавляемого водорода уже от 4 до 7% в зависимости от частоты вращения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. Allgeier, T. Advanced emission and fuel economy concept using combined injection of gasoline and hydrogen in SI engines / T. Allgeier [и др.] // SAE. - 2004. - №2004-01-1270.
3. 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.
4. Au, M. Hydrogen storage properties of magnesium based nanostructured composite materials / M. Au // *Materials Science and Engineering*. - 2005. - Т. 117. - №1. - С. 37-44.
5. 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
6. 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
7. Chmela, F., Dimitrov, D. Simulation der Verbrennung bei Vorkammer-Großgasmotoren. in: 11. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors. Graz. 2007.
8. Chmela, F., Dimitrov, D., Pirker, G., Wimmer, A.: Konsistente Methodik zur Vorausrechnung der Verbrennung in Kolbenkraftmaschinen. *MTZ Motortechnische Zeitschrift* 67 (2006) 6.
9. Collier, K. Emission results from the new development of a dedicated hydrogen - enriched natural gas heavy duty engine / K. Collier, N. Mulligan, D. S. Shin, S. Brandon // SAE. - 2005. - №2005-01-0235.

10. David, E. An overview of advanced materials for hydrogen storage / E. David // Journal of Materials Processing Technology. - 2005. - №162. - C. 169-177.
11. 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.
12. Dehoche, Z. Ti-V-Mn based alloys for hydrogen compression system / Z. Dehoche, M. Savard, F. Laurencelle, J. Goyette // Journal of Alloys and Compounds. - 2005. - T. 400. - №1-2. - C. 276-280.
13. Dobski, T., Wawrzyniak, J., Jancy, B.: Combustion of Low Calorific Natural gases in Gas Engines in Pipeline Gas Transportation Systems. in: 5. Dessauer Gasmotoren-Konferenz. Dessau. 2007.
14. Du, Y.L. Optimization of Zr-based hydrogen storage alloys for nickel-hydride batteries / Y. L. Du, G. Chen, G. L. Chen // Intermetallics. - 2005. - T. 13. - №3-4. - C. 399-402.
15. Flekiewicz, B. Hydrogen enriched CNG - a tool for dual fuel engine overall performance improvement / B. Flekiewicz, M. Flekiewicz // SAE. - 2009. - №2009-01-2681. - C. 38-49.
16. Ganesh, R.H. Hydrogen fueled spark ignition engine with electronically controlled manifold injection: An experimental study / R. H. Ganesh [и др.] // Renv. Energy. - 2008. - №33(8). - C. 1324-1333.
17. Haslacher, R., Skalla, Ch., Jauk, Th., Eichlseder, H.: Einsatz optischer Messmethoden bei der Entwicklung von Brennverfahren für Wasserstoff-Erdgas-Gemische. in: 6. Dessauer Gasmotorenkonferenz. Dessau-Roßlau. 2009.
18. 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
19. 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.



20. Knop, V. Modeling of combustion and nitrogen oxide formation in hydrogen-fuelled internal combustion engines within a 3D CFD code / V. Knop, A. Benkenida, S. Jay, O. Colin // International Journal of Hydrogen Energy -2008.
21. Levin, D.V. Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application / D. V. Levin, L. Pitt, M. Love // International Journal of Hydrogen Energy. - 2004. - №29. - С. 173-185.
22. Lönnqvist, T.; Sanches-Pereira, A.; Sandberg, T. Biogas potential for sustainable transport—a Swedish regional case. J. Clean. Prod. 2015, 108, 1105–1114.
23. Lyng, K.A.; Brekke, A. Environmental Life Cycle Assessment of Biogas as a Fuel for Transport Compared with Alternative Fuels. Energies 2019, 12, 532.
24. Polasek, M. Application of advanced simulation methods and their combination with experiments to modeling of hydrogen fueled engine emission potentials / M. Polasek, J. Macek, M. Takats, O. Vitek // SAE. - 2002. - №2002-01-0373.
25. Taizhong, H. Influence of V content on structure and hydrogen desorbtion performance of TiCrV-based hydrogen storage alloys / H. Taizhong, W. Zhu, X. Baojia, H. Tiesheng // Materials Chemistry and Physics. - 2005. - №93. - С. 544-547.
26. Бортников, Л.Н. Оценка коэффициента полезного действия двигателя с искровым зажиганием при работе на бензоводородовоздушной смеси / Л. Н. Бортников, М. М. Русаков // Интеллектуальные системы в производстве. - 2007. - №2. - С. 166-170.
27. Булычев, Б.М. Молекулярные и ионные гидриды металлов как источники водорода для энергетических установок / Б. М. Булычев, П. А. Стороженко // Сборник тезисов второго Международного симпозиума «Безопасность и экономика водородного транспорта». - 2003. - С. 30-31.
28. Вибе, И.И. Уточненный тепловой расчет двигателя / И.И. Вибе// М. Машиностроение, 1971. - с.282

29. Коровин, Н.В. Водородные топливные элементы. Состояние и проблемы / Н. В. Коровин // 7-я Международная конференция "Водородное материаловедение и химия углеродных материалов". - 2001. - С. 928-929.
30. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учебное пособие для вузов / А.И. Колчин, В.П. Демидов // 4-е изд., стер. – М: Высш. шк., 2008. - 496 с.: ил.
31. Русаков, М.М. Автомобильные двигатели с добавкой водорода в топливно-воздушную смесь / М. М. Русаков [и др.] // Научно-технический конгресс по двигателестроению НТКД - 2008. - 2008. - С. 142-143.
32. Русаков, М.М. Международная научно-практическая конференция «Иновация - 2008», / М. М. Русаков [и др.] -2008. - С. 102-103.
33. Тарасов, Б.П. Металлогидридные системы обратимого хранения водорода / Б. П. Тарасов // Сборник тезисов второго Международного симпозиума «Безопасность и экономика водородного транспорта». - 2003. - С. 38-39.