

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 Анализ влияния арктического дизельного топлива (-40°C) на рабочий процесс ДВС

Студент

И.В. Павлов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент В.В. Смоленский

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

Тольятти 2021

## АННОТАЦИЯ

Исследование путей перехода на возобновляемые источники энергии, а именно исследование эффективности применения биотоплива в условиях пониженных температур (минус 40°C) является значимой и актуальной задачей. Поэтому в бакалаврской работе представлен анализ влияния арктического дизельного топлива (минус 40°C) на рабочий процесс ДВС, а также дана оценка эффективности применения биодизельного смесового топлива в условиях Арктики.

Целью бакалаврской работы является оценка влияния арктического дизельного топлива (минус 40°C) на рабочий процесс дизельного двигателя.

В бакалаврской работе проведен расчет тракторного дизельного двигателя для условий эксплуатации при температуре минус 40°C. 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 30 рисунков, 17 таблиц, списка использованных источников (29 источников). Основной текст изложен на 53 страницах.

Графическая часть работы содержит 8 листов, из них 2 формата А0 и 6 формата А1 иллюстрирующих материал, представленный в пояснительной записке, а именно анализ влияния арктического дизельного топлива (-40°C) на рабочий процесс ДВС.

## ABSTRACT

The study of ways to switch to renewable energy sources, namely, the study of the effectiveness of the use of biofuels in conditions of low temperatures (minus 40 ° C) is a significant and urgent task. Therefore, in the bachelor's work, an analysis of the effect of Arctic diesel fuel (minus 40 ° C) on the working process of an internal combustion engine is presented, as well as an assessment of the efficiency of using biodiesel mixed fuel in the Arctic.

The aim of the bachelor's work is to assess the impact of Arctic diesel fuel (minus 40 ° C) on the working process of a diesel engine.

In the bachelor's work, a calculation of a tractor diesel engine was carried out for operating conditions at a temperature of minus 40 ° C. The bachelor's work consists of an explanatory note and a graphic part. The explanatory note consists of the following sections:

The explanatory note consists of an annotation, an introduction, 4 sections, a conclusion with the main results and conclusions, contains 30 figures, 17 tables, a list of sources used (29 sources). The main text is set out on 53 pages.

The graphic part of the work contains 8 sheets, of which 2 are A0 and 6 are A1, illustrating the material presented in the explanatory note, namely the analysis of the effect of Arctic diesel fuel (-40 ° C) on the internal combustion engine workflow.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Требования к арктическому и зимнему топливу для дизельных двигателей .....	6
1.1 Дизельное и арктическое топливо.....	6
1.2 Биодизельное топливо.....	8
1.3 Обеспечения возможности применения биодизельного топлива в условиях низких температур.....	13
2 Тепловой расчет проектируемого двигателя .....	17
3 Кинематический и динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя .....	27
3.1 Кинематический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя .....	27
3.2 Динамический расчет кривошипно-шатунного механизма двигателя .....	29
4 Анализ влияния арктического дизельного топлива (минус 40°С) на рабочий процесс ДВС .....	38
4.1 Влияния арктического дизельного топлива (минус 40°С) на максимальную температуру и давление цикла .....	38
4.2 Влияния арктического дизельного топлива (минус 40°С) на эффективные показатели цикла .....	44
Заключение .....	48
Список используемых источников .....	51

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с интенсивным освоением Арктики для России особенно остро стоит вопрос обеспечения потребителей высококачественным низкозастывающим дизельным топливом [1]. Потребность в зимнем и арктическом дизельном топливе в России постоянно растет, в тоже время объёмы его производства реализованы менее чем наполовину. Выпуск этого вида топлива должен составлять не менее 30 % от общего объема производства дизельного топлива, однако фактический объем его производства не превышает 17 % [2].

В настоящее время производство арктического топлива осуществляется из нефтяного сырья несколькими способами: понижением температуры конца кипения, каталитической депарафинизацией, добавлением депрессорных присадок [3, 4]. Недостатками данных методов является сокращение глубины переработки нефти, отсутствие отечественных недорогих катализаторов депарафинизации, дороговизна депрессорных присадок. Кроме того, основные производства арктического дизельного топлива удалены от мест их потребления, что значительно удорожает его стоимость.

Дизельное топливо – это разновидность мазута. Его получают путем фракционной перегонки сырой нефти при температуре от 200 °С до 350 °С при атмосферном давлении, в результате чего получается смесь углеродных цепей, которые обычно содержат от 8 до 21 атома углерода на молекулу с диапазоном удельного веса 0,76–0,94. Качество дизельного топлива определяется цетановым числом, которое обычно находится в диапазоне 30–60. Высокое цетановое число указывает на возможность легкого запуска и плавной работы двигателя. Цетановое число является аналогом октанового числа автомобильного двигателя с цетаном (н-гексадекан,  $C_{16}H_{34}$ ), имеющим произвольно присвоенное число 100. На другом конце шкалы гептаметилнонан, изомер цетана, имеет назначенное цетановое число 0.

# 1 Требования к арктическому и зимнему топливу для дизельных двигателей

## 1.1 Дизельное и арктическое топливо

Арктическое и зимнее дизельное топливо должно соответствовать требованиям по ГОСТ Р 55475-2013 и изготавливаться по утвержденной технологии.

По физико-химическим и эксплуатационным показателям дизельное топливо в зависимости от климатических условий применения (З, А) и предельной температуры фильтруемости (минус 32, 38, 44, 48, 52) должно соответствовать требованиям, указанным в таблице 1.

Таблица 1 – Требования к топливу по физико-химическим и эксплуатационным показателям дизельное топливо в зависимости от климатических условий применения (З, А)

Наименование показателя	Значение				
	З-32	З-38	А-44	А-48	А-52
1 Цетановое число, не менее	48,0	47,0			
2 Цетановый индекс, не менее	46,0	43,0			
3 Плотность при 15°C, кг/м	800,0-855,0				
4 Массовая доля полициклических ароматических углеводородов, %, не более	8,0				
5 Массовая доля серы, мг/кг, не более: – К3 – К4 – К5	350,0 50,0 10,0				
6 Температура вспышки в закрытом тигле, °С, не ниже	40	30			
7 Коксуемость 10%-ного остатка разгонки, % масс., не более	0,30				
8 Зольность, % масс., не более	0,01				
9 Массовая доля воды, мг/кг, не более	200				
10 Общее загрязнение, мг/кг, не более	24				
11 Коррозия медной пластинки (3 ч при 50 °С), единицы по шкале	Класс 1				
12 Окислительная стабильность: – общее количество осадка, г/м, не более	25				

Продолжение таблицы 1

13 Смазывающая способность: – скорректированный диаметр пятна износа при 60°C, мкм, не более	460				
14 Кинематическая вязкость при 40 °С, мм <sup>2</sup> /с	1,500-4,500	1,400-4,500	1,200-4,000		
15 Фракционный состав: – перегоняется до температуры 180°C, % об., не более – 95% об. перегоняется при температуре, °С, не выше	10  360				
16 Температура помутнения, °С, не выше	-22	-28	-34	-38	-42
17 Предельная температура фильтруемости, °С, не выше	-32	-38	-44	-48	-52
<p>Для топлива экологических классов К3 и К4 содержание полициклических ароматических углеводородов должно быть не более 11%, для топлива экологического класса К5 - не более 8%.</p> <p>Значение для показателя 7 определяют до введения присадки, улучшающей воспламенение. Использование присадок не освобождает изготовителя от соблюдения требований к коксуемости 10%-ного остатка разгонки не более 0,30% масс. до введения присадок.</p>					

Температура самовоспламенения дизельного топлива:

- зимнего – 310°C;
- арктического – 330°C.

Температурные пределы распространения пламени дизельного топлива:

- зимнего: нижний минус 62°C; верхний минус 105°C;
- арктического: нижний минус 57°C; верхний минус 100°C.

Взрывоопасная концентрация паров дизельного топлива в смеси с воздухом составляет 2 % объема – 3 % объема.

Допускается вырабатывать и поставлять топливо марок А и З с температурой застывания минус 45 °С и цетановым числом не менее 40 только для федеральных государственных нужд по государственному оборонному заказу продукции.

Общие требования к дизельному топливу приведены в ГОСТ 305—2013 и представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Общие требования к дизельному топливу

Наименование показателя	Значение для марки			
	Л	Е	З	А
1 Цетановое число, не менее	45			
2 Фракционный состав:				
– 50% перегоняется при температуре, °С, не выше	280	280	280	255
– 95% (по объему) перегоняется при температуре °С, не выше	360	360	360	360
3 Кинематическая вязкость при 20 °С, мм /с (сСт)	3,0-6,0	3,0-6,0	1,8-5,0	1,5-4,0
4 Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °С не ниже:				
– для тепловозных и судовых дизелей	62	62	40	35
– для дизелей общего назначения	40	40	30	30
5 Массовая доля серы, мг/кг, не более	500-2000			
6 Массовая доля меркаптановой серы, %, не более	0,01			
7 Массовая доля сероводорода	Отсутствие			
8 Испытание на медной пластинке	Выдерживает. Класс 1			
9 Содержание водорастворимых кислот и щелочей	Отсутствие			
10 Кислотность, мг КОН на 100 см топлива, не более	5			
11 Йодное число, г йода на 100 г топлива, не более	6			
12 Зольность, %, не более	0,01			
13 Коксуемость, 10%-ного остатка, не более	0,20			
14 Общее загрязнение, мг/кг, не более	24			
15 Содержание воды, мг/кг, не более	200			
16 Плотность при 15 °С, кг/м, не более	863,4	863,4	843,4	833,5
17 Предельная температура фильтруемости, °С, не выше	- 5	- 15	-25/-35	- 45

## 1.2 Биодизельное топливо

Нефтяные ресурсы, которые являются очень важными энергоресурсами в мире, очень быстро истощаются. С каждым годом объемы добычи и использования этих ресурсов увеличиваются, что приводит к быстрому загрязнению окружающей среды. В свою очередь, такое загрязнение

окружающей среды значительно влияет на климатические условия, которые могут привести к глобальному потеплению.

Важными параметрами, влияющими на использование топлива в зимние месяцы, являются температура или точка засорения холодного фильтра (CFPP, ° C) и температура помутнения или точка помутнения (CP, ° C) [2].

CFPP определяет температуру блокировки холодного фильтра, которая характеризует фильтрацию (поток через топливные фильтры) при низких температурах. При понижении температуры дизельного топлива сначала образуются кристаллы парафина, количество которых постоянно увеличивается до тех пор, пока весь объем не парафируется (застывает). В настоящее время в стандартах не важна начальная температура образования кристаллов, когда топливо все еще протекает через фильтр, или конечная температура, когда топливо затвердевает, а температура CFPP, которая на  $\sim 10^{\circ}\text{C}$  ниже, чем начальная температура образования кристаллов, температура и при которой дизельное топливо больше не может протекать через фильтр, поскольку он уже заполнен кристаллами парафина.

В свою очередь, температура помутнения является начальной температурой образования кристаллов, когда топливо все еще протекает через фильтр.

Стандарт определяет, что точка закупоривания холодного фильтра не может быть выше, чем пять климатических классов, определенных для арктического климата и суровых зимних условий.

Анализируя исследования смесей ископаемого топлива и биодизеля, проведенные в других странах, определение точки засорения холодного фильтра и точки помутнения является одним из наиболее важных факторов эффективности применения биотоплива. Например, в Китае создана модель искусственной нейронной сети для прогнозирования CFPP смешанного дизельного топлива с использованием входных параметров кинематической

вязкости, плотности, пересечения рефракции, CFPP и массовых процентов составляющих дизельных топлив [4].

Основные физико-технические характеристики биотоплива и традиционных видов топлив приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Физико-технические характеристики биотоплива и традиционных видов топлив

Характеристика	Биодизель (Метиловый Эфир)	Мазут	Дизельное топливо
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1220	960	850
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	17,5	40,7	42,9
Температура потери текучести, °С	-9/-36	36/-5	-5/-10
Температура вспышки, °С	70-110	90-140	65-85
Температура воспламенения, °С	110-120	150-210	120-160
рН	2,43	6,5-7	5-6
Содержание золы, % (массы)	0,13	0,03	0,005
Содержание воды, % (массы)	21	0,1	0,1
Элементарный состав, %			
– Углерод	78	85,9	86,6
– Водород	11	9,9	12,5
– Кислород	10,9	0,5	0,3
– Сера	0	2,1	0,4
– Азот	0,1	1,6	0,3

Чтобы использовать близость стран Южной и Юго-Восточной Азии, смеси биодизеля из ятрофы и из пальмы были исследованы в Индии для изучения их физико-химических свойств и получения оптимального сочетания для достижения лучших низкотемпературных свойств с улучшенными устойчивостью к окислению [5]. К сожалению, экспериментальных исследований, результаты которых можно было бы напрямую применить к арктическим климатическим условиям, найти сложно, но имеющийся материал в работах [6,7] можно обобщить при помощи рисунков 1 и 2, а также таблицы 3.

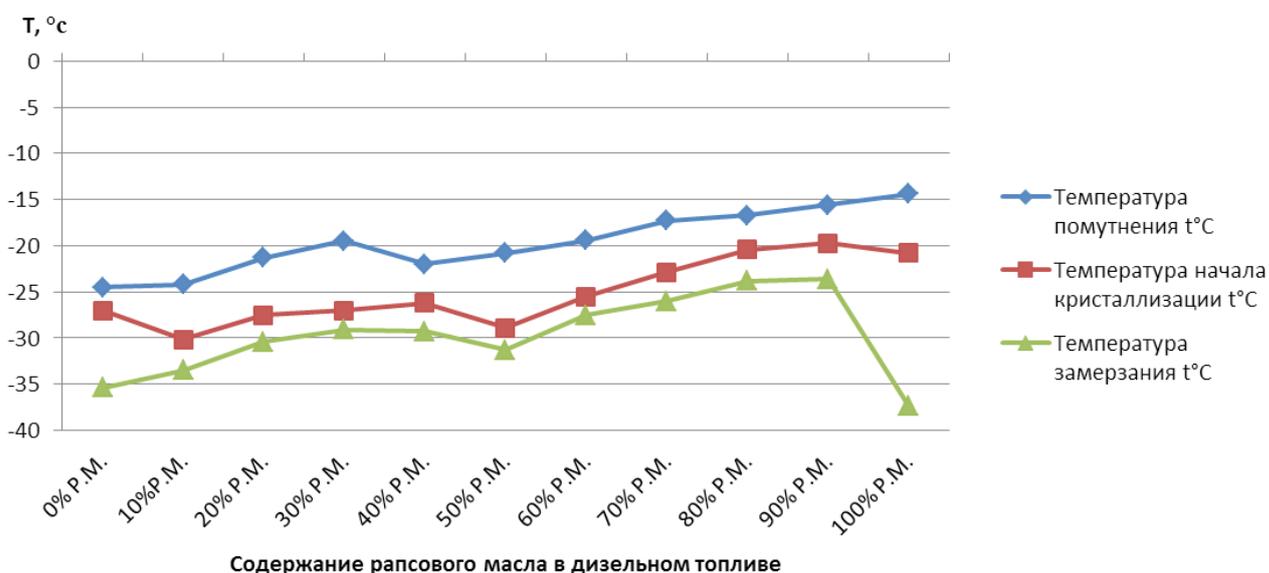


Рисунок 1 – Результаты исследований низкотемпературных свойств биодизельного топлива

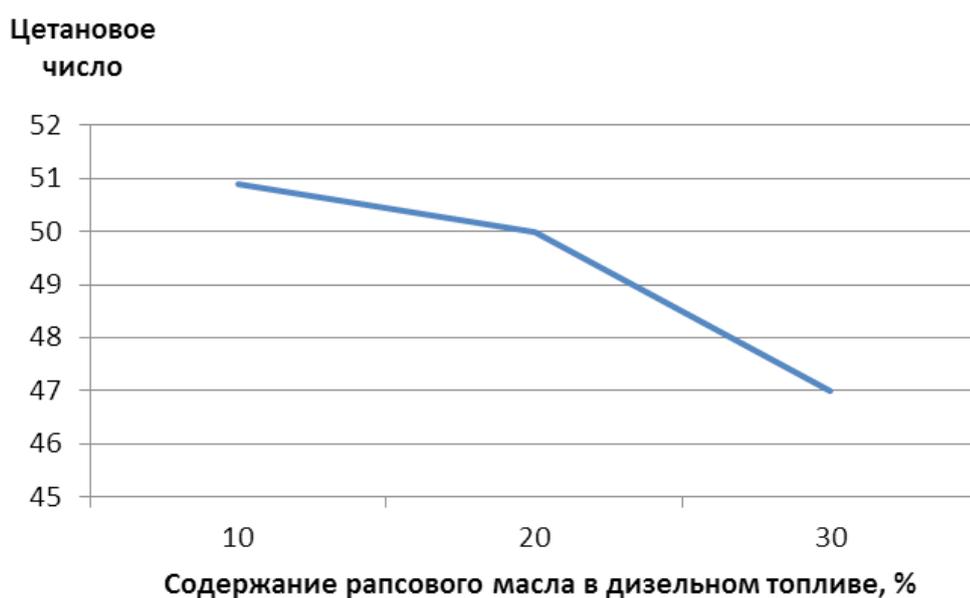


Рисунок 1.2 – Диаграмма изменения цетанового числа с увеличением процентного содержания рапсового масла в дизельном топливе

Топливо из натуральных возобновляемых источников, таких как новые и отработанные растительные масла и животные жиры, для использования в дизельном двигателе. Биодизельное топливо по своим физическим свойствам очень похоже на дизельное топливо, полученное из нефти, но его эмиссионные свойства превосходят его. Использование биодизеля в обычном

дизельном двигателе существенно снижает выбросы несгоревших углеводородов, окиси углерода, сульфатов, полициклических ароматических углеводородов, нитрированных полициклических ароматических углеводородов и твердых частиц. Дизельные смеси, содержащие до 20% биодизеля, можно использовать почти во всем дизельном оборудовании, а смеси более высокого уровня и чистый биодизель можно использовать во многих двигателях с небольшими модификациями или без них. Смеси более низкого уровня совместимы с большинством оборудования для хранения и распределения, но для смесей более высокого уровня требуется особое обращение.

Биодизель – это обобщенное название жидких топлив, получаемых путём этерификации масел или переэтерификации жиров. Соответствующим агентом этерификации является метиловый или – реже – этиловый спирт. Таким образом, биодизель – это многокомпонентные жидкие топлива, состоящие из метиловых или этиловых эфиров высших ненасыщенных и жирных кислот (рисунок 3). Поэтому было бы правильнее употреблять термин биодизель во множественном числе.

Биодизельное топливо производится из масел или жиров, которые являются углеводородами. Чаще всего используется свежее соевое масло, хотя биодизельное топливо можно производить из масла семян горчицы или отработанного растительного масла (например, отработанного масла из ресторанных фритюрниц). Эти углеводороды фильтруются и смешиваются со спиртом, таким как метанол, и катализатором (гидроксид натрия или гидроксид калия), что приводит к химической реакции, основными продуктами которой являются биодизельное топливо и глицерин. Биодизель относится к дизельному топливу на основе растительного масла или животного жира, состоящему из длинноцепочечных алкиловых (метиловых, пропиловых или этиловых) эфиров. Продуктами катализируемой реакции между жирами или жирными кислотами и метанолом являются метиловые эфиры жирных кислот (FAME).

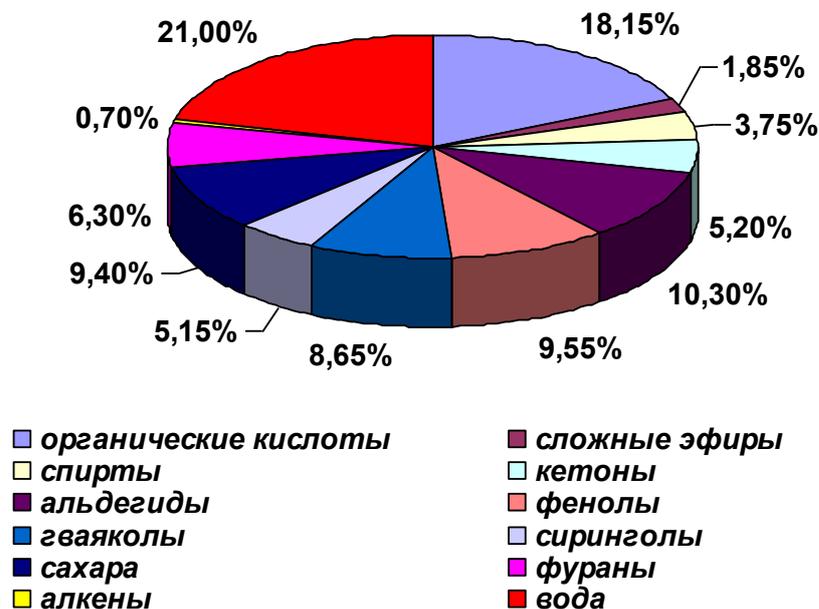


Рисунок 3 – Химический состав биотоплива ( $C_{11,9}O_{0,7}$ )

Для обеспечения возможности применения биодизельного топлива в условиях низких температур разработан комплекс способов снижения температуры застывания биодизельного топлива:

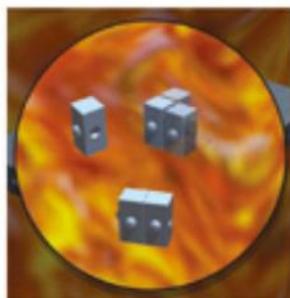
- 1) использование присадок к топливу;
- 2) озонирование;
- 3) винтеризация

### 1.3 Обеспечения возможности применения биодизельного топлива в условиях низких температур

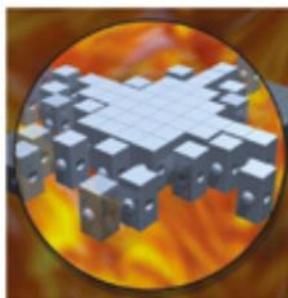
#### 1.3.1 Использование присадок к топливу

Присадки понижают температуру помутнения, температуру застывания и улучшают качество фильтрации топлива на холоде путем изменения формы, размера, скорости роста и объединения кристаллов, не позволяя образоваться крупным кристаллам при низких температурах (рисунок 4).

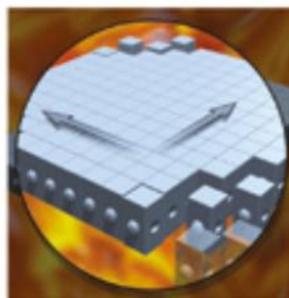
### Без депрессора



Кристаллизация молекул парафина при температурах ниже температуры помутнения



При слоистом росте в основном образуются иглы и пластины

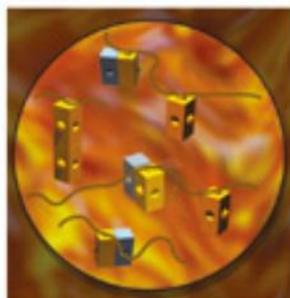


Кристаллы парафина продолжают расти

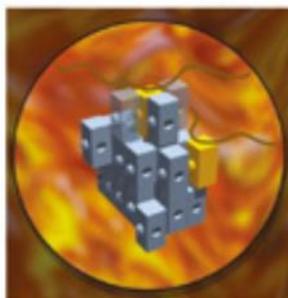


Формирование большой, структурированной трехмерной сети кристаллов с размерами > 100 мкм, течение масла прекращается

### С депрессором



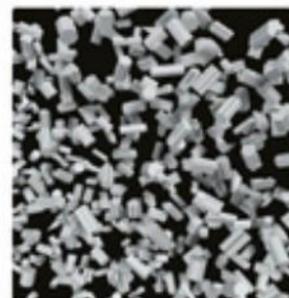
Происходит совместная кристаллизация молекул парафина и кристаллических элементов депрессоров



Депрессор меняет морфологию кристаллов парафина



Сближение кристаллов парафина предотвращается, структуры получаются мельше и хаотичнее



Не происходит агрегирования гелеподобной парафиновой структуры, и масло продолжает течь без предела текучести



Кристаллический элемент, сформированный n-парафинами



Кристаллический элемент, сформированный депрессором



Основная цепь полимера

Рисунок 4 – Различие скорости роста и объединения кристаллов с присадками и без них

Видно что добавление диспергирующих присадок позволяет предотвратить объединение микрочастиц парафинов в большие группы кристаллов которые способны забить фильтр грубой очистки и стать причиной невозможности работы двигателя при низких температурах.

### 1.3.2 Озонирование

Микроскопические исследования при низкой температуре показали, что озонирование масла препятствует агрегации частиц биодизеля, не давая образовываться кристаллам.

### 1.3.3 Винтеризация

Винтеризация – процесс, представляющий собой медленное охлаждение биодизеля до температуры замерзания, по завершению которого

все продукты кристаллизации отделяются путем фильтрации. Улучшение «холодных свойств» биодизеля происходит за счет удаления наиболее длинноцепочечных органических соединений (от 20 и более) за счет фильтрации после винтеризации. Температура винтеризации – около минус 8 °С.

Для терморегуляции во время фильтрации длинноцепочечных метиловых эфиров может использоваться солевой аппликатор.

### 1.3.4 Применение присадок для улучшения низкотемпературных свойств дизельного топлива

В таблице 4 приведены характеристики влияния присадок в биодизельное топливо на температуру помутнения.

Таблица 4 – Зависимость температуры помутнения биодизеля от присадки

Название присадки	Кол-во, % мас	Температура помутнения, °С
Д-110 – присадка на основе эфиров полиметакрилата со спиртами C <sub>12</sub> -C <sub>18</sub>	0,01	-1
	0,05	-3
	0,20	-3
	0,50	-3
Viscoplex-7-610 – присадка на основе эфиров полиметакрилатов	0,01	-1
	0,05	-2
	0,20	-2
	0,50	-2
Dodiflow – присадка на основе сополимеров этилена и винилацетата	0,05	-2
	0,10	-2
	0,20	-2
	0,50	-2
Присадка № 116 на основе эфиров полиметакрилата со спиртами C <sub>12</sub> -C <sub>18</sub> с 15% винилацетата	0,05	-2
	0,20	-3
	0,50	-4
	1,00	-4
	5,00	-6

В таблице 5 приведены характеристики влияния присадок в биодизельное топливо на температуру застывания

Рассмотрев результаты, приведенные в таблицах 4 и 5, можно сказать, что наиболее эффективной присадкой оказался образец марки Viscoplex,

произведенный немецкой компанией Evonik Industries, при концентрации 0,05 % от массовой доли несмотря на то, что при измерении температуры помутнения этот же образец не показал значительных изменений. Учтя все полученные данные, можно сделать вывод, что наиболее высокий эффект оказывают эфиры полиметакрилата в составе присадки.

Таблица 5 – Зависимость температуры помутнения биодизеля от присадки

Название присадки	Кол-во, % от массы топлива	Температура помутнения, °С
Д-110 – присадка на основе эфиров полиметакрилата со спиртами C <sub>12</sub> -C <sub>18</sub>	0,01	-5
	0,05	-31
	0,20	-11
	0,50	-11
Viscoplex-7-610 – присадка на основе эфиров полиметакрилатов	0,01	-5
	0,05	-35
	0,20	-13
	0,50	-13
Dodiflow – присадка на основе сополимеров этилена и винулацетата	0,05	-12
	0,10	-18
	0,20	-25
	0,50	-20
Присадка № 116 на основе эфиров полиметакрилата со спиртами C <sub>12</sub> -C <sub>18</sub> с 15% винулацетата	0,05	-7
	0,20	-9
	0,50	-13
	1,00	-16
	5,00	-15

### Выводы по первому разделу

Проведенный анализ возможности применения различных видов топлива для эксплуатации дизельного двигателя в условиях арктических температур (минус 40 °С) выявил возможность применения арктического дизельного топлива А44, а также как эквивалент ему смесь 70% зимнего дизельного топлива 338 и 30% биодизеля с 0,05 % от массовой доли биодизеля диспергирующей присадкой Viscoplex. Такой состав альтернативного арктического топлива позволяет получить необходимую температуру фильтруемости при сохранении цетанового числа в пределах, указанных в ГОСТ Р 55475-2013.

## 2 Тепловой расчет проектируемого двигателя

Согласно заданию на бакалаврскую работу, требуется провести тепловой расчет для оценки влияния арктического дизельного топлива (минус 40°C) на рабочий процесс ДВС. Для этого приводиться сравнение результатов расчета для 3-х видов топлива (таблица 6): дизельное лето, дизельное арктическое и смесевое топливо (30% биодизель с 70% зимним дизельным топливом).

Таблица 6 – Физико-технические характеристики исследуемых топлив

Характеристика топлива	Дизельное топливо	Арктического дизельного топлива А44	70% зимнего дизельного топлива 338 и 30% биодизеля
Цетановое число	45	40	42,1
Цетановый индекс	46	41	43
Молекулярная масса	230	235	257,5
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	863,4	833,5	949,45
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	42,9	43,03	35,371
Температура потери текучести, °С	-5/-10	-44	-40
Температура вспышки, °С	40	30	30
Температура воспламенения, °С	120-160	110-120	110-120
рН	5	5	2,43
Содержание золы, % (массы)	0,005	0,01	0,13
Содержание воды, % (массы)	0,1	0,2	21
Элементарный состав, %			
– Углерод	87,1	86,9	84,23
– Водород	12,5	12,9	12,36
– Кислород	0,4	0,2	3,41

Для анализа выбран дизельный двигатель СМД-31а для тракторов, представленный на рисунке 2. Его основные характеристики приведены в таблице 7.



Рисунок 2 – Тракторный дизельный двигателя СМД-31а

Таблица 7 – Технические характеристики двигателя СМД-31а

Параметр	Характеристики
Тип двигателя	4-тактный дизель с турбонаддувом и охлаждением наддувочного воздуха
Мощность (эксплуатационная), кВт (л.с.):	173 (235)
Номинальная частота вращения коленчатого вала, мин <sup>-1</sup>	2000
Число цилиндров	6
Диаметр цилиндра, мм	120
Ход поршня, мм	140
Степень сжатия	17
Порядок работы цилиндров	1-5-3-6-2-4
Направление вращения коленчатого вала (со стороны, противоположной маховику)	по часовой стрелке
Топливный насос	2-секционный распределительного типа правого вращения, с механическим всережимным регулятором и подкачивающим насосом поршневого типа

Продолжение таблицы 7

Форсунка	ФД-22М закрытого типа, с фиксированным распылителем с четырьмя распыливающими отверстиями
Воздухоочиститель:	3-ступенчатый: первая — вращающийся воздухозаборник; вторая - предочиститель с эжектированием пыли выпускными газами; третья - бумажный фильтр-патрон
Турбокомпрессор	ТКР8,5С-1
Максимальная степень повышения давления компрессора	1,83-1,85
Подача турбокомпрессора, кг/с	0,185±0,0027
КПД компрессора, не менее	0,71
КПД турбины, не менее	0,70
Диаметр колеса компрессора/ турбины, мм	110/ 110

Рассмотрим 5 скоростных режимов работы двигателя, основные начальные условия для расчета характеристик работы двигателя приведены в таблице 8. Предположим, что эффективность работы турбокомпрессора увеличивается вместе с частотой вращения двигателя линейно, что приводит к линейному увеличению степени повышения давления. Для анализа работы двигателя температура воздуха на впуске при работе на летнем дизельном топливе бралась 0° С, а для арктического и биотоплива минус 40° С.

Таблица 8 – Основные начальные условия для расчета характеристик работы двигателя

Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Коэффициент избытка воздуха	Степень повышения давления	КПД компрессора	Давление на впуске, МПа	Температура на впуске в двигатель, К		Плотность воздуха на впуске для 0 и -40 °С, кг/м <sup>3</sup>	
					0° С	-40 °С	0° С	-40 °С
600	1,35	1,6	0,71	0,16	328,442	280,34	1,697	1,988
900	1,35	1,61	0,72	0,161	328,447	280,35	1,707	2,001
1200	1,35	1,62	0,73	0,162	328,449	280,35	1,718	2,013
1600	1,35	1,64	0,74	0,164	329,189	280,98	1,735	2,033
2000	1,35	1,65	0,75	0,165	329,2	281	1,746	2,045

Из таблицы 8 видно, что понижение температуры окружающего воздуха с 0 до минус 40 ° С привело к увеличению плотности воздуха на впуске в среднем на 17 %, что может положительно сказаться на наполнении цилиндров.

Тепловой расчет производится по методике И.И. Вибе, 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 характеристики максимальный коэффициент избытка воздуха ограничен 1,35 в связи с требованиями к токсичности отработавших газов, то результаты расчета параметров рабочего тела проводятся (таблица 9) для каждого вида топлива, без учета частоты вращения.

Таблица 9 – Результаты расчета параметров рабочего тела

L <sub>0</sub> , кмоль возд/кг топл	l <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>O2</sub> , кмоль O <sub>2</sub> /кг топл.	M <sub>2</sub> , кмоль пр.сг./кг топл.	μ <sub>0</sub>
Дизельное топливо								
0,4986	14,429	0,67745	0,072583	0,0625	0,533101	0,036298	0,70448	1,0399
Арктического дизельного топлива А44								
0,5029	14,554	0,68318	0,072417	0,0645	0,537706	0,036611	0,71123	1,04107
70% зимнего дизельного топлива 338 и 30% биодизеля								
0,48089	13,917	0,65309	0,070192	0,0618	0,514172	0,035009	0,68117	1,043

Анализ результатов расчета процесса впуска (таблица 10) показал снижение температуры отработавших газов и удельного объема рабочего тела в конце процесса наполнения при температуре окружающего воздуха минус 40 ° С, что показывает большее количество заряда поступившего в цилиндр двигателя. Но в тоже время коэффициент наполнения относительно постоянных условий окружающей среды при переходе на арктические виды топлива снижается.

Таблица 10 – Результаты расчета процесса впуска

$n, \text{мин}^{-1}$	$\Delta p_a, \text{МПа}$	$p_a, \text{МПа}$	$T_r, \text{К}$	$p_r, \text{МПа}$	$\gamma_r$	$T_a, \text{К}$	$\eta_v$	$V_a, \text{м}^3/\text{кг}$
Дизельное топливо								
600	0,00264	0,15736	880	0,173	0,0257	342,28	0,9775	0,5990507
900	0,00599	0,15502	900	0,183	0,0272	343,58	0,9521	0,610403
1200	0,01071	0,15129	930	0,197	0,0293	345,58	0,9163	0,6290508
1600	0,01923	0,14477	1000	0,225	0,0331	350,66	0,8523	0,6670466
2000	0,03023	0,13477	1090	0,259	0,0384	357,33	0,7699	0,7301617
Арктического дизельного топлива А44								
600	0,0031	0,15690	755	0,173	0,0257	292,23	0,9745	0,5130496
900	0,00701	0,15398	780	0,183	0,027	293,47	0,9453	0,5249827
1200	0,01254	0,14945	820	0,197	0,0287	295,43	0,9042	0,5445061
1600	0,02252	0,14147	880	0,225	0,0329	300,06	0,831	0,5842351
2000	0,03541	0,12958	970	0,259	0,0385	306,53	0,7365	0,6515781
70% зимнего дизельного топлива 338 и 30% биодизеля								
600	0,0031	0,15690	690	0,173	0,0281	291,54	0,9745	0,5105651
900	0,00701	0,15398	725	0,183	0,0290	292,89	0,9453	0,5226315
1200	0,01254	0,14945	770	0,197	0,0306	294,9	0,9042	0,5421638
1600	0,02252	0,14147	820	0,225	0,0353	299,36	0,831	0,5814227
2000	0,03541	0,12958	885	0,259	0,0422	305,44	0,7365	0,6476448

Анализ результатов расчета параметров в конце сжатия и начала воспламенения (таблица 11) показал увеличение коэффициента молекулярного изменения рабочей смеси при снижении температуры в момент подачи топлива в цилиндр.

Таблица 11 – Результаты расчета параметров в конце сжатия и начала воспламенения

$n, \text{мин}^{-1}$	$\mu$	$n_l$	Угол опережения впрыска топлива, ° ПКВ	$V_y, \text{м}^3/\text{кг}$	$P_y, \text{МПа}$	$T_y, \text{К}$
Дизельное топливо						
600	1,0389	1,3703	3	0,03573	7,492715	972,1711
900	1,0388	1,3701	5	0,0373	7,137107	966,7684
1200	1,0388	1,37	7	0,03983	6,634415	959,3961
1600	1,0386	1,3694	9	0,04418	5,958492	955,8427
2000	1,0384	1,3687	10	0,04962	5,344397	962,9688
Арктического дизельного топлива А44						
600	1,04	1,3755	6	0,03187	7,170124	829,5946
900	1,04	1,3754	7	0,03324	6,853954	826,9833
1200	1,0399	1,3752	9	0,03606	6,248135	817,9899
1600	1,0398	1,3707	11	0,04082	5,430171	804,6919
2000	1,0395	1,374	13	0,04836	4,618054	810,7657

Продолжение таблицы 11

70% зимнего дизельного топлива З38 и 30% биодизеля						
600	1,0418	1,3755	5	0,0312	7,333079	832,7351
900	1,0418	1,3754	7	0,03309	6,853954	825,3386
1200	1,0417	1,3752	9	0,03591	6,248813	816,597
1600	1,0415	1,3747	12	0,04184	5,270611	802,5113
2000	1,0413	1,3741	15	0,05134	4,219368	788,4196

Анализ результатов коэффициентов термодинамического расчета (таблица 12) показал снижение коэффициента использования теплоты в связи с увеличением тепловых потерь в стенку цилиндра и систему охлаждения, это привело у росту продолжительности сгорания и увеличению угла опережения впрыска топлива при работе при температуре минус 40° С.

Таблица 12 – Коэффициенты термодинамического расчета

$n, \text{мин}^{-1}$	$\zeta$	$q_z, \text{Дж/кг}$	$E_2, \text{МПа}$	$\varphi_z, \text{град, пкв.}$	$m$
Дизельное топливо					
600	0,8	1633,8	92,728631	50	1,1
900	0,81	1651,9	92,011086	56	1,1
1200	0,82	1668,8	90,200467	62	1,2
1600	0,83	1683	85,78664	68	1,2
2000	0,84	1694,528	78,905723	75	1,2
Арктического дизельного топлива А44					
600	0,7	1422,3	94,255951	57	1,1
900	0,72	1461,1	94,626408	62	1,1
1200	0,74	1499,1	93,606388	67	1,2
1600	0,76	1533,4	89,239049	73	1,2
2000	0,78	1565,243	81,675968	80	1,2
70% зимнего дизельного топлива З38 и 30% биодизеля					
600	0,7	1217,1	81,048298	62	1,1
900	0,72	1250,7	81,366845	68	1,1
1200	0,74	1283,5	80,489755	71	1,2
1600	0,75	1294,9	75,724729	78	1,2
2000	0,76	1303,486	68,430293	85	1,2

Анализ результатов расчета процесса расширения и выпуска (таблица 13) показал, что при переходе на температуру минус 40° С происходит снижение температуры конца сгорания и отработавших газов, что приводит к ухудшению условий работы турбины турбокомпрессора, у которого

максимальная степень повышения давления составляет 1,83 – 1,85, и если при работе на летнем топливе необходимо применение регулирование максимального давления через дросселирующую аппаратуру (данный вывод сделан, исходя из того что при большем давлении эффективная мощность значительно выше заявленной в паспорте ДВС), то при низких температурах степень повышения давления 1,65 является максимальной.

Таблица 13 – Результаты расчета процесса расширения и выпуска

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$Vz'$ , м <sup>3</sup>	$Tz'$ , К	$Pz'$ , МПа	$\delta$	$n_2$	$P_b$ , МПа	$T_b$ , К	$T_r$ , К	$\Delta$ , %
Дизельное топливо									
600	0,1462	1860,81	3,64088	4,0968	1,216	0,65522	1371	879,441	-0,0635
900	0,167	1819,23	3,11711	3,6558	1,216	0,64388	1374	902,858	0,3175
1200	0,1914	1792,47	2,67871	3,2862	1,218	0,629	1383	939,428	1,0137
1600	0,2242	1762,68	2,24836	2,9747	1,218	0,59584	1390	1003,84	0,3841
2000	0,2815	1727,74	1,75508	2,5937	1,219	0,54922	1402	1091,01	0,0923
Арктического дизельного топлива А44									
600	0,1403	1572,79	3,21065	3,65585	1,229	0,652349	1168	749,986	-0,6641
900	0,1598	1561,85	2,800708	3,28625	1,229	0,64883	1189	779,446	-0,071
1200	0,1787	1566,64	2,511854	3,04779	1,225	0,64015	1217	821,644	0,2005
1600	0,2107	1553,75	2,111915	2,7727	1,228	0,6035	1231	885,579	0,634
2000	0,2621	1546,74	1,689522	2,48557	1,222	0,55389	1260	977,816	0,8058
70% зимнего дизельного топлива 338 и 30% биодизеля									
600	0,1634	1375,74	2,40958	3,12394	1,238	0,587724	1048	696,759	0,9795
900	0,1842	1364,89	2,121047	2,83734	1,235	0,58383	1066	723,784	-0,1677
1200	0,1566	1478,3	2,702105	3,46303	1,234	0,58332	1105	769,7	-0,0389
1600	0,229	1361,46	1,701123	2,53859	1,238	0,53673	1090	815,691	-0,5254
2000	0,277	1342,23	1,386398	2,3382	1,238	0,48423	1096	889,378	0,4947

Анализ результатов расчета индикаторных показателей рабочего цикла (таблица 14) показал, увеличение мощностных показателей работы двигателя при пониженной температуре за счет большей плотности воздуха на впуске, но при этом из-за больших теплотерь в стенку происходит снижение экономических показателей работы. Сравнивая оба рассматриваемых варианта арктического топлива, следует отметить значительное снижение как мощностных, так и экономических показателей при переходе на альтернативное топливо. Основное его преимущество — это более низкая стоимость и доступность.

Таблица 14 – 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
Дизельное топливо					
600	0,955382	1,694503	80,4904	0,46718	179,6224
900	0,9420523	1,639787	116,837	0,461316	181,906
1200	0,9458429	1,597579	151,7728	0,464123	180,8056
1600	0,9442526	1,504045	190,516	0,465035	180,4512
2000	0,9289067	1,351705	214,024	0,459853	182,4846
Арктического дизельного топлива А44					
600	0,8273974	1,713498	81,39269	0,406667	205,7274
900	0,8415615	1,703216	121,3564	0,414148	202,0111
1200	0,8470996	1,652954	157,0335	0,417593	200,3449
1600	0,8592642	1,562673	197,9422	0,425297	196,7155
2000	0,8543382	1,393132	220,5833	0,425166	196,7762
70% зимнего дизельного топлива 338 и 30% биодизеля					
600	0,7010049	1,45881	69,29478	0,402642	252,7763
900	0,7279146	1,479837	105,4403	0,41847	243,2151
1200	0,7293483	1,429333	135,7891	0,419943	242,3622
1600	0,7289498	1,332093	168,7349	0,421623	241,3966
2000	0,7278292	1,194047	189,061	0,423792	240,1611

Анализ результатов расчета эффективных показателей рабочего цикла (таблица 15) показал, некоторое повышение мощности при снижении температуры с 0 до минус 40 ° С, но в расчете не оценивалось влияние понижения температуры на повышение мощности механических потерь вследствие большей вязкости моторного масла, так что вполне возможно, что увеличение мощности из-за лучшего наполнения цилиндра будет компенсировано увеличением механических потерь, в том числе и на покачивание и сжатие топлива.

Таблица 15 – Результаты расчета эффективных показателей рабочего цикла

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$V_{п.ср}$ , м/с	$p_m$ , Мпа	$p_e$ , Мпа	$\eta_m$	$\eta_e$	$g_e$ , г/(кВт.ч)	$N_e$ , кВт	$M_e$ , Н.м	$G_t$ , кг/ч
Дизельное топливо									
600	2,8	0,12204	1,539346	0,927979	0,433534	193,563	74,69339	1188,782	14,45788
900	4,2	0,13856	1,501227	0,915501	0,422335	198,6955	106,9644	1134,927	21,25334
1200	5,6	0,15508	1,442499	0,902928	0,41907	200,2436	137,0399	1090,529	27,44136
1600	7,467	0,1771	1,326939	0,882246	0,410275	204,536	168,082	1003,166	34,37883
2000	9,333	0,19913	1,152572	0,85268	0,392107	214,0131	182,4939	871,3443	39,05609
Арктического дизельного топлива А44									
600	2,8	0,12204	1,591458	0,928777	0,377703	221,5035	75,59568	1203,143	16,74471
900	4,2	0,13856	1,564656	0,918648	0,380457	219,9004	111,4838	1182,88	24,51534

Продолжение таблицы 15

1200	5,6	0,15508	1,497874	0,90618	0,378414	221,0873	142,3006	1132,393	31,46086
1600	7,467	0,1771	1,385566	0,886664	0,377096	221,8602	175,5083	1047,488	38,93829
2000	9,333	0,19913	1,193999	0,857061	0,364393	229,5943	189,0533	902,6629	43,40555
70% зимнего дизельного топлива З38 и 30% биодизеля									
600	2,8	0,12204	1,33677	0,916343	0,368958	275,8534	63,49777	1010,598	17,51608
900	4,2	0,13856	1,341277	0,906368	0,379288	268,3403	95,56773	1014,005	25,64468
1200	5,6	0,15508	1,274253	0,891502	0,37438	271,8583	121,0563	963,3351	32,91015
1600	7,467	0,1771	1,154986	0,867046	0,365566	278,4126	146,301	873,1698	40,73204
2000	9,333	0,19913	0,994914	0,833228	0,353115	288,2296	157,531	752,155	45,40509

Анализ результатов расчета теплового баланса (таблица 16) показал, значительное увеличение доли потерь на теплоотдачу в окружающую среду при снижении температуры с 0 до минус 40 ° С. При этом увеличение тепловых потерь при работе на альтернативном арктическом топливе связано с меньшей энергией, подводимой с топливом, а тепловые потери при этом примерно соответствуют потерям при работе на арктическом дизельном топливе, что соответственно увеличивает долю потерь на охлаждение.

Таблица 16 – Результаты расчета теплового баланса

$n, \text{мин}^{-1}$	$Q_0, \text{Дж/с}$	$Q_e, \text{Дж/с}$	$q_e, \%$	$Q_B, \text{Дж/с}$	$q_B, \%$	$Q_r, \text{Дж/с}$	$q_r, \%$	$Q_{\text{ост}}, \text{Дж/с}$	$q_{\text{ост}}, \%$
Дизельное топливо									
600	172289,7	73120,29	42,4403	42496,59	24,66577	48029,32	27,87706	7070,443	4,10381
900	253269	106964,4	42,23351	57600	22,74262	73199,1	28,90173	15505,48	6,122139
1200	327009,6	137039,9	41,907	71470,45	21,85577	99568,3	30,44813	18930,92	5,789101
1600	409681	168082	41,02754	88681	21,64635	139702,4	34,10029	13215,56	3,225817
2000	465418,4	182493,9	39,21073	96209,1	20,67153	180983,6	38,88622	5731,73	1,231522
Арктического дизельного топлива А44									
600	200145,8	75595,68	37,77031	68619,8	34,28491	43488,75	21,72854	12441,53	6,216234
900	293026,4	111483,8	38,04565	94145,73	32,12875	67334,8	22,97909	20062,07	6,846507
1200	376044,7	142300,6	37,84142	117829,2	31,33383	93997,51	24,99637	21917,33	5,828384
1600	465420,7	175508,3	37,70959	147470,5	31,68541	130597,8	28,06016	11844,22	2,544841
2000	518816,9	189053,3	36,43931	158321	30,51578	169866	32,74104	1576,569	0,303878
70% зимнего дизельного топлива З38 и 30% биодизеля									
600	172100,3	63497,77	36,89579	68619,8	39,87198	37126,88	21,57282	2855,87	1,659422
900	251966,1	95567,73	37,92881	94145,73	37,36445	59418,07	23,58178	2834,537	1,124968
1200	323351,4	121056,3	37,43799	113966,6	35,24545	84689,59	26,19119	3638,88	1,125364
1600	400203,6	146301	36,55664	135485,4	33,85413	116561,2	29,12548	1855,967	0,463756
2000	446117,6	157531	35,31153	140385,7	31,46831	147196,5	32,99501	1004,437	0,225151

## **Выводы по 2-му разделу бакалаврской работы**

Тепловой расчет показал значительное влияние вида топлива и условий работы двигателя на мощностные и экономические характеристики работы. Получено, что при снижении температуры окружающего воздуха с 0 до минус 40 ° С произойдет некоторое повышение мощностных показателей работы двигателя, для арктического дизеля и снижение всех показателей при использовании альтернативного топлива.

За счет снижения температуры окружающего воздуха повысится его плотность, что сказывается на наполнении цилиндра, так увеличение заряда при впуске для арктического дизельного топлива составило от 11 до 16 %, а для смесового биодизельного топлива от 16 до 21 %, где большие значения соответствуют меньшим оборотам двигателя.

### 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 70 мм, а длина шатуна 250 мм) проводился по известным методикам приведенным в [1,2], при частоте вращения коленчатого вала  $2000 \text{ мин}^{-1}$ .

Результаты расчета перемещения, скорости и ускорения поршня приведены на рисунках 3, 4 и 5.

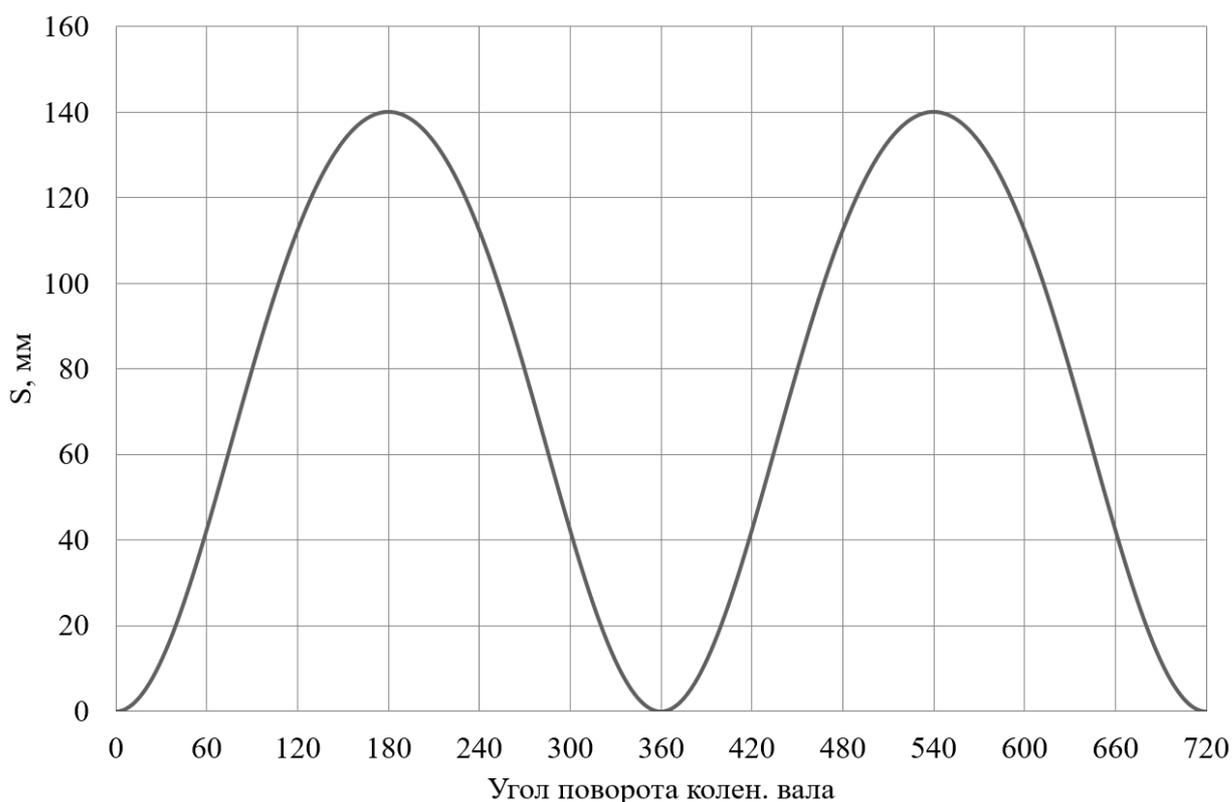


Рисунок 3 – Диаграмма изменения хода поршня

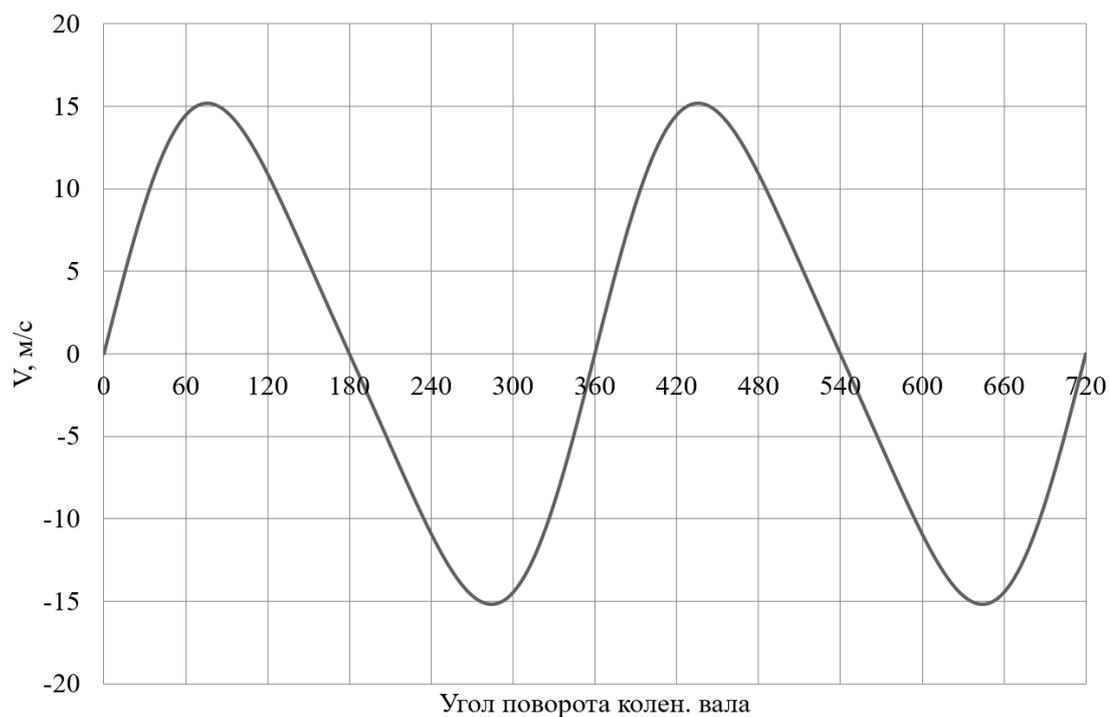


Рисунок 4 – Диаграмма изменения скорости поршня

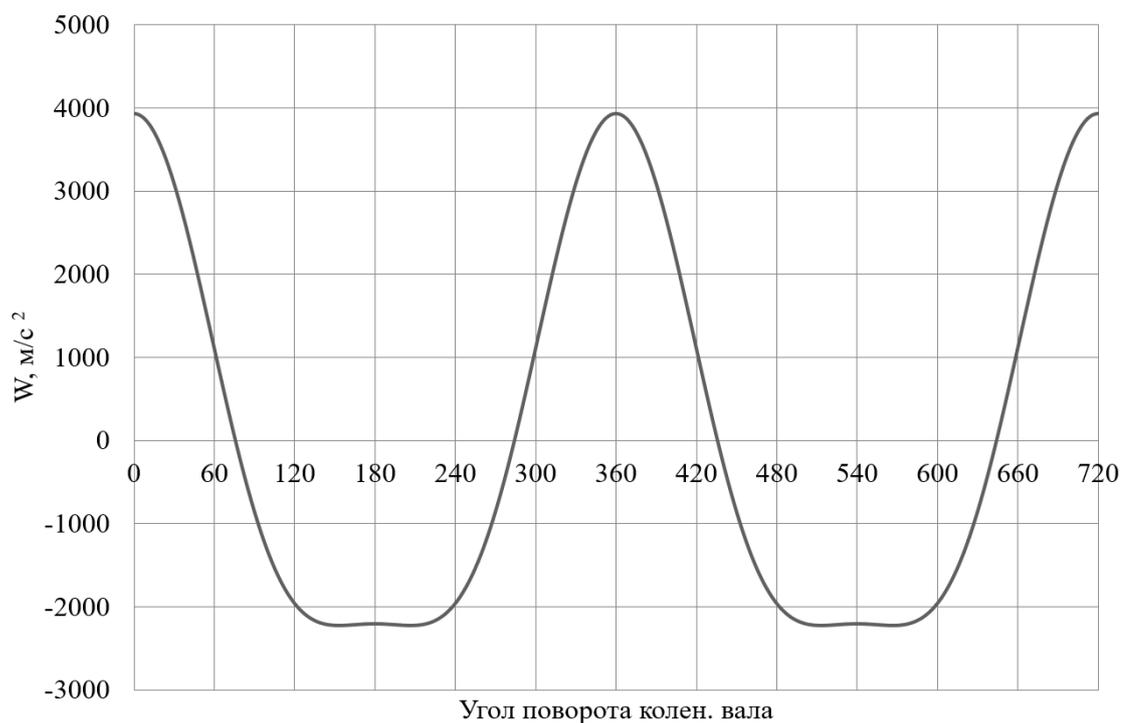


Рисунок 5 – Диаграмма изменения ускорения поршня

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  $2000 \text{ мин}^{-1}$ , для условий работы на летнем дизельном топливе и арктическом дизельном топливе.

Результаты приведение масс кривошипно-шатунного механизма по двух массовой схеме показаны в таблице 17.

Таблица 17 – Приведение масс кривошипно-шатунного механизма

Параметр	Величина
Площадь поршня, $\text{м}^2$	0,01131
Удельная масса поршня, $\text{кг}/\text{м}^2$	250
Масса поршневой группы, кг	2,827
Удельная масса шатуна, $\text{кг}/\text{м}^2$	350
Масса шатуна, кг	3,958
Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца, кг	1,089
Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа, кг	2,870
Удельная масса одного колена вала, $\text{кг}/\text{м}^2$	300
Масса неуравновешенных частей одного колена вала, кг	3,393
Массы, совершающие возвратно-поступательное движение	3,916
Массы, совершающие вращательное движение	6,263
Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна, Н	-69085,95
Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа, Н	-81677,97
Центробежная сила инерции вращающихся масс, Н	-150763,9

Результаты расчета приведены в виде графиков. На рисунке 6 приведены силы инерции возвратно-поступательного движения.

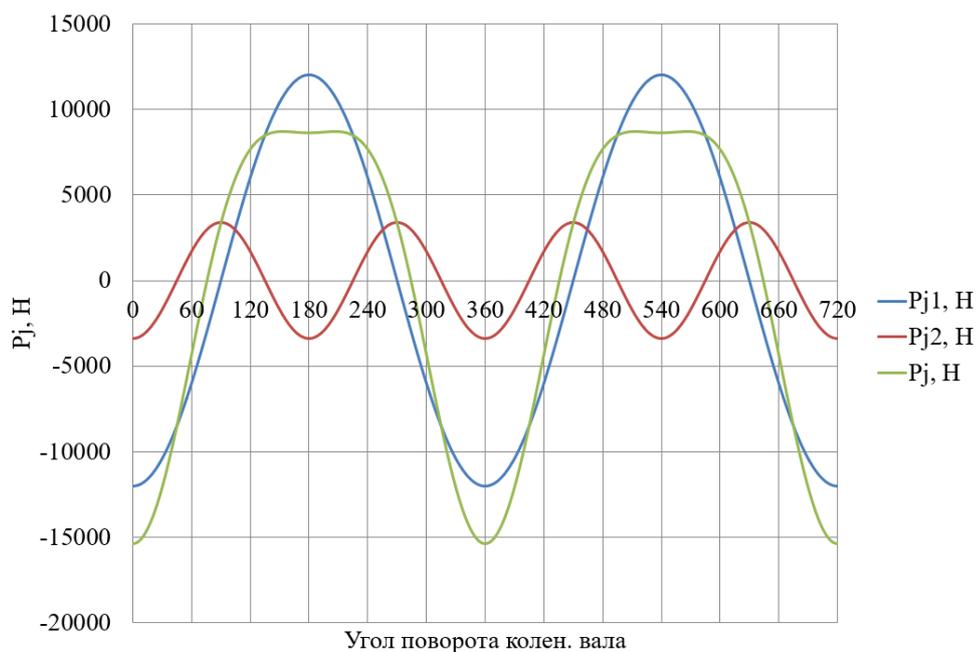


Рисунок 6 – Силы инерции возвратно-поступательного движения поршня и шатуна

На рисунке 7 и 8 приведено сравнение суммарных сил, действующих на поршневой палец двигателя при работе на летнем дизельном топливе (рисунок 7) и арктическом топливе (рисунок 8).

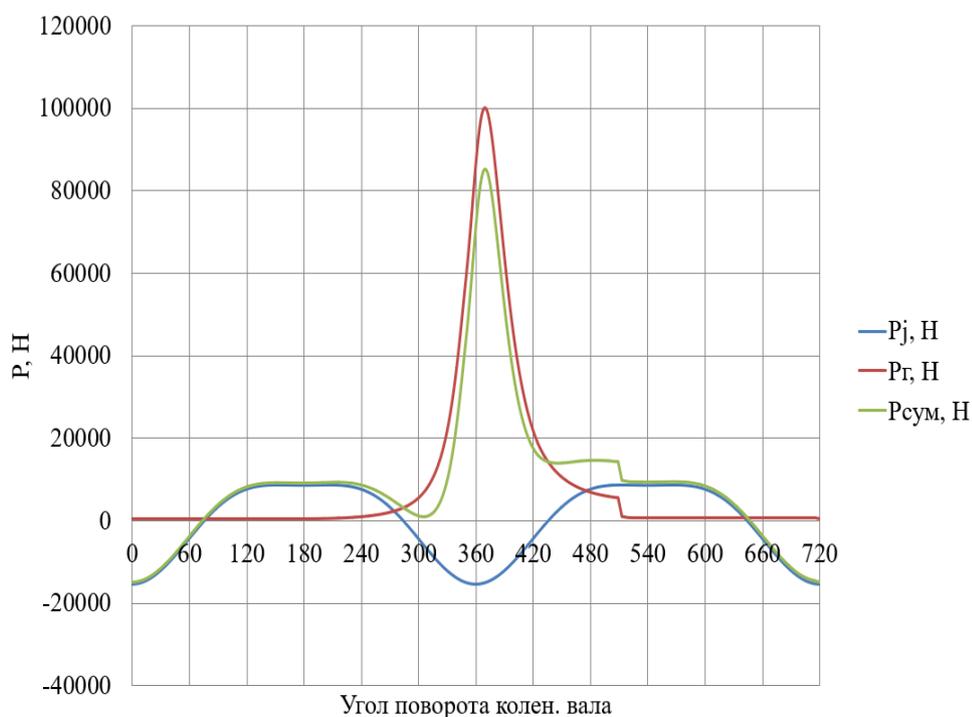


Рисунок 7 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец двигателя при работе на летнем топливе

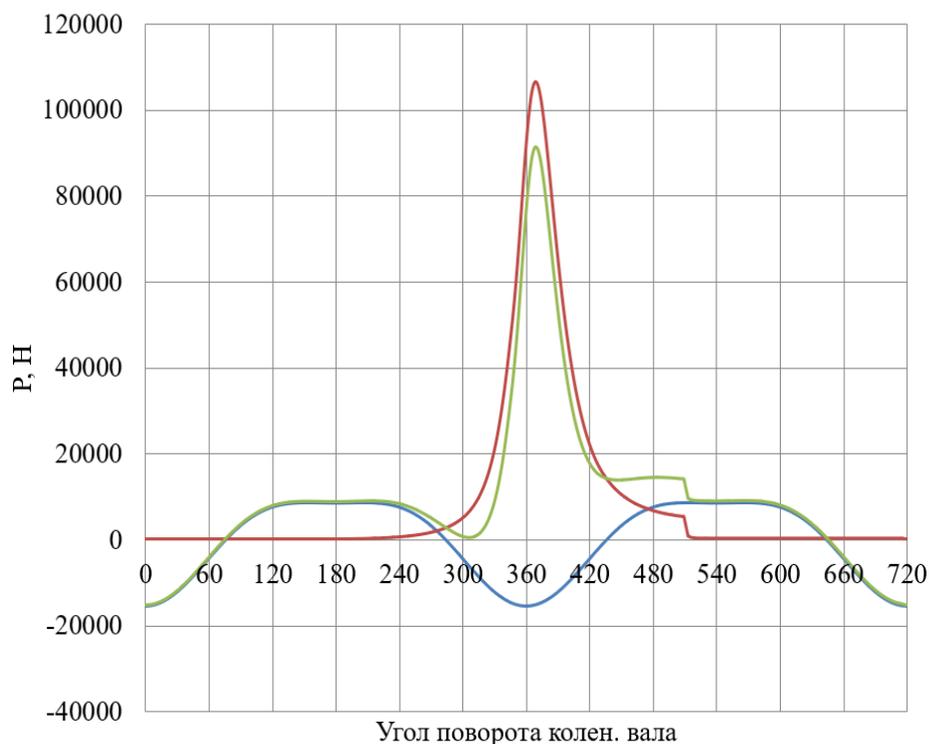


Рисунок 8 – Суммарные силы, действующие на поршневой палец двигателя при работе на арктическом дизельном топливе

На рисунке 9 приведено сравнение сил, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки при работе на летнем дизельном топливе (рисунок 9а) и арктическом дизельном топливе (рисунок 9б).

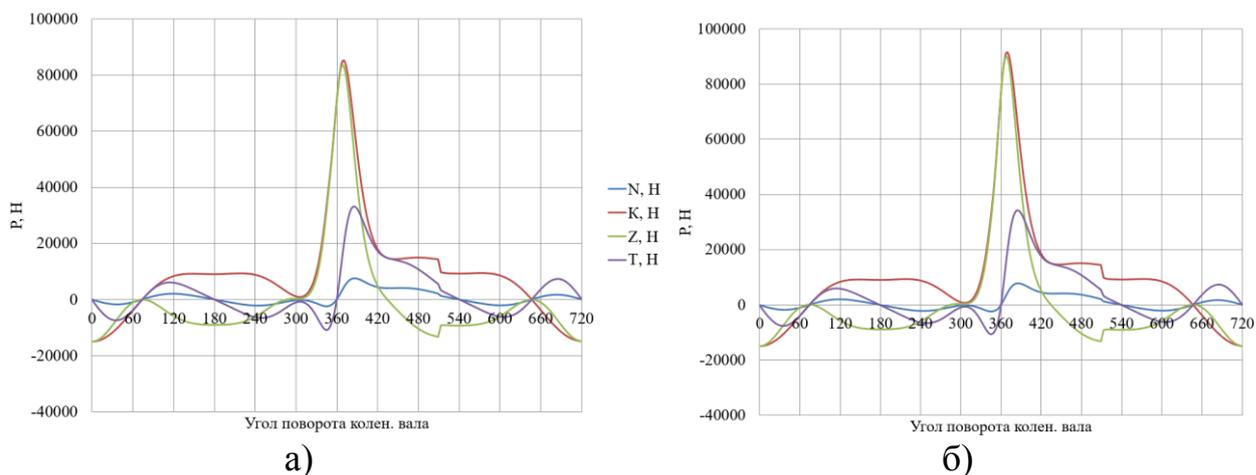


Рисунок 9 – Силы, сосредоточенные на оси поршневого пальца и шатунной шейки двигателя при работе на (а) летнем топливе и (б) арктическом топливе

На рисунке 10 приведено сравнение крутящего момента двигателя при работе на летнем дизельном топливе (рисунок 10а) и арктическом топливе (рисунок 10б).

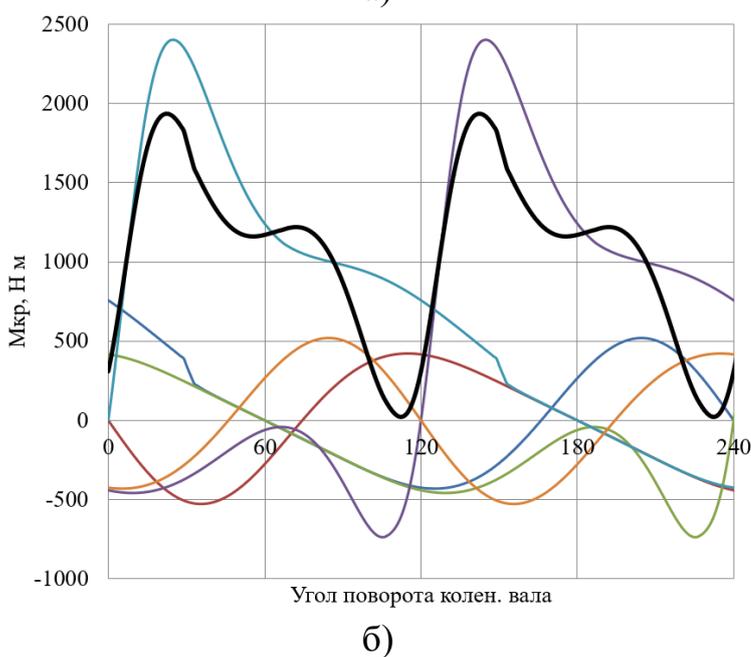
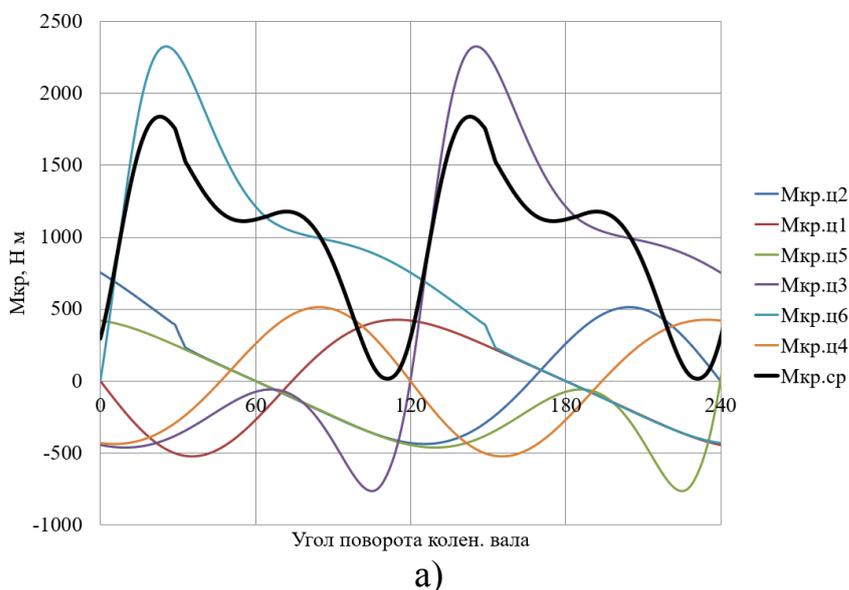
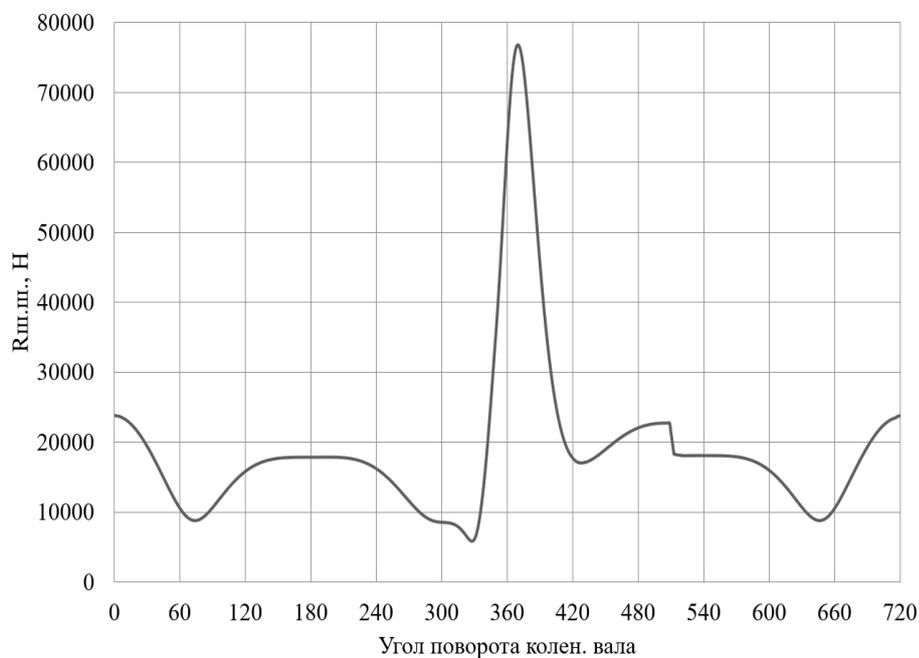


Рисунок 10 – График крутящего момента при работе на (а) летнем и (б) арктическом дизельном топливе

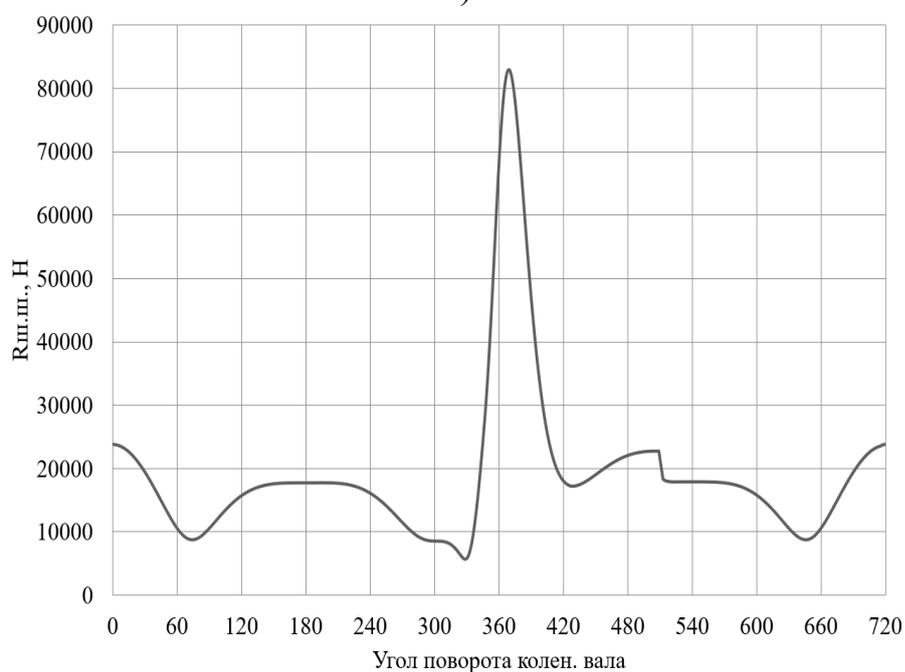
Расчет основных сил и моментов действующих в КШМ показал, что наибольшие силы возникают при работе на арктическом дизельном топливе, а при работе на летнем дизельном топливе их максимальные величины снижаются 5 – 8 %.

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

На рисунке 11 приведено сравнение суммарной силы, действующую на шатунную шейку в прямоугольных координатах.



а)



б)

Рисунок 11 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку при работе на (а) летнем и (б) арктическом топливе

На рисунке 12 приведено сравнение суммарной силы, действующую на шатунную шейку в полярных координатах. Видно, что нагрузки возросли примерно на 15 – 20 % при работе на арктическом топливе, что говорит о повышенном износе подшипников коленчатого вала.

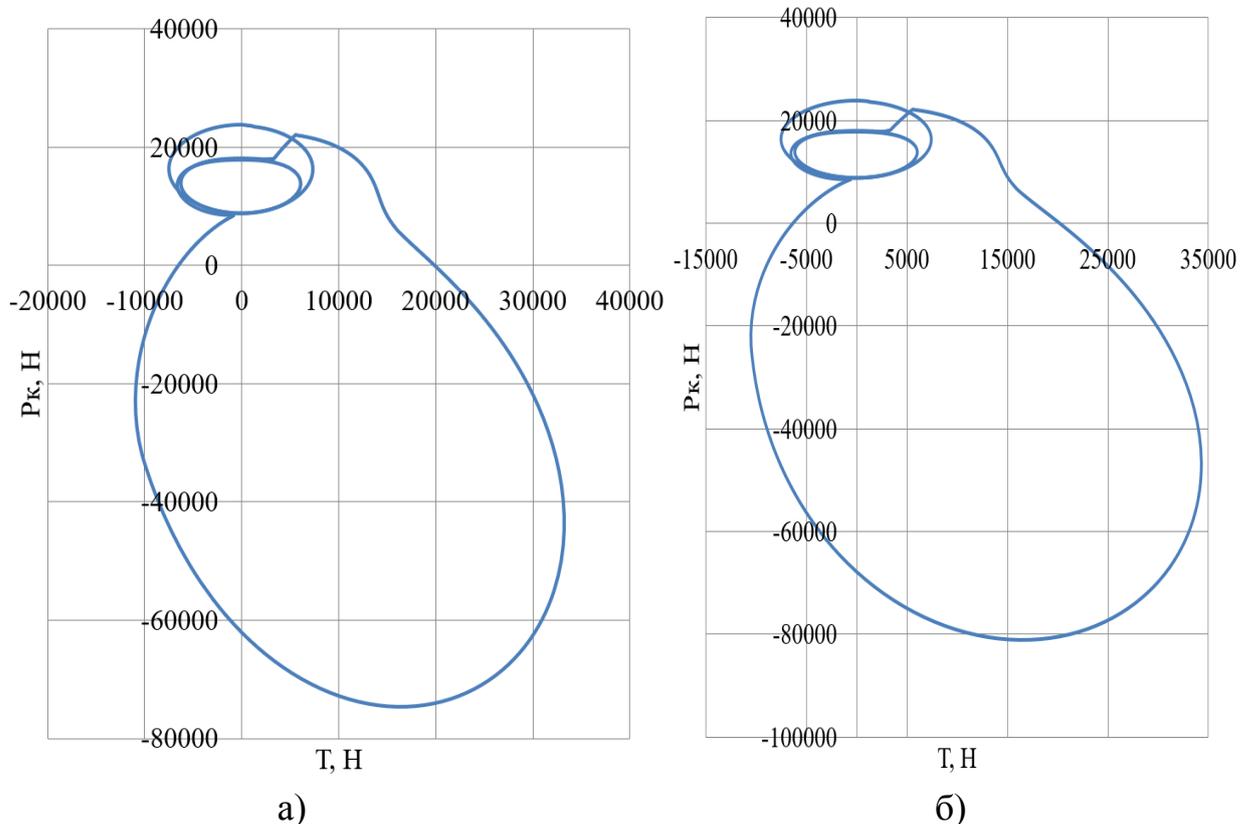
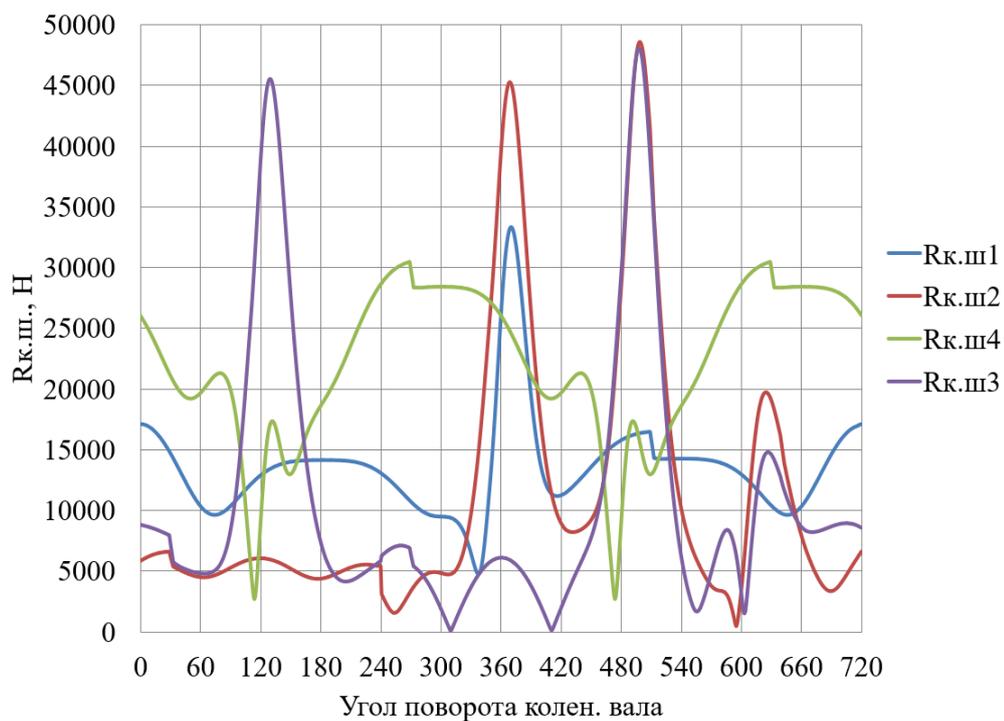
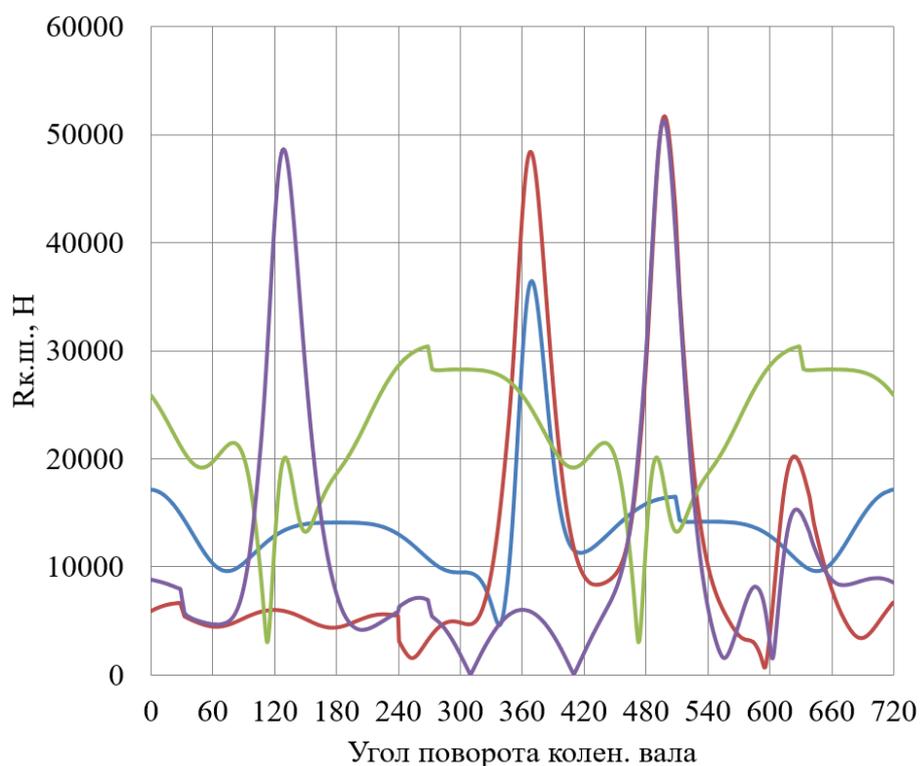


Рисунок 12 – Суммарная сила, действующая на шатунную шейку в полярных координатах при работе на (а) летнем и (б) арктическом топливе

На рисунке 13 приведено сравнение суммарных сил, действующих на коренные шейки в прямоугольных координатах. На рисунке 13а показаны суммарные сила при работе на летнем дизельном топливе, а на рисунке 13б при работе на арктическом дизельном топливе.



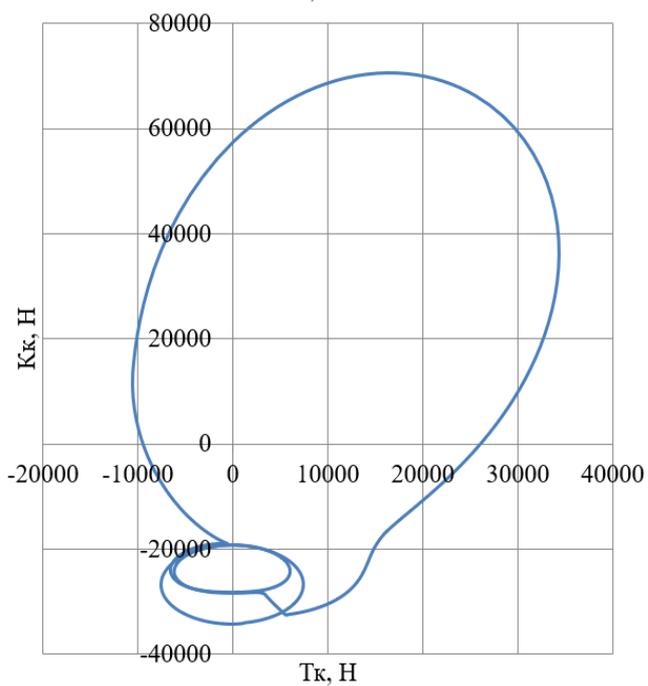
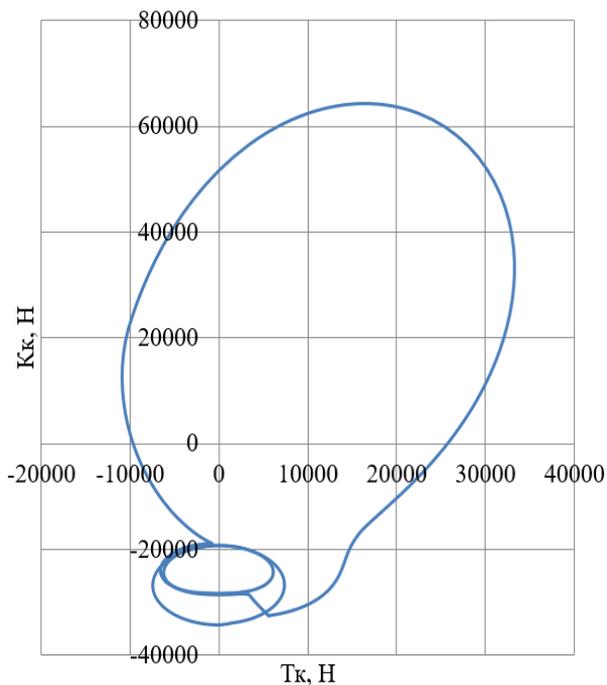
а)



б)

Рисунок 13 – Суммарные силы, действующие на коренные шейки в прямоугольных координатах при работе на (а) летнем и (б) арктическом топливе

На рисунке 14 приведено сравнение суммарных сил, действующих на 1-ю коренную шейку в полярных координатах.



а)

б)

Рисунок 14 – Суммарные силы, действующие на 1-ю коренную шейку в полярных координатах при работе на (а) летнем и (б) арктическом топливе

### Выводы по 3-му разделу

Как мы видим переход двигателя на арктическое топливо привел к росту нагрузок в среднем на 3 – 5 %, но нужно провести анализ изменения прочности деталей при низких температурах характерных для Арктики (рисунок 15) [29]. Из рисунка 15 видно, что то при переходе на более низкие температуры происходит увеличение прочности и снижение пластичности, следовательно принципиального снижения запаса прочности деталей двигателя не произойдет, и изменение размеров деталей для увеличения их прочности дополнительно не требуется, только из-за снижения пластичности следует рекомендовать выходить на мощностные режимы работы при погретом двигателе.

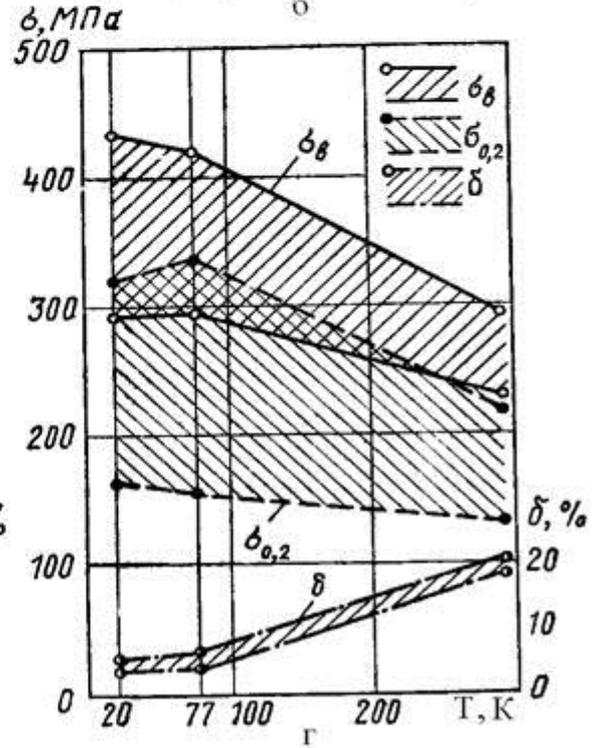
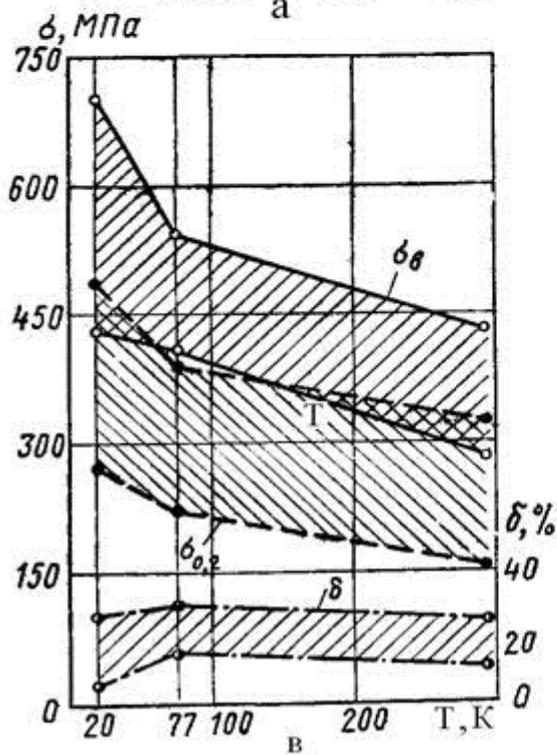
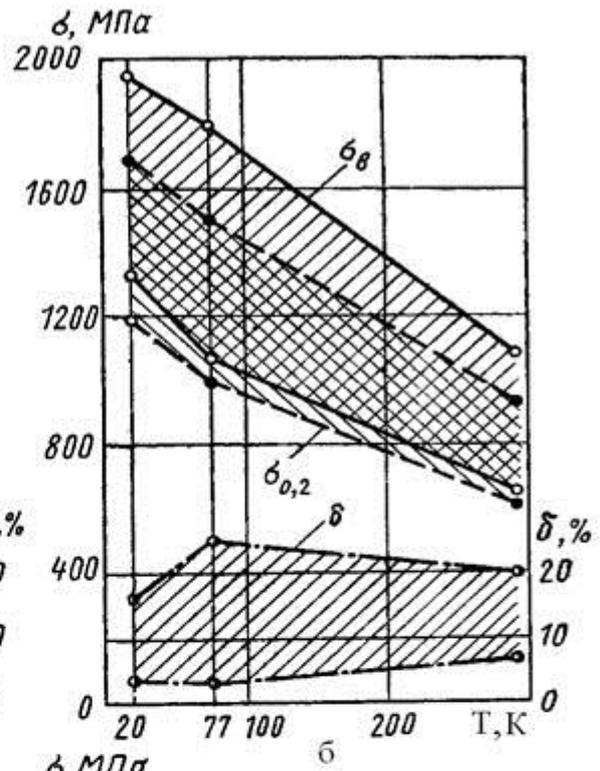
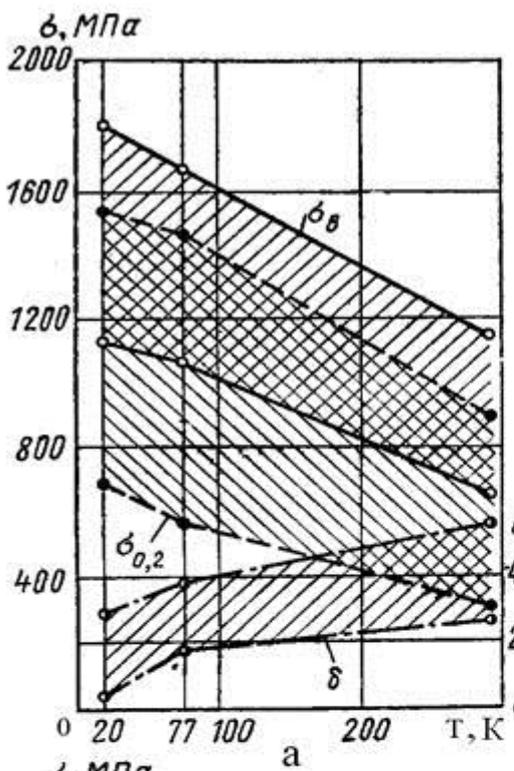


Рисунок 15 – Прочность и пластичность при низких температурах коррозионностойких сталей (а); титановых (б); алюминиевых (в) и магниевых (г) сплавов

## 4 Анализ влияния арктического дизельного топлива (минус 40°C) на рабочий процесс ДВС

### 4.1 Влияния арктического дизельного топлива (минус 40°C) на максимальную температуру и давление цикла

Проведем сравнение индикаторных диаграмм в P-V координатах для всех 3-х рассматриваемых топлив (рисунки 16 – 20). Из представленных рисунков видно, что максимальное давление снижается по мере увеличения частоты вращения, это объясняется увеличением продолжительности процесса сгорания по углу поворота коленчатого вала. Также сравнивая исследуемые 3-вида топлива видим, что максимальные давления соответствуют арктическому дизельному топливу, а минимальные альтернативному арктическому топливу.

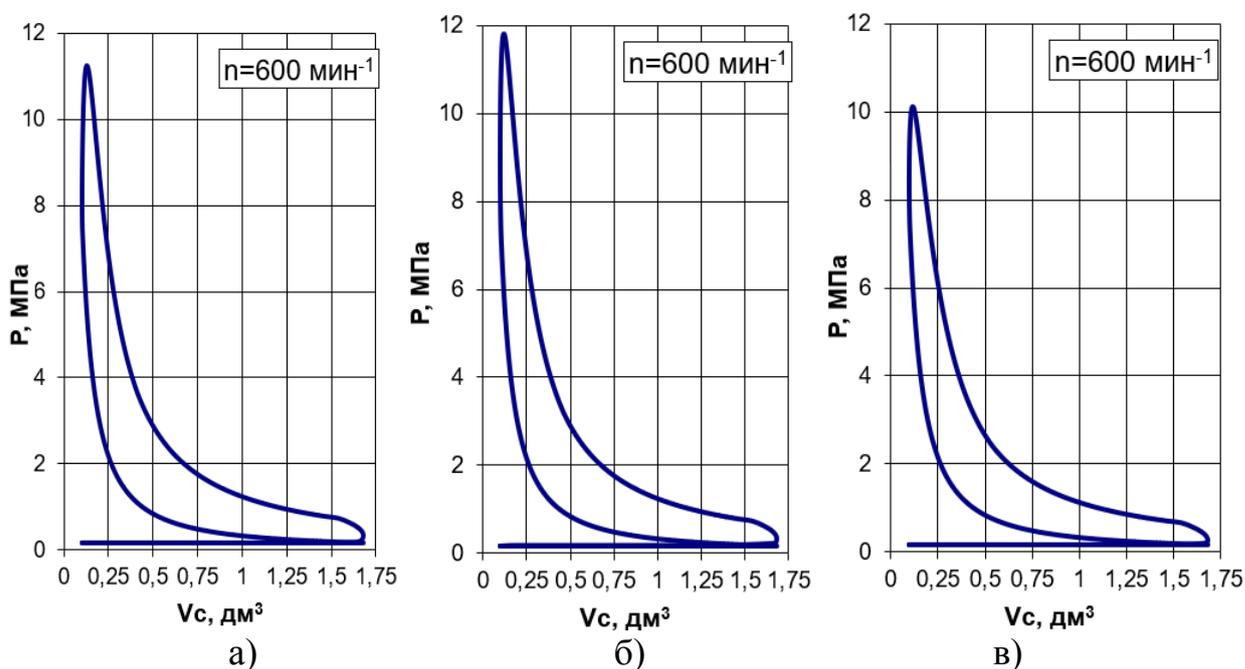


Рисунок 16 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима  $600 \text{ мин}^{-1}$ : (а) летнее дизельное топливо; (б) арктическое дизельное топливо; (в) альтернативное арктическое топливо (70% зимнего дизельного топлива 338 и 30% биодизеля)

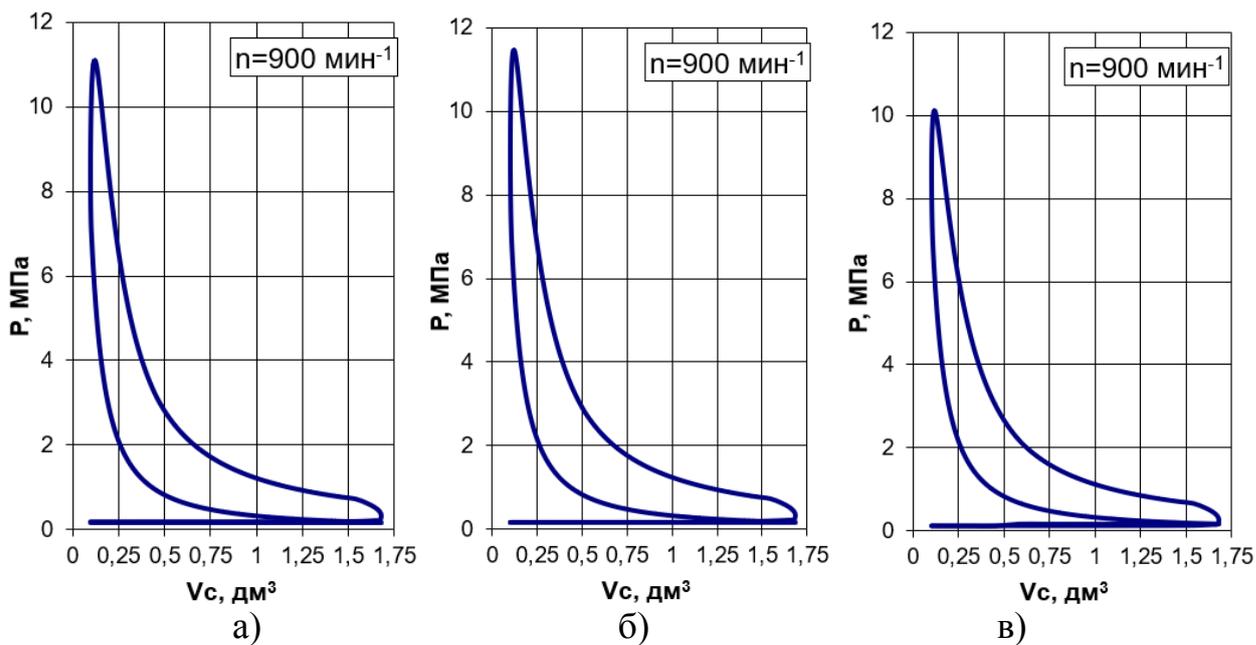


Рисунок 17 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима  $900 \text{ мин}^{-1}$ : (а) летнее дизельное топливо; (б) арктическое дизельное топливо; (в) альтернативное арктическое топливо

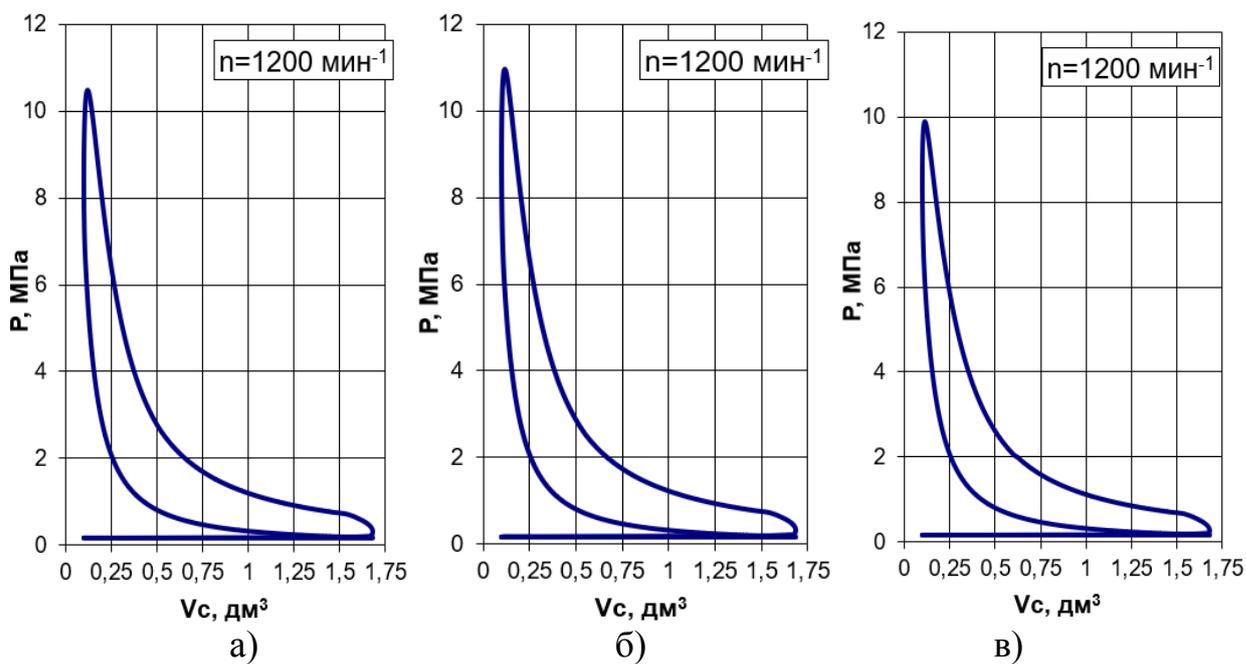


Рисунок 18 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима  $1200 \text{ мин}^{-1}$ : (а) летнее дизельное топливо; (б) арктическое дизельное топливо; (в) альтернативное арктическое топливо

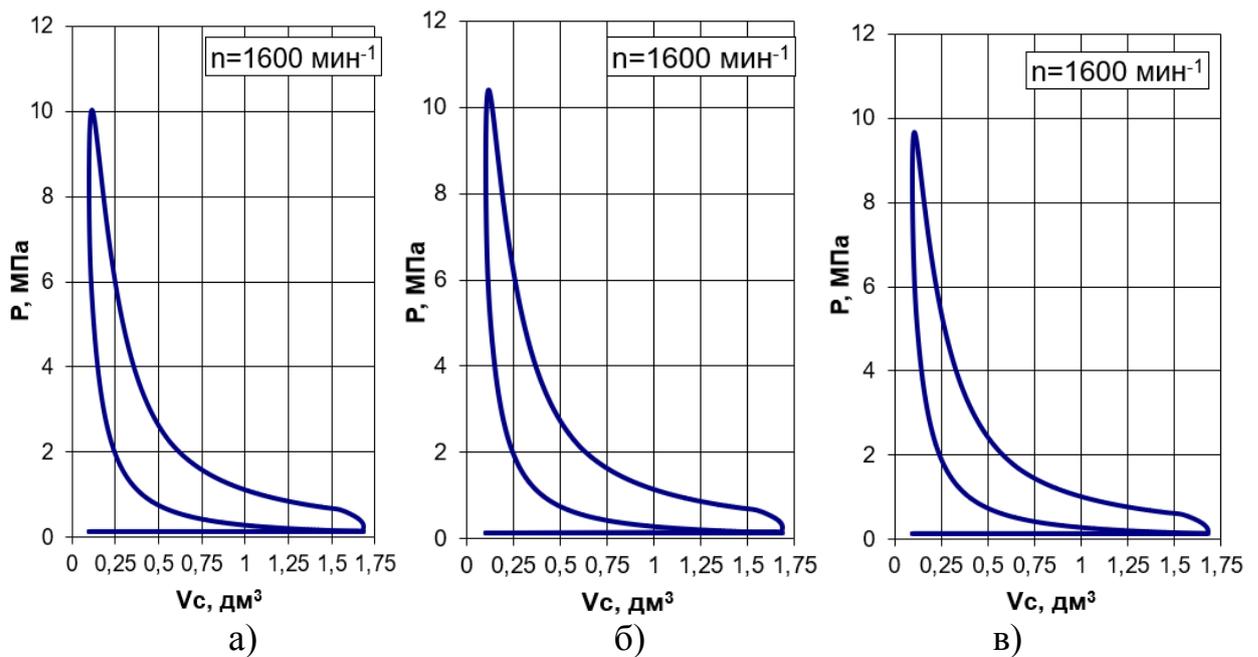


Рисунок 19 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима  $1600 \text{ мин}^{-1}$ : (а) летнее дизельное топливо; (б) арктическое дизельное топливо; (в) альтернативное арктическое топливо

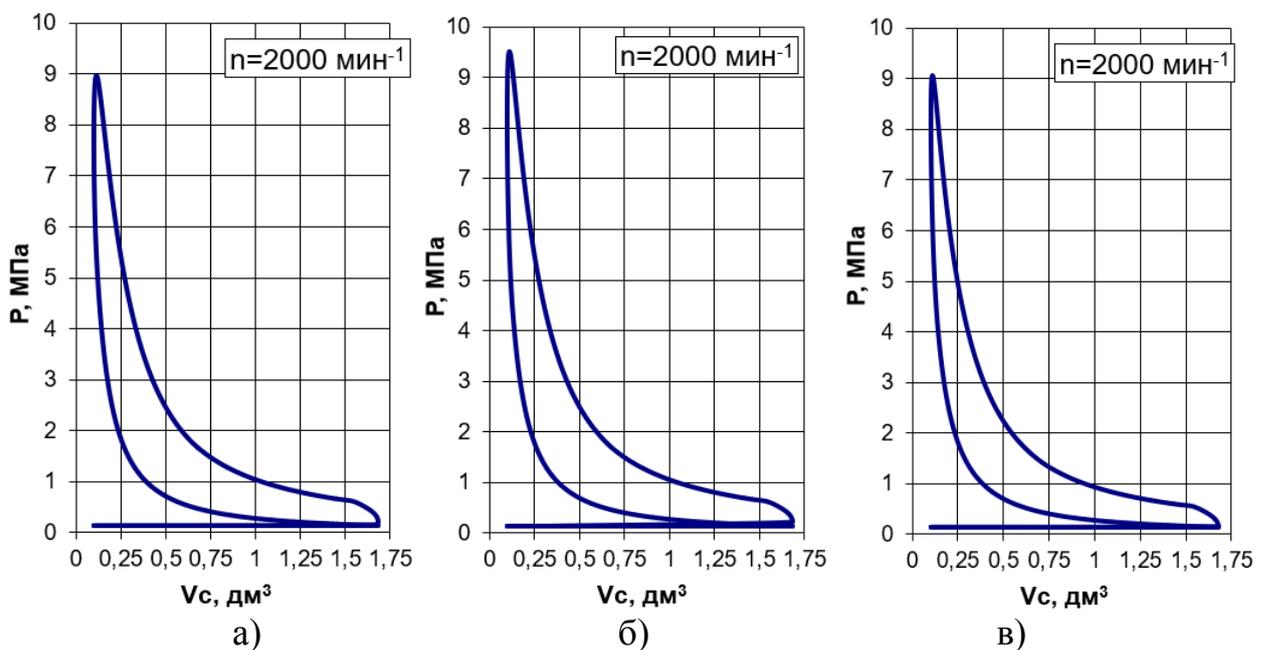


Рисунок 20 – Индикаторные диаграммы в P-V координатах для скоростного режима  $2000 \text{ мин}^{-1}$ : (а) летнее дизельное топливо; (б) арктическое дизельное топливо; (в) альтернативное арктическое топливо

Для оценки токсичности проведем сравнение изменения температуры в процессе сгорания (рисунок 21 – 25).

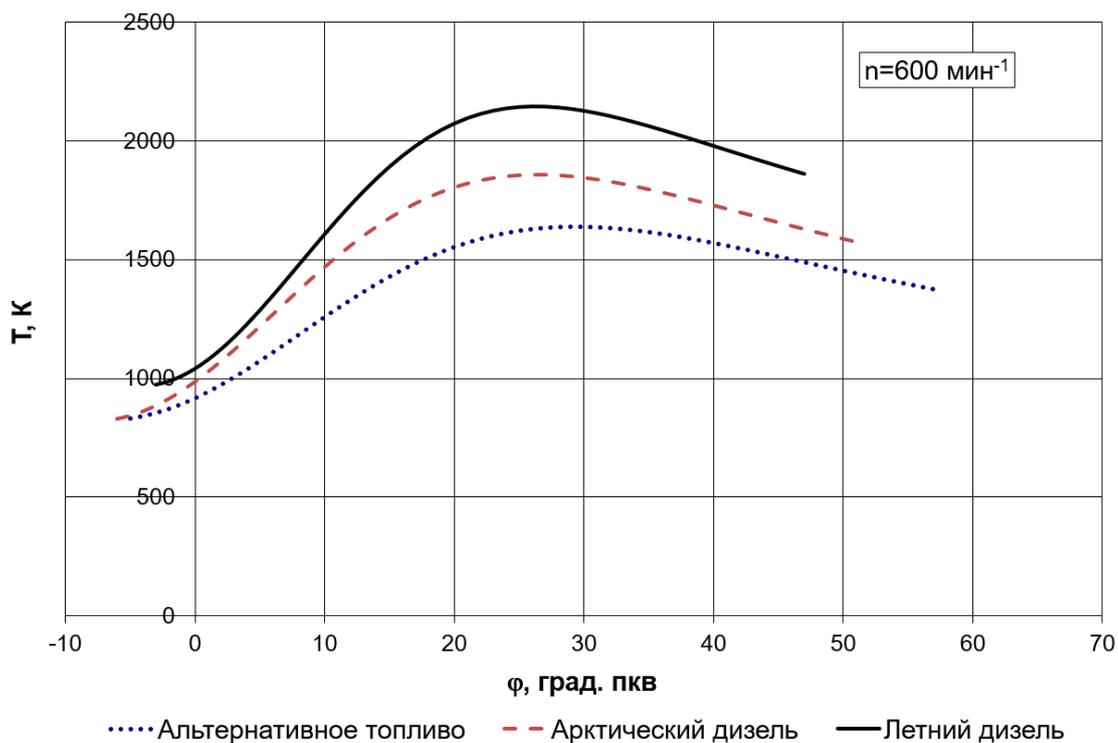


Рисунок 21 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима  $600 \text{ мин}^{-1}$

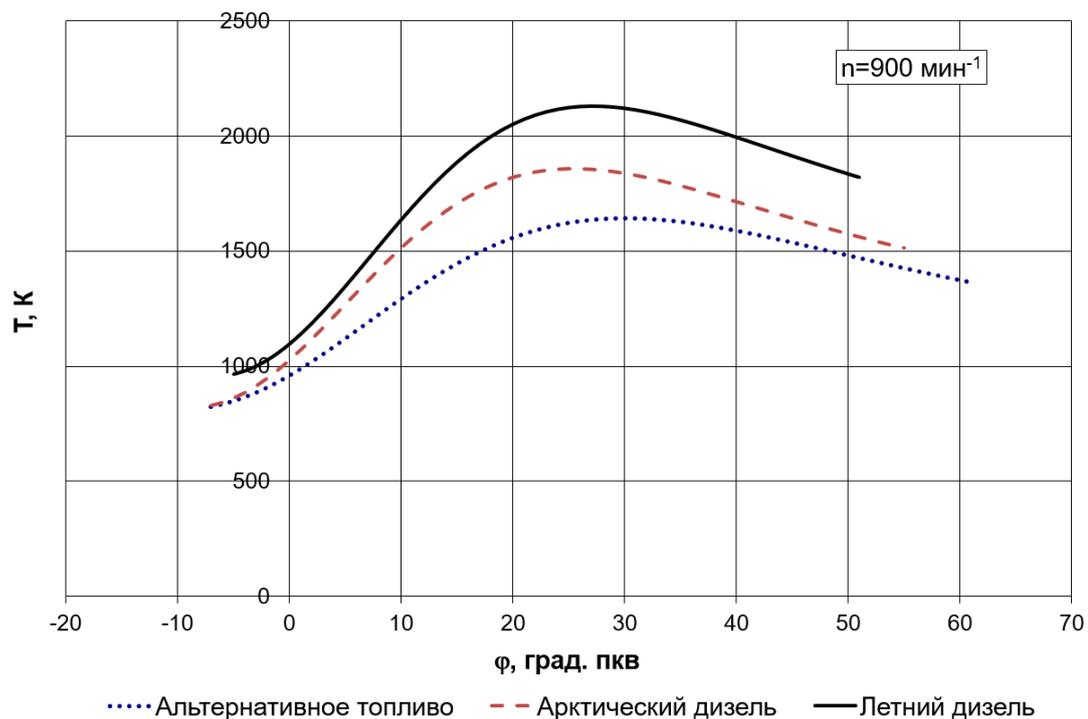


Рисунок 22 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима  $900 \text{ мин}^{-1}$

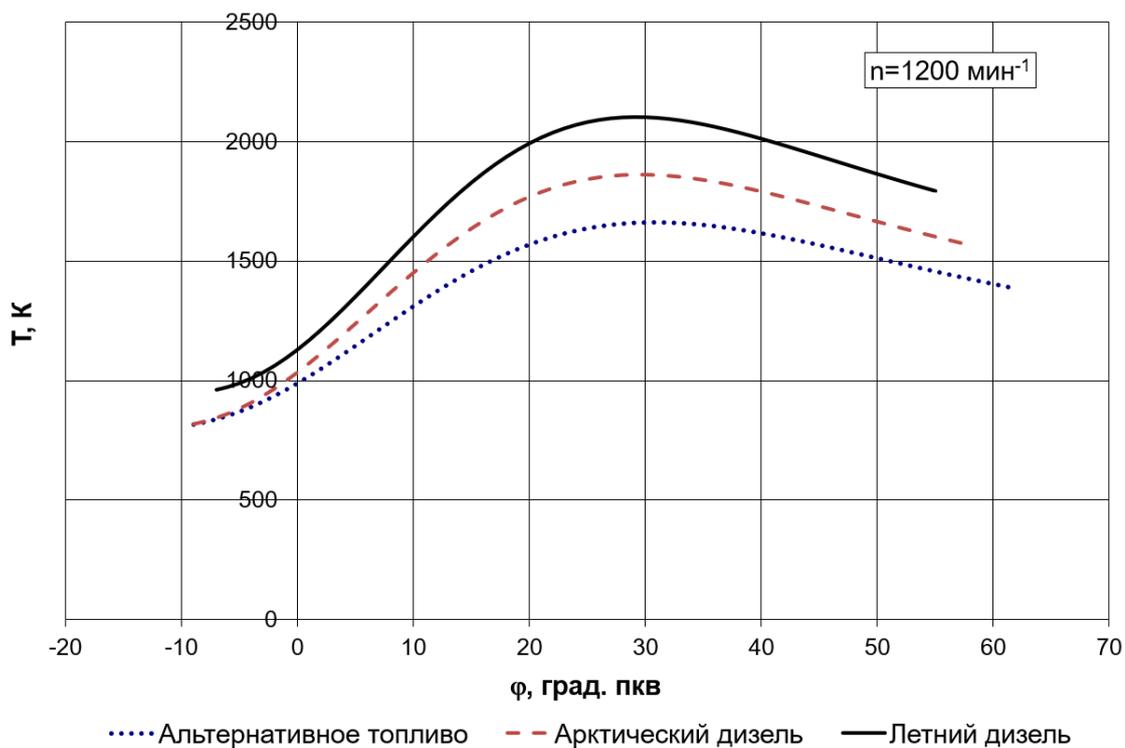


Рисунок 23 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима  $1200 \text{ мин}^{-1}$

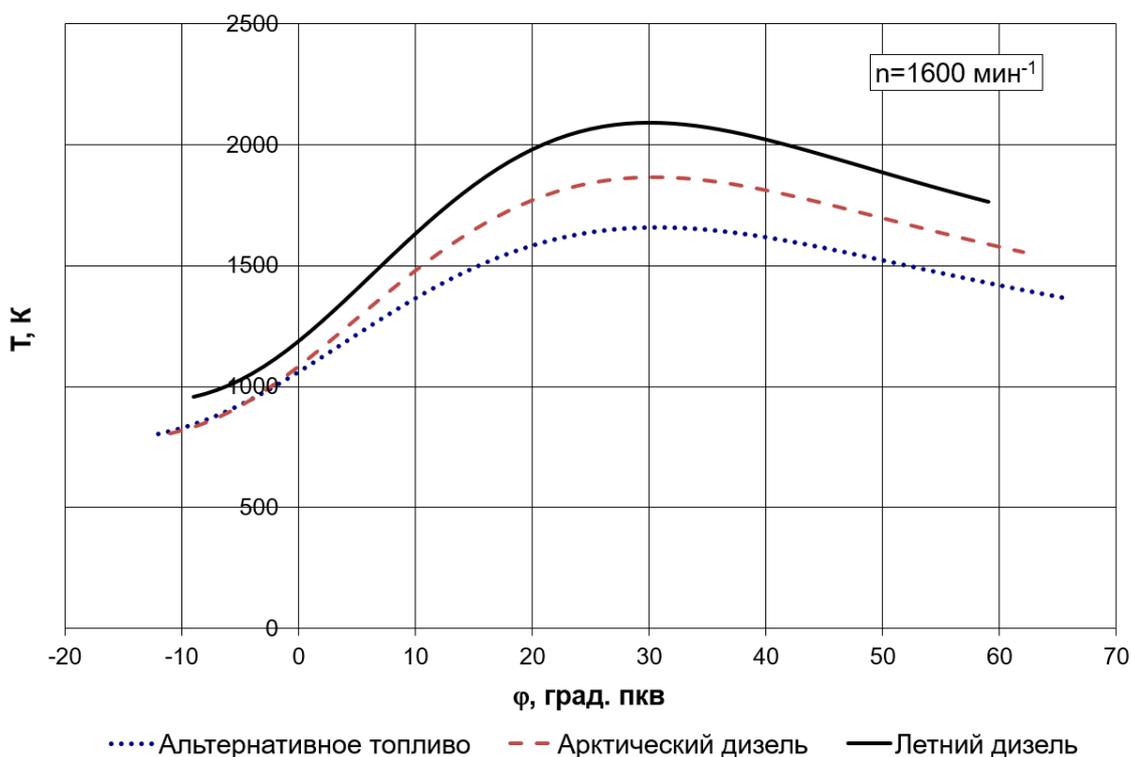


Рисунок 24 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима  $1600 \text{ мин}^{-1}$

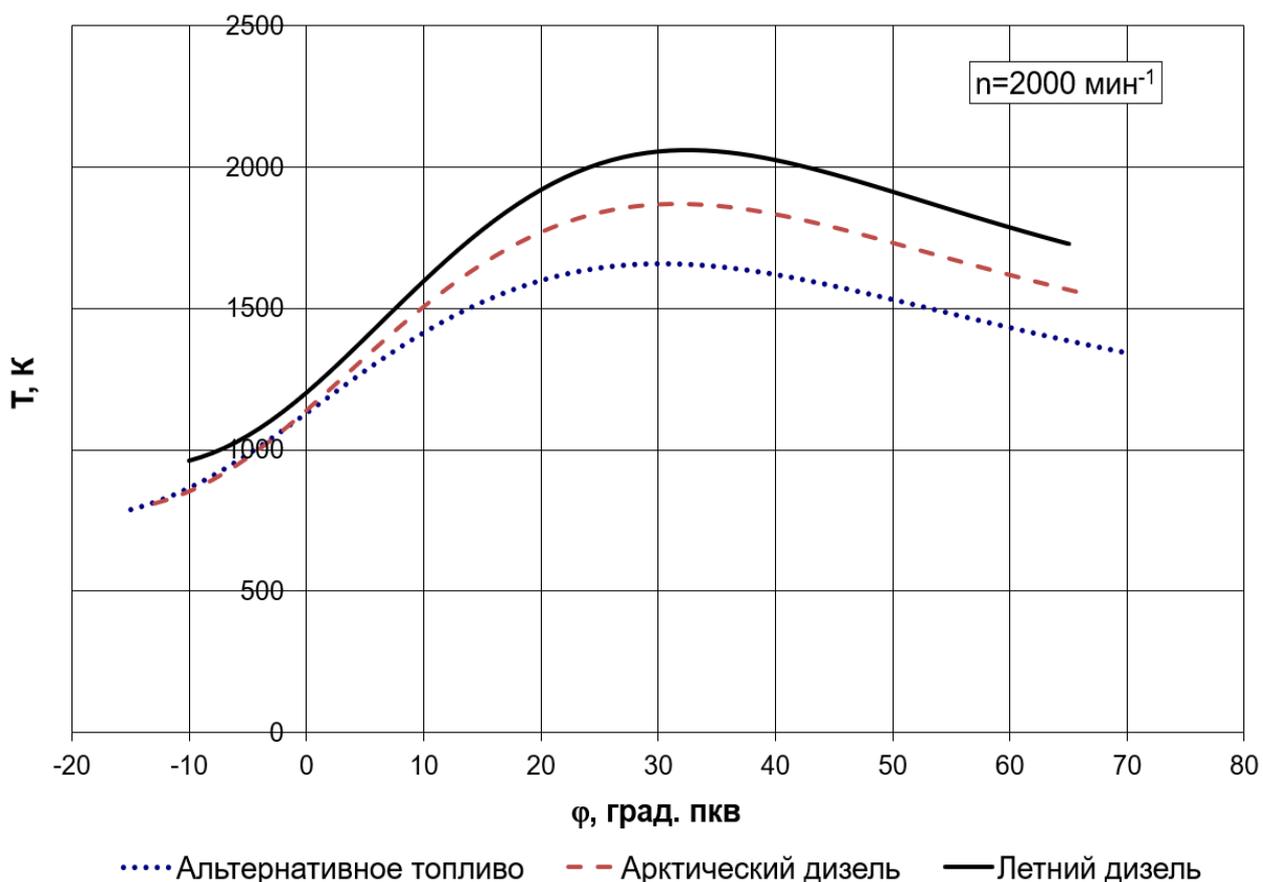


Рисунок 25 – Средняя температура в цилиндре двигателя во время сгорания для скоростного режима  $2000 \text{ мин}^{-1}$

Проводя анализ средней температуры в цилиндре двигателя во время сгорания по рисункам 21 – 25, можно отметить, что максимальная температура соответствует рабочему процессу на летнем дизельном топливе, а минимальная на альтернативном арктическом топливе для дизельных двигателей. Более высокая температура сгорания свидетельствует о лучших условиях дожигания сажи и несгоревших углеводородов, но в тоже время это показатель большего содержания оксидов азота в отработавших газах. Большая работа цикла при работе на арктическом топливе при меньшей температуре цикла объясняется большей плотностью рабочего тела и меньшими давлениями и температурами на сжатии, то есть меньшими насосными потерями.

## 4.2 Влияния арктического дизельного топлива (минус 40°C) на эффективные показатели цикла

Проводить анализ эффективных показателей работы двигателя правильнее всего по графическому изображению внешней скоростной характеристики (рисунки 26 – 28). Для альтернативного арктического топлива наглядно видно (рисунок 26), наличие максимума крутящего момента для частоты вращения  $900 \text{ мин}^{-1}$ . Также для альтернативного арктического топлива

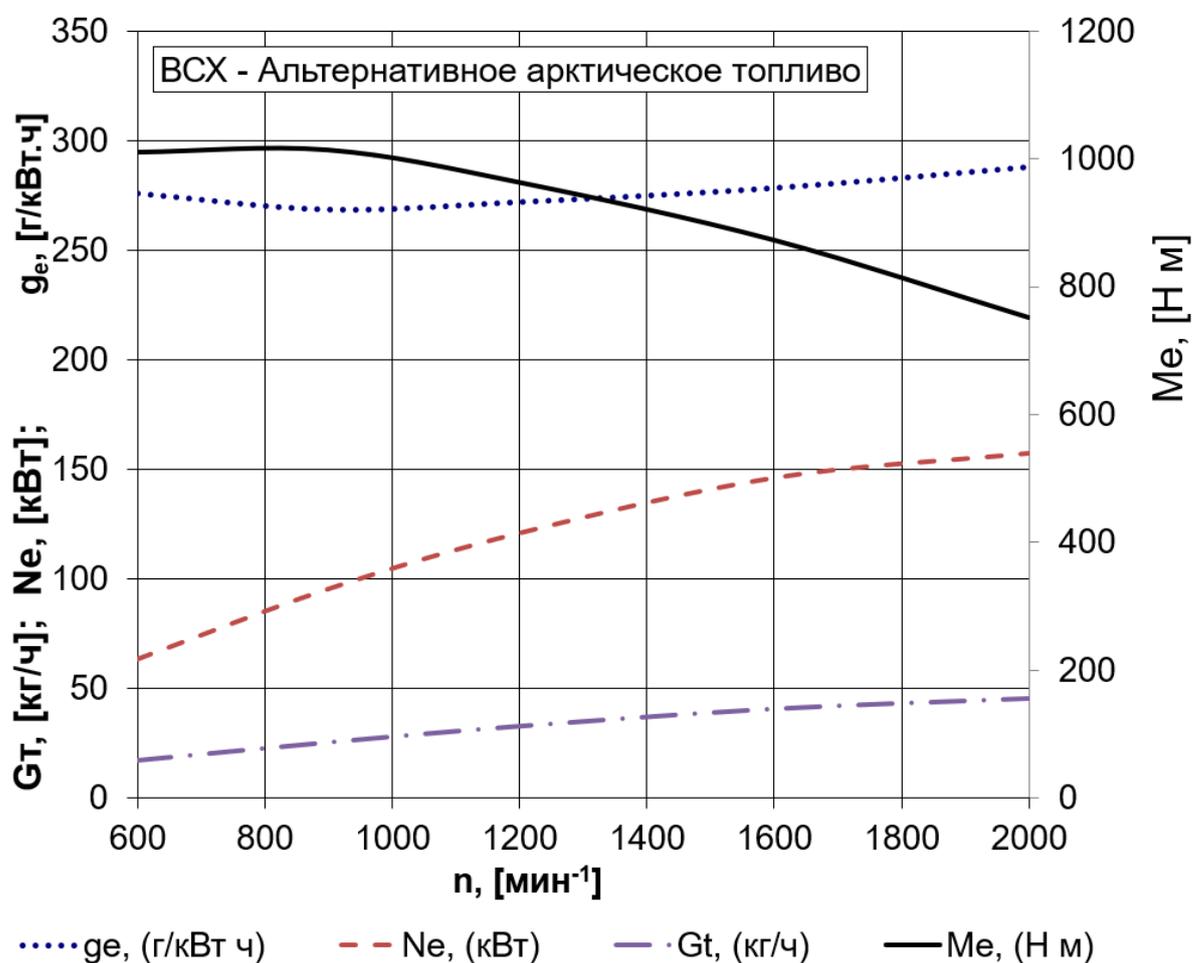


Рисунок 26 – Внешняя скоростная характеристика дизельного двигателя при работе на альтернативном арктическом топливе при  $T_0$  минус 40 °С

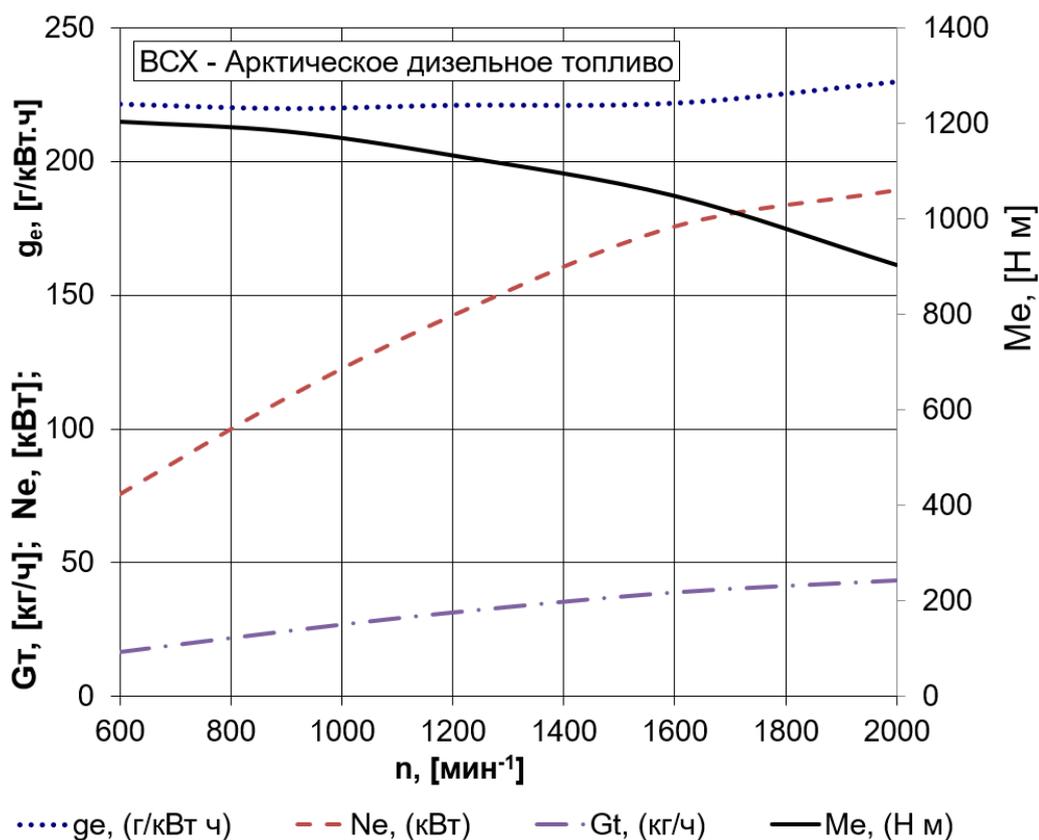


Рисунок 27 – Внешняя скоростная характеристика дизельного двигателя при работе на арктическом дизельном топливе при  $T_0$  минус 40 °С

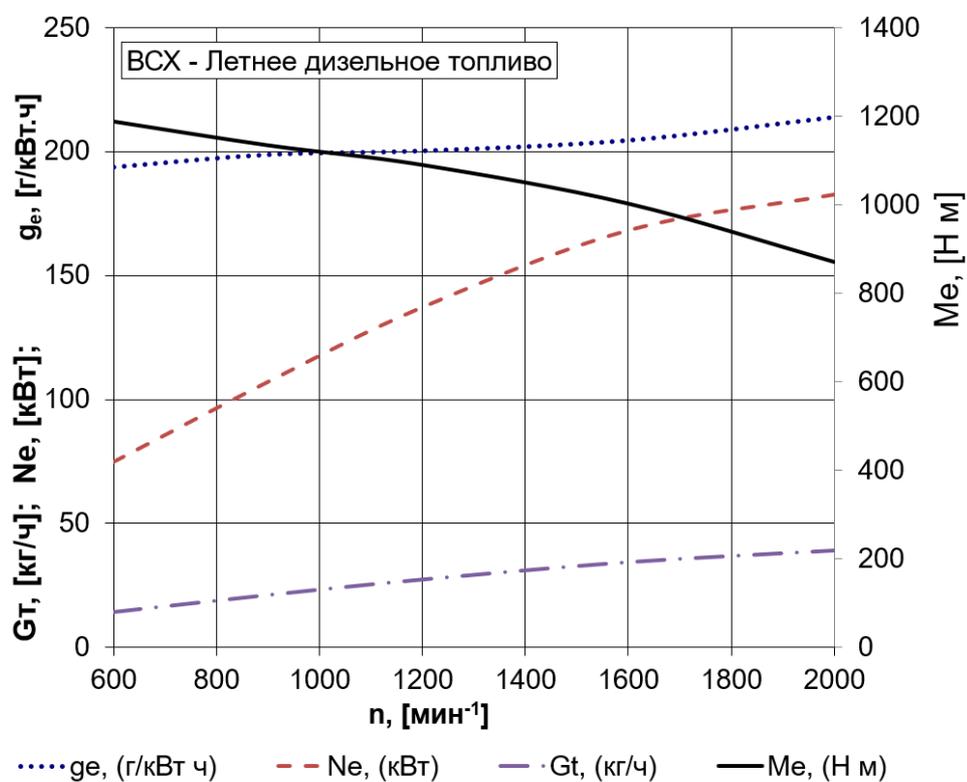


Рисунок 28 – Внешняя скоростная характеристика дизельного двигателя при работе на летнем дизельном топливе при  $T_0$  равной 0 °С

Из графиков внешней скоростной характеристики видно наличие высоких крутящих моментов на низких частотах вращения. Также более высокий расход топлива при работе на низких температурах  $T_0$  минус  $40\text{ }^\circ\text{C}$ .

Наглядно распределение тепловых потерь хорошо иллюстрируют графики внешнего теплового баланса (рисунки 29 и 30). На графиках отчетливо видно увеличении доли тепла отданного в систему охлаждения при работе при низких температурах  $T_0$  минус  $40\text{ }^\circ\text{C}$ . Также при работе на обоих дизельных топливах (летнее и арктическое) наблюдается заметная доля неучтенных потерь теплоты до  $6\%$  на низких частотах вращения. Для альтернативного арктического топлива эти потери не превышают  $2\%$

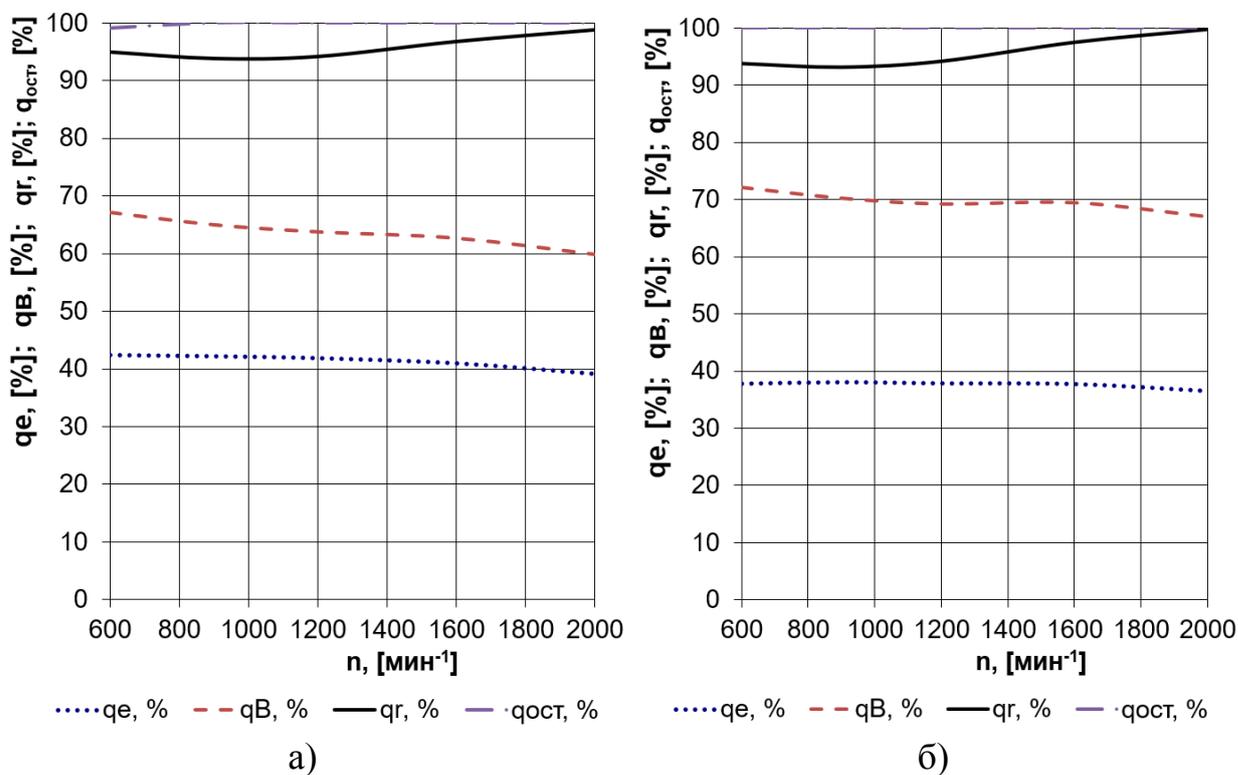


Рисунок 29 – Внешний тепловой баланс: (а) летнее дизельное топливо при  $T_0$  равное  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ; (б) арктическое дизельное топливо при  $T_0$  минус  $40\text{ }^\circ\text{C}$

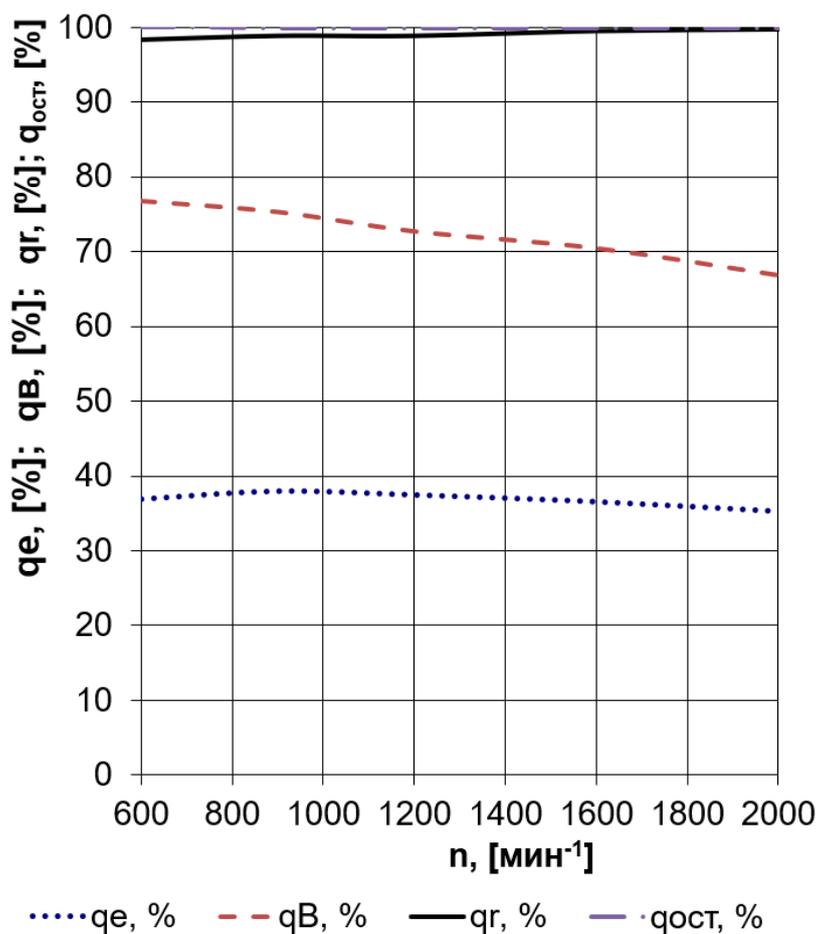


Рисунок 30 – Внешний тепловой баланс дизельного двигателя при работе на альтернативном арктическом топливе при  $T_0$  минус  $40\text{ }^\circ\text{C}$

#### Выводы по 4-му разделу

Проведенный анализ показал, что для эффективной работы в условиях низких температур  $T_0$  минус  $40\text{ }^\circ\text{C}$ , наиболее хорошо соответствует арктическое дизельное топливо, но в тоже время в рамках перехода на альтернативные источники энергии более дешёвым доступным может стать альтернативное топливо смесь 70% зимнего дизельного топлива 338 и 30 % биодизеля с 0,05 % от массовой доли биодизеля диспергирующей присадкой Viscoplex. Это топливо уступает по ездовым характеристикам соответствует арктическому дизельному топливу, но является более дешёвым и на 30% биовосполнимым, что в будущем в период снижения запасов ископаемых углеводородов будет иметь существенную роль.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе проведен анализ влияния арктического дизельного топлива (минус 40°C) на рабочий процесс ДВС. Получены основные выводы по работе:

1. Проведенный анализ возможности применения различных видов топлива для эксплуатации дизельного двигателя в условиях арктических температур (минус 40 °С) выявил возможность применения арктического дизельного топлива А44, а также как эквивалент ему смесь 70% зимнего дизельного топлива ЗЗ8 и 30% биодизеля с 0,05 % от массовой доли биодизеля диспергирующей присадкой Viscoplex. Такой состав альтернативного арктического топлива позволяет получить необходимую температуру фильтруемости при сохранении цетанового числа в пределах, указанных в ГОСТ Р 55475-2013.
2. Получено, что при снижении температуры окружающего воздуха с 0 до минус 40 ° С произойдет некоторое повышение мощностных показателей работы двигателя, для арктического дизеля и снижение всех показателей при использовании альтернативного топлива. За счет снижения температуры окружающего воздуха повысится его плотность, что сказывается на наполнении цилиндра, так увеличение заряда при впуске для арктического дизельного топлива составило от 11 до 16 %, а для смесового биодизельного топлива от 16 до 21 %, где большие значения соответствуют меньшим оборотам двигателя.
3. Как мы видим переход двигателя на арктическое топливо привел к росту нагрузок в среднем на 3-5%, но нужно провести анализ изменения прочности деталей при низких температурах характерных для Арктики.
4. Проведенный анализ показал, что для эффективной работы в условиях низких температур  $T_0$  минус 40 °С, наиболее хорошо соответствует

арктическое дизельное топливо, но в тоже время в рамках перехода на альтернативные источники энергии более дешёвым доступным может стать альтернативное топливо смесь 70% зимнего дизельного топлива 338 и 30% биодизеля с 0,05 % от массовой доли биодизеля диспергирующей присадкой Viscoplex. Это топливо уступает по ездовым характеристикам соответствует арктическому дизельному топливу, но является более дешёвым и на 30% биовосполнимым, что в будущем в период снижения запасов ископаемых углеводородов будет иметь существенную роль.

### **Выводы по 1-му разделу**

Проведенный анализ возможности применения различных видов топлива для эксплуатации дизельного двигателя в условиях арктических температур (минус 40 °С) выявил возможность применения арктического дизельного топлива А44, а также как эквивалент ему смесь 70% зимнего дизельного топлива 338 и 30% биодизеля с 0,05 % от массовой доли биодизеля диспергирующей присадкой Viscoplex. Такой состав альтернативного арктического топлива позволяет получить необходимую температуру фильтруемости при сохранении цетанового числа в пределах, указанных в ГОСТ Р 55475-2013.

### **Выводы по 2-му разделу**

Тепловой расчет показал значительное влияние твида топлива и условий работы двигателя на мощностные и экономические характеристики работы. Получено, что при снижении температуры окружающего воздуха с 0 до минус 40 ° С произойдет некоторое повышение мощностных показателей работы двигателя, для арктического дизеля и снижение всех показателей при использовании альтернативного топлива.

За счет снижения температуры окружающего воздуха повыситься его плотность, что сказывается на наполнении цилиндра, так увеличение заряда при впуске для арктического дизельного топлива составило от 11 до 16 %, а

для смесового биодизельного топлива от 16 до 21 %, где большие значения соответствуют меньшим оборотам двигателя.

### **Выводы по 3-му разделу**

Как мы видим переход двигателя на арктическое топливо привел к росту нагрузок в среднем на 3-5%, но нужно провести анализ изменения прочности деталей при низких температурах характерных для Арктики. Известно, что то при переходе на более низкие температуры происходит увеличение прочности и снижение пластичности, следовательно принципиального снижения запаса прочности деталей двигателя не произойдет, и изменение размеров деталей для увеличения их прочности дополнительно не требуется, только из-за снижения пластичности следует рекомендовать выходить на мощностные режимы работы при погретом двигателе.

### **Выводы по 4-му разделу**

Проведенный анализ показал, что для эффективной работы в условиях низких температур  $T_0$  минус 40 °С, наиболее хорошо соответствует арктическое дизельное топливо, но в тоже время в рамках перехода на альтернативные источники энергии более дешёвым доступным может стать альтернативное топливо смесь 70% зимнего дизельного топлива 338 и 30% биодизеля с 0,05 % от массовой доли биодизеля диспергирующей присадкой Viscoplex. Это топливо уступает по ездовым характеристикам соответствует арктическому дизельному топливу, но является более дешёвым и на 30% биовосполнимым, что в будущем в период снижения запасов ископаемых углеводородов будет иметь существенную роль.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Akmandor, I.S. Novel Thermodynamic Cycle / I.S. Akmandor, N. Ersöz// PTC, WO, 2004. 022919 AI. (March 18th 2004)
2. Ameri M., Kiaahmadi F., Khanaki M. Comparative analysis of the performance of a dual-fuel internal combustion engine for CNG and gasoline fuels. - Journal of Power Technologies, year 2012, pp. 214–226.
3. Baumeister, T. Mark's Standard Handbook for M. Engineer / T Baumeister // McGraw- Hill Inc., New York, 1966.
4. 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
5. 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
6. 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
7. Clarke, J. M. Thermodynamic Cycle Requirements for Very High Rotational Efficiencies / J. M. Clarke // J. Mech. Eng. Sci. 1974
8. Fuller, D.D. Theory and Practice of Lubrication for Engineers / D.D. Fuller // John Wiley & Sons Inc., New York, 1966
9. Haywood, R.W. A Critical Review of Theorems of Thermodynamics Availability // R.W. Haywood / J. Mech. Eng. Sci. vol.16 MIT Press, 1970.
10. 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

11. Kemalov A.F., Kemalov R.A., Valiev D.Z., Abdrafikova I.M. Development of the composition of depressor - dispersant additives for petroleum fuels // Life Science Journal. 2014. V.11 (12s). P. 461-465.
12. 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.
13. 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.
14. Renegar, D.C. The Quasiturbine / D.C. Renegar // USA Patent No:6629065 September 12th 2003
15. Rory, R. D. The Ball Piston Engine: A New Concept in High Efficient Power Machines / R. D. Rory // Convergence Eng. Corporation.
16. Stephen, R. T. An Introduction to Combustion / R.T.Stephen // McGraw-Hill Series in Mech. Eng. 1996.
17. 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
18. Verhelst, S. A critical review of experimental research on hydrogen fueled SI engines / S. Verhelst, R. Sierens, S. Verstraeten // SAE. - 2006. - №2006-01-0430.
19. Zurbriggen f. Diesel-minimal combustion control of a natural gas-diesel engine. - Institute for dynamic systems and control, year 2016, pp. 302–311.
20. ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Общие требования и правила составления. – Москва: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 47 с.

21. Камешков А.В., Гайле А.А. Получение дизельных топлив с улучшенными низкотемпературными свойствами (обзор) // Известия СПбГТИ(ТУ). 2015. №29. С. 49-60.
22. Киселева Т.П., Алиев Р.Р., Целютина М.И. Каталитическая депарафинизация: состояние и перспективы. Часть 1. // Нефтепереработка и нефтехимия. 2016. №2. С. 3-8.
23. 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.
24. Крючков, В. Разбираем новый 1,8-литровый двигатель 21179 [Электронный ресурс]: В. Крючков / Интернет издание «За рулем.рф». - автомобильный журн. — Москва: 1998-2016. – Режим доступа: <http://www.zr.ru/content/articles/834887-novyj-18-litrovyyj-dvigatel-vaz-21179>(дата обращения 29.05.18)
25. Макаренко Н.В. Мастеру об охране труда / Н.В. Макаренко//«Машиностроение» - Москва: 1990. - 128 с.
26. Орлин А.С., Круглов М.Г. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей. – М.: «Машиностроение», 1983.
27. Сидоров В.В. Положение о Мастере основного производственного цеха / В.В. Сидоров // ОАО АвтоВаз– Тольятти: 2003.
28. Смоленский, В.В. Автомобильные двигатели: курс лекций / В.В. Смоленский. – Тольятти: ТГУ, 2009. – 183 с.
29. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года (основные положения).