

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(институт, факультет)

Энергетические машины и системы управления

(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой «ЭМСУ» _____

(подпись)

Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

« ____ » _____

2016 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение бакалаврской работы

Студент Сечнев Александр Юрьевич

1. Тема работы Автомобильный двигатель на композитном газовом топливе

2. Срок сдачи студентом законченной работы 16-22 июня 2016 года,
согласно утвержденному графику защиты ВКР на 2015-2016 уч.год

3. Исходные данные к работе Двигатель ВАЗ 2111 на композитном газовом
топливе, $iV_h=1,5$ л, частота вращения коленчатого вала $n = 5200$ об/мин. Степень
сжатия $\varepsilon = 9,8$.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих
разработке вопросов, разделов) _____

Анализ состояния вопроса

Тепловой расчет двигателя

Расчет кинематики и динамики двигателя

Расчет поршневой группы

Расчет корпуса двигателя

Расчет системы смазки

Расчет системы охлаждения

Безопасность и экологичность работы

5. Ориентировочный перечень графического и иллюстративного материала

Продольный и поперечный чертеж двигателя - 2 (А1)

Лист диаграмм теплового расчета - 1 (А1)

Лист диаграмм ВСХ - 1 (А1)

Лист диаграмм кинематического и динамического расчета - 2 (А1)

Лист спец части - 2 (А1)

6. Консультанты:

Безопасность и экологичность работы

М.И. Фесина

7. Дата выдачи задания « 20 » марта 2016 г.

Руководитель бакалаврской работы

(подпись)

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

(подпись)

А.Ю. Сечнев

(И.О. Фамилия)

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(институт, факультет)

Энергетические машины и системы управления

(кафедра)

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой «ЭМСУ»

(подпись)

Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

« 20 »

марта

2016 г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
выполнения бакалаврской работы

Студента Сечнева Александра Юрьевича

по теме Автомобильный двигатель на композитном газовом топливе

№ этапов работы	Содержание этапов работы	Форма представления материала	Плановый срок выполнения этапа и представления его на контроль	Планируемый объем выполнения, %	Фактический объем выполнения, %	Отметка о выполнении
1	Тепловой расчет двигателя <i>Чертеж диаграмм теплового расчета; ВСХ</i>	Таблицы, описания Демонстрационный лист	30 апреля 2016 г.	90%		
2	Расчет кинематики и динамики двигателя <i>Чертеж диаграмм кинематического и динамического расчетов</i>	Таблицы, описания Демонстрационный лист	5 мая 2016 г.	90%		
3	Расчет основных деталей двигателя	Таблицы, описания Демонстрационный лист	11 мая 2016 г.	90%		
4	Расчет механизмов и систем двигателя	Таблицы, описания Демонстрационный лист	15 мая 2016 г.	90%		
6	Описание конструкции спроектированного ДВС	Раздел записки Графический лист	20 мая 2016 г.	80%		
7	Безопасность и экологичность	Раздел записки	30 мая 2016 г.	90%		
8	Оформление и доработка пояснительной записки и листов графической части с учетом замечаний, полученных во время предварительной защиты	Сброшюрованная записка и подписанные чертежи	10 июня 2016 г.	100%		

Студент

(подпись)

А.Ю. Сечнев

(И.О. Фамилия)

Руководитель

(подпись)

В.В. Смоленский

(И.О. Фамилия)

« _____ »

2016 г.

АННОТАЦИЯ

Целью данной работы является оценка возможностей и эффективности использования композитного газового топлива.

Бакалаврская работа состоит из:

- пояснительной записки
- графической части.

Пояснительная записка включает в себя:

- расчетную часть
- описание конструкции разработанного двигателя работающего на композитном газовом топливе.

Расчетная часть содержит:

- оценочные расчеты системы питания двигателя на композитном газовом топливе и сжатом природном газе.

Конструкторская часть содержит:

- тепловой расчет при выбранных условиях
- кинематический и динамический расчеты
- расчеты основных деталей и систем проектируемого двигателя.

В графической части работы приводится:

- продольный и поперечный разрезы двигателя
- графики кинематического и динамического расчетов
- диаграмма ВСХ
- специальная часть.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании двигателей работающих на композитном газовом топливе.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Анализ состояния вопроса	9
1.1 Особенности сгорания ТВС при добавке водорода	9
1.2 Расширение пределов бедного срыва при добавке водорода	10
1.3 Повышение экономичности при добавке водорода	10
1.4 Повышение эффективности использования топлива при добавке водорода	10
2 Тепловой расчет и тепловой баланс двигателя	11
2.1 Тепловой расчет	11
2.1.1 Топливо	11
2.1.2 Параметры рабочего тела	12
2.1.3 Параметры окружающей среды и остаточные газы	14
2.1.4 Процесс впуска	15
2.1.5 Процесс сжатия и начала воспламенения смеси	17
2.1.6 Процесс сгорания	18
2.1.7 Процессы расширения и выпуска	20
2.1.8 Индикаторные параметры рабочего тела	21
2.1.9 Эффективные показатели двигателя	22
2.1.10 Основные параметры цилиндра двигателя	23
2.1.11 Построение индикаторной диаграммы	25
2.2 Тепловой баланс	25
3 Построение внешней скоростной характеристики	28
4 Кинематический расчет	29
5 Динамический расчет двигателя работающего на газе	31
5.1 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма	31
5.2 Силы инерции	32
5.3 Суммарные силы	33
5.4 Крутящие моменты	33

5.5 Расчет сил, действующих на шатунную шейку коленчатого вала	34
5.6 Силы, действующие на колено вала	37
5.7 Силы, действующие на коренные шейки	38
5.8 Равномерность крутящего момента и равномерность хода двигателя	43
6 Безопасность и экологичность бакаларской работы	44
7 Специальная часть	48
7.1 Сравнительный анализ показателей работы двигателя на природном газе и с добавками к нему	48
Заключение	55
Список ипользованных источников	56
Приложение А - Расчет основных деталей двигателя	59
Приложение Б - Результаты теплового расчета	95

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент, двигатели внутреннего сгорания (ДВС), являются самыми практичными и наиболее распространенными, востребованными двигателями, находящие применение как в ТС, так и в разного рода механизмах. Так как двигатель вырабатывает механическую энергию, необходимую для движения автомобиля или механизма.

Существуют тенденции, на протяжении всего существования двигателей, по улучшению показателей ДВС, к ним относятся:

- снижение себестоимости
- увелечение ресурсоспособности
- простота эксплуатации и ТО
- снижение потребления масла, снижение выброса вредных веществ, уровня шума и вибраций
- снижение потребления топлива, увелечение мощностных характеристик.

Существуют программы, которые позволяют перевести двигатель внутреннего сгорания, работающего на жидком топливе (бензин, дизель), на газовое топливо (композиционное газовое топливо, сжатый природный газ), что позволит существенно уменьшить выброс вредных веществ в атмосферу, снизить потребление топлива, без существенной потери мощности ДВС, что будет отвечать стандартам современных ЕВРО.

Такие двигатели, имеют ресурс для улучшения показателей и их характеристик, несмотря на явное преимущество перед двигателями работающими на жидком топливе.

В данной работе будет рассматриваться автомобильный двигатель, работающий на композиционном газовом топливе с добавкой водорода 5%, и изучение влияния такого топлива на рабочие характеристики и показатели двигателя. Проведен расчет и сравнительный анализ двух видов газовых топлив: СПГ и КГТ с добавкой водорода 5%, на базе двигателя ВАЗ 2111.

1 Анализ состояния вопроса

1.1 Особенности сгорания ТВС при добавке водорода

Существует экспериментальный материал зарубежных авторов [15, 16, 17, 18, 19], на основании которых можно сделать вывод: добавка H_2 , является наиболее эффективным методом управления процессом горения в тепловых двигателях работающих на жидких топливах, это обеспечит повышение экономичности и экологичности, снижению ОГ.

В следствии того, что водород имеет низкую энергию воспламенения и высокую реакционную способность, что позволяет направленно влиять на свойства и процесс горения топлива, с определенным количеством водорода, следовательно это более качественно регулирует рабочий процесс и сохраняет энергетическую эффективность, значительно сокращая токсичность в сравнении с жидким топливом [7, 14, 23].

Проведенные исследования показали [18, 19], что при равных условиях, увеличение добавки водорода - увеличивает максимальное давление в цикле, это заметно в бедных смесях. Устраняется по мере обогащения топлива. Чем больше доля водорода, тем меньше межцикловая нестабильность, невысокая добавка водорода может увеличить тепловыделение и повысить полноту сгорания что заметно при обеднении смеси.

На данный момент, ведутся работы по уменьшению токсичности и увеличению экономичности двигателя на КГТ [15].

Добавка водорода значительно влияет на процесс горения:

- уменьшает задержку воспламенения
- расширяет пределы устойчивости
- увеличивает скорость распространения ламени
- снижает токсичность ОГ

1.2 Расширение пределов бедного срыва при добавке водорода

Горение жидких смесей происходит при смесях близких к стехеометрическим. Это ведет к некачественному рабочему процессу - количественное регулирование работы ДВС, при дросселировании, снижая экологические и экономические показатели [12, 13, 14, 28].

Так как при обеднении смеси возникает нестабильное горение ТВС, это приводит к затуханию пламени - пропускам сгорания ТВС. В работах показано влияние добавки водорода на расширение пределов воспламенения и горения ТВС.

1.3 Повышение экономичности при добавке водорода

В работах так же показано что некоторое количество H_2 приводит к повышению топливной экономичности работы ДВС, повышая скорость распространения пламени, увеличивая интенсивность процесса сгорания и его полноту, расширяя пределы УСТВС. Добавка H_2 позволяет обеднять смеси, это улучшает расход ТВС. В работе [15, 16] показаны возможности качественного регулирования смеси в зависимости от режимов работы двигателя, что значительно повышает экономичность работы двигателя.

1.4 Повышение эффективности использования топлива при добавке водорода

Добавка H_2 , как показано в работах, позволяет сократить время сгорания ТВС вблизи ВМТ, приближая процесс сгорания с изохорным подводом теплоты. В исследованиях [16, 17] показано влияние водорода на электропроводность пламени и увеличение средних скоростей сгорания в третьей фазе, это показывает повышение интенсивности сгорания, что повышает степень выгорания топлива, тем самым, добиваясь более полного его использования. Тем самым двигатель с добавками водорода, является оптимальным силовым агрегатом при создании гибридных силовых установок.

2 Тепловой расчет и тепловой баланс двигателя работающего на газовом топливе

2.1 Тепловой расчет

Тепловой расчет проводится по методике Вибе, представленной в следующих источниках (1,2,3,7), для двух видов топлива, композитное газовое топливо с добавкой водорода (далее как КГТ), и сжиженного природного газа (далее как СПГ).

Исходные данные: Двигатель ВАЗ 2111 четырехцилиндровый, $i = 4$
 $iV_h=1,5$ л, частота вращения коленчатого вала $n = 5200$ об/мин. Степень сжатия $\varepsilon = 9,8$, топливо - композитно газовое топливо с добавкой водорода 5%.

При проведении теплового расчета выбирают обычно основные режимы работы двигателя, таковыми являются для газовых ДВС: 850, 1500, 2500, 4000, 5200 об/мин.

2.1.1 Топливо

Таблица 1 - Средний элементарный состав газового топлива

Состав	масса м3	доля м3
Метан CH_4	60,61	90
Этан C_2H_6	1,99	2,96
Пропан C_3H_8	0,114	0,17
Бутан C_4H_{10}	0,37	0,55
Тяж уг-ды. C_5H_{12}	0,282	0,42
Водород $H_2 + 5\%$	32,74	0,14
Окс.угл. CO	0,094	0,14
Угл.газ. CO_2	0,316	0,47
Азот N_2	3,468	5,15

Молекулярная масса композитного газового топлива по объему $m_T=12,59$ кг/кмоль, по массе $m_T= 16,14$ м3/кмоль, молекулярная масса СПГ по объему

$m_T=17,717$ м³/кмоль, по массе $m_T=17,717$ кг/кмоль.

Низшая теплота сгорания композитного газового топлива по объему:

$$H_u' = 12,8CO + 10,8H_2 + 35,7CH_4 + 63,3C_2H_6 + 90,9C_3H_8 + 119,7C_4H_{10} + 146,2C_5H_{12} = 12,8 \cdot 0,000943 + 10,8 \cdot 0,327406 + 35,7 \cdot 0,606183 + 63,6 \cdot 0,0193 + 90,9 \cdot 0,0011 + 119,7 \cdot 0,0037 + 146,7 \cdot 0,0028 = 27,41187 \text{ МДж/м}^3 = 27411,87 \text{ кДж/м}^3 \quad (1.1)$$

Низшая теплота сгорания композитного газового топлива по массе:

$$H_u = [34,013C + 125,6H - 10,9(O - S) - 2,512(9H + W)] \cdot 10^6 = [34,013 \cdot 0,619629 + 125,6 \cdot 0,292478985 - 10,9 \cdot (0,008795215 - 0) - 2,512 \cdot (9 \cdot 0,25 + 0)] \cdot 10^6 = 51102,8 \text{ кДж/кг} \quad (1.2)$$

Низшая теплота сгорания СПГ топлива по объему:

$$H_u' = 12,8CO + 10,8H_2 + 35,7CH_4 + 63,3C_2H_6 + 90,9C_3H_8 + 119,7C_4H_{10} + 146,2C_5H_{12} = 12,8 \cdot 0,0014 + 10,8 \cdot 0,0014 + 35,7 \cdot 0,9 + 63,6 \cdot 0,0296 + 90,9 \cdot 0,0017 + 119,7 \cdot 0,0055 + 146,7 \cdot 0,0042 = 35,46364 \text{ МДж/м}^3 = 35463,64 \text{ кДж/м}^3 \quad (1.3)$$

Низшая теплота сгорания СПГ топлива по массе:

$$H_u = [34,013C + 125,6H - 10,9(O - S) - 2,512(9H + W)] \cdot 10^6 = [34,013 \cdot 0,6884771 + 125,6 \cdot 0,2138655 - 10,9 \cdot (0,0097725 - 0) - 2,512 \cdot (9 \cdot 0,25 + 0)] \cdot 10^6 = 45337,09 \text{ кДж/кг} \quad (1.4)$$

Коэффициент избытка воздуха принимаем $\alpha = 1$.

Расчет будет проводиться для всех выбранных режимов, окончательные значения будут приводится в форме таблицы.

2.1.2 Параметры рабочего тела

Формулы для расчета параметров рабочего тела приведены ниже, ответы

сведены в таблицу 2, данного раздела.

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания:

$$L'_0 = \frac{1}{0,21} * \sum \left(n + \frac{m}{4} - \frac{r}{2} \right) \cdot C_n H_m O_r \frac{\text{мольвоздуха}}{\text{мольгазообртопл}}, \text{ или } \frac{\text{м}^3 \text{возд}}{\text{м}^3 \text{топл}} \quad (2.2)$$

$$L_0 = \frac{1}{0,208} \cdot \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} \right) (\text{кмоль.возд./кг.топл})$$

Количество горючей см./кмоль газообразного топлива

$$M_1' = \alpha L_0' \text{ кмоль} \quad (2.3)$$

$$M_1 = \left(\alpha \cdot L_0 + \frac{1}{\mu_m} \right) \frac{\text{кмольсв.заряда}}{\text{кг.топлива}}$$

Количество отдельных компонентов продуктов сгорания при $\alpha \geq 1$:

- углекислого газа

$$M'_{CO_2} = \sum n(C_n H_m O_r) \text{ кмоль } CO_2 / \text{кмоль топл} \quad (2.4)$$

$$M_{CO_2} = C / 12 \frac{\text{кмольсв.зар.}}{\text{кг.топл}}$$

- водяного пара

$$M'_{H_2O} = \sum \frac{m}{2} (C_n H_m O_r) \text{ кмоль} \quad (2.5)$$

$$M_{H_2O} = H / 2 \frac{\text{кмоль } H_2O}{\text{кг.топл.}}$$

- кислорода

$$M'_{O_2} = 0,208(\alpha - 1)L_0' \text{ кмоль} \quad (2.6)$$

$$M_{O_2} = 0,208(\alpha - 1)L_0 \frac{\text{кмоль } O_2}{\text{кг.топл}}$$

- азота

$$M'_{N_2} = 0,792 \alpha L'_0 + N_2 \text{ кмоль.} \quad (2.7)$$

$$M_{N_2} = 0,792 \alpha L_0 \frac{\text{кмоль} N_2}{\text{кг.топл}}$$

Общее число продуктов сгорания

$$M'_2 = M'_{H_2O} + M'_{O_2} + M'_{CO_2} + M'_{N_2} \text{ кмоль.} \quad (2.8)$$

Параметры рабочего тела на всех режимах будут одинаковы, поэтому в таблице приведены параметры рабочего тела для топлив КГТ и СПГ, на режиме 5200 об/мин.

Таблица 2 - Параметры рабочего тела

Параметры рабочего тела			Параметры рабочего тела		
Топливо	СПГ	КГТ		СПГ	КГТ
$n, \text{ мин}^{-1}$	5200		$n, \text{ мин}^{-1}$	5200	
L'_0	9,53293	7,20554	L_0	0,531413	0,598464
α	1	1	α	1	1
$M'_1, \text{ кмоль}$	9,532	7,20	$M_1, \text{ кмоль/кг}$	0,5878	0,6549
$M'_{CO_2}, \text{ кмоль}$	1,015	1,009	$M^{CO_2}, \text{ кмоль/кг}$	0,05737	0,05163
$M'_{H_2O}, \text{ кмоль}$	1,949	1,31	$M^{H_2O}, \text{ кмоль/кг}$	0,1475	0,1475
$M'_{O_2}, \text{ кмоль}$	0	0	$M_{O_2}, \text{ кмоль/кг}$	0	0
$M'_{N_2}, \text{ кмоль}$	7,55	5,71	$M_{N_2}, \text{ кмоль/кг}$	0,5052	0,5506
$M'_2, \text{ кмоль}$	10,52	8,03	$M_2 \text{ кмоль/кг}$	0,711	0,7497

2.1.3 Параметры окружающей среды и остаточные газы

Параметры окружающей среды приведены в таблице 3

Таблица 3 - Параметры окружающей среды

$p_k=p_0$ МПа	$T_k=T_0$ К	T_r К	P_r МПа
0,1	293	1200	0,118

Величина давлений остаточных газов на всех режимах работы двигателя приведена в таблице 6.

Зависимость A_n от частоты вращения коленчатого вала определяется по формуле ниже, расчетные данные приведены в таблице 5.

$$A_n = 95/n \quad (2.9)$$

Таблица 5 – Зависимость A_n от n_N

n	A_n
850	0,112
1500	0,063
2500	0,038
4000	0,0237
5200	0,0183

2.1.4 Процесс впуска

Процесс впуска на всех режимах рассчитывается по следующим формулам, ответы приведены в таблице 4.

Температура подогрева свежего заряда на номинальном скоростном режиме принимаем $\Delta T_N = 8$ °С. На остальных режимах значения ΔT рассчитывается по формуле ниже:

$$\Delta T = A_T (110 - 0,0125n), \quad (2.10)$$

где $A_T = \Delta T_N / (110 - 0,0125 n_N)$.

Плотность заряда на впуске:

$$\rho_0 = p_0 \cdot 10^6 / (R_B T_0) \text{ кг/м}^3, \quad (2.11)$$

где $R_B = 287$ Дж/(кг град) – удельная газовая постоянная для воздуха.

Принимаем снижение сопротивления $\beta^2 + \xi_{ВП} = 2,8$ и $\omega_{ВП} = 95$ м/с.

Тогда ΔP_a на всех скоростных режимах двигателя рассчитываем по формуле:

$$\Delta P_a = (\beta^2 + \xi_{ВП}) \cdot A_n^2 n^2 p_k \cdot 10^{-6} / 2 \text{ МПа}, \quad (2.12)$$

где $A_n = \omega_{ВП} / n_N$.

Давление в конце впуска:

$$P_a = p_0 - \Delta p \text{ МПа} \quad (2.13)$$

Коэффициент остаточных газов:

$$\gamma_r = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{\varphi_{оч} P_r}{\varepsilon \varphi_{доз} P_a - \varphi_{оч} P_r} \quad (2.14)$$

Для всех режимов $\varphi_{доз}$ приведены в таблице.

Температура в конце впуска:

$$T_a = (T_0 + \Delta T + \gamma_r T_r) / (1 + \gamma_r) \text{ К} \quad (2.15)$$

Коэффициент наполнения:

$$\eta_v = \frac{T_0}{T_0 + \Delta T} \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{p_0} (\varphi_{доз} \varepsilon P_a - \varphi_{оч} P_r) \quad (2.16)$$

Таблица 6 – Параметры процесса впуска и газообмена

Параметры	Процесс впуска и газообмена									
	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ
Толиво										
n, мин ⁻¹	850		1500		2500		4000		5200	
α	1		1		1		1		1	
T _г , К	950	900	1000	950	1050	1000	1100	1050	1200	1100
P _г , МПа	0,105	0,100	0,109	0,1082	0,115	0,110	0,118	0,115	0,120	0,118
ΔT, °С	18,4	15,2	13,3	12	11,6	10,1	11	9,5	10	8
Δp _а , МПа	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
p _а , МПа	0,1	0,09	0,088	0,086	0,086	0,082	0,084	0,085	0,084	0,083
φдоз	0,85	0,85	1,05	1,05	1,15	1,15	1	1	0,9	0,9
γ _г	0,041	0,042	0,041	0,041	0,041	0,041	0,042	0,041	0,041	0,041
T _а , К	355	352,7	350,1	350,7	350	350,7	350,7	350,7	349,7	348
η _в	0,65	0,65	0,84	0,84	0,929	0,929	0,791	0,791	0,698	0,698

2.1.5 Процесс сжатия и начала воспламенения смеси

Процесс сжатия рассчитывается по формулам ниже, ответы приведены в таблице 7.

Значение показателя политропы сжатия находится методом последовательных приближений из уравнения:

$$n_1 = 1 + \frac{8,314}{20,16 + 1,738 \cdot 10^{-3} (\varepsilon^{n_1-1} + 1) \cdot T_a} \quad (2.17)$$

Давление в конце сжатия:

$$P_c = P_a \varepsilon^{n_1} \text{ Мпа} \quad (2.18)$$

Температура в конце сжатия:

$$T_c = T_a \varepsilon^{n_1-1} \quad (2.19)$$

Удельный объем, давление и температура рабочего тела в момент воспламенения находятся по следующим формулам:

$$V_y = \frac{V_a}{\varepsilon} \cdot \left[1 + \frac{\varepsilon-1}{2} \cdot \left[\left(1 + \frac{1}{\lambda} \right) - \left[\cos\left(\frac{\Theta \cdot \pi}{180}\right) + \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \left(\sin\left(\frac{\Theta \cdot \pi}{180}\right) \right)^2} \right] \right] \right] \text{ м}^3/\text{кг} \quad (2.20)$$

$$p_y = \left(\frac{V_a}{V_y} \right)^{n_1} \cdot p_a, \text{ МПа} \quad (2.21)$$

$$T_y = \left(\frac{V_a}{V_y} \right)^{n_1-1} \cdot T_a, \text{ К} \quad (2.22)$$

Таблица 7 – Процесс сжатия и начала воспламенения смеси

Параметры	Процесс сжатия									
	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ
п, мин-1	850		1500		2500		4000		5200	
n_1	1,38	1,373	1,38	1,375	1,383	1,363	1,389	1,377	1,389	1,376
P_c , МПа	3	2,61	2,7	2,5	2,45	2,39	2,35	2,3	2,09	2
T_c , К	850	844,4	830	796	805	790	795,4	785	800,05	781
V_y , м ³ /кг	0,155	0,144	0,163	0,154	0,18	0,162	0,18	0,18	0,21	0,18
p_y , МПа	1,43	1,57	1,33	1,43	1,16	1,34	1,11	1,16	0,92	1,12
T_y , К	768,5	788,9	754,2	768,5	724,7	754,2	717,2	724,7	680,5	717,3

2.1.6 Процесс сгорания

Процесс сгорания рассчитывается по формулам ниже, результаты расчета приведены в Приложении А.

Давление газов в процессе сгорания:

$$p_2 = E_2 \cdot \Delta X_{1-2} + p_1 \cdot (K_{1-2} \cdot \psi(\varphi_1) - \psi(\varphi_2)) / [K_{1-2} \cdot \psi(\varphi_1) - \psi(\varphi_1)] \text{ МПа} \quad (2.23)$$

Доля топлива, сгоревшего на рассматриваемом участке:

$$\Delta X_{1-2} = \exp \left[-6,908 \left[\frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[-6,908 \left[\frac{\varphi_2}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] \quad (2.24)$$

Фактор теплоемкостей находится следующим образом:

$$K_{1-2} = \frac{k_{1-2} + 1}{k_{1-2} - 1} \quad (2.25)$$

Отношение средних теплоемкостей рабочего тела на участке 1-2:

$$k_{1-2} = 1,259 + \left[76,7 - \left(13,6 - \frac{14,2}{\alpha} \right) \cdot x_{1-2} \right] \cdot \frac{1}{T_{1-2}} - \left(0,0665 - \frac{0,0245}{\alpha} \right) \cdot x_{1-2} \quad (2.26)$$

Среднее значение доли топлива сгоревшего на участке 1-2:

$$x_{1-2} = 0,5 \left[\exp \left[-6,908 \left[\frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] - \exp \left[-6,908 \left[\frac{\varphi_2}{\varphi_z} \right]^{m+1} \right] \right] \quad (2.27)$$

Средняя температура на участке 1-2

$$T_{1-2} = \frac{T_1 + T_2}{2} \text{ К} \quad (2.28)$$

$$\psi(\varphi) = 1 + \frac{\varepsilon - 1}{2} \cdot \sigma \quad (2.29)$$

$$\sigma = \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) - \left[\cos(\varphi') + \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 (\sin(\varphi'))^2} \right] \quad (2.30)$$

Температура в процессе сгорания:

$$T_2 = \frac{T_y \cdot p_2 \cdot \psi(\varphi_2)}{p_y \cdot \psi(\varphi_y) \cdot \mu_{1-2}} \text{ К} \quad (2.31)$$

Средний коэффициент молекулярного изменения свежей смеси:

$$\mu_{1-2} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} \quad (2.32)$$

$$\mu_1 = 1 + \frac{(\mu_{0\max} - 1) \left[1 - \exp \left[-6,908 \left(\frac{\varphi_1}{\varphi_z} \right)^{m+1} \right] \right]}{1 + \gamma_r} \quad (2.33)$$

2.1.7 Процессы расширения и выпуска

Средний показатель политропы расширения находится методом последовательных приближений из уравнения:

$$n_2 = 1 + \frac{8,341}{23,7 + 0,0046 \cdot T_z \cdot \left(1 + \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right)} \quad (2.34)$$

Давление и температура в конце процесса расширения:

$$p_b = \frac{p_z}{\delta^{n_2}}, \text{ МПа} \quad (2.35)$$

$$T_b = \frac{T_z}{\delta^{n_2-1}}, K \quad (2.36)$$

Проверка ранее принятой температуры остаточных газов:

$$T_r = \frac{T_b}{\sqrt[3]{p_b / p_r}}, K \quad (2.37)$$

$$\Delta T_r = 100(T_r - 950) / 950, \%$$

Для остальных режимов окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице 8.

Таблица 8 – Параметры процесса расширения и выпуска

Параметры	Процесс расширения и выпуска											
	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ		
Топливо	СПГ		КГТ		СПГ		КГТ		СПГ		КГТ	
n, мин ⁻¹	850		1500		2500		4000		5200			
n ₂	1,21	1,1971	1,21	1,19	1,21	1,19	1,32	1,2	1,2	1,19		
p _b , МПа	0,433	0,442	0,432	0,439	0,428	0,436	0,355	0,433	0,445	0,456		
T _b , К	1532	1654,6	1525,2	1634	1514,3	1625,4	1257,9	1614	1574,1	1701,6		
T _r , К	900	893	925	900	951	910	1000	985	1053	995		
ΔT _r %	4,1	4,8	4,1	4,5	4,1	4,2	3	3,3	3,5	4		

2.1.8 Индикаторные параметры рабочего тела

Индикаторные параметры рабочего тела рассчитываются по следующим формулам, расчетные значения приведены в таблице 13.

Теоретическое среднее индикаторное давление

$$p'_i = \frac{p_c}{\varepsilon - 1} \left[\frac{\lambda}{n_2 - 1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right) \right] \quad (2.37)$$

Среднее индикаторное давление

$$p_i = \varphi_i p_i', \quad (2.38)$$

где коэффициент диаграммы принят $\varphi_i = 0,96$.

Индикаторный КПД и индикаторный удельный расход газа:

$$\eta_i = 371,2 \cdot 10^{-6} M_1' T_k p_i / (H_u' p_k \eta_v) \quad (2.39)$$

$$v_i = 3600 / (H_u \eta_i) \quad (2.40)$$

2.1.9 Эффективные показатели двигателя

Эффективные показатели рассчитываются по формулам ниже, расчетные значения приведены в таблице 9, среднее давление механических потерь для бензиновых двигателей с числом цилиндров до шести и отношения $S / D \leq 1$:

$$p_M = 0,034 + 0,0113 \cdot v_{n.cp} \quad (2.41)$$

Значение средней скорости поршня при:

$$v_{n.cp} = \frac{Sn}{3 \cdot 10^4} \quad (2.42)$$

Среднее эффективное давление и механический КПД:

$$p_e = p_i - p_M \quad (2.44)$$

$$\eta_M = p_e / p_i \quad (2.43)$$

Эффективный КПД и эффективный удельный расход топлива:

$$\eta_e = \frac{371,2 \cdot 10^{-6} \cdot p_e \cdot T_k \cdot M_1}{p_k \cdot \eta_v \cdot H_u} \quad (2.44)$$

$$v_e = 3,6 / (\eta_e H_u') \quad (2.45)$$

Таблица 9 – Индикаторные и эффективные параметры двигателя

Параметры	Индикаторные и эффективные параметры двигателя									
	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ
Топливо	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ
$n, \text{мин}^{-1}$	850		1500		2500		4500		5200	
$p_i, \text{Мпа}$	0,978	0,994	0,967	0,987	0,966	0,984	0,959	0,984	1,022	1,062
η_i	0,368	0,366	0,284	0,284	0,255	0,255	0,298	0,299	0,359	0,366
$v_i, \text{м}^3/(\text{кВтч})$	0,275	0,359	0,357	0,463	0,397	0,516	0,340	0,439	0,282	0,359
$v_{н.ср.}, \text{м/с}$	2,012	2,012	3,55	3,55	5,92	5,917	9,46	9,47	12,31	12,31
$p_M, \text{Мпа}$	0,056	0,057	0,074	0,074	0,100	0,101	0,141	0,141	0,173	0,173
$p_e, \text{Мпа}$	0,922	0,937	0,893	0,913	0,865	0,883	0,818	0,843	0,848	0,889
η_{Mi}	0,942	0,943	0,923	0,925	0,895	0,897	0,853	0,857	0,831	0,837
η_e	0,413	0,411	0,312	0,312	0,272	0,272	0,303	0,305	0,355	0,364
$v_e, \text{м}^3/(\text{кВтч})$	0,246	0,319	0,325	0,421	0,373	0,483	0,335	0,431	0,286	0,361

2.1.10 Основные параметры цилиндра двигателя

Основные параметры двигателя берем из ТР двигателя, работающего на композитном газовом топливе и сжеженным природном газе.

Основные параметры двигателя определяются по формулам ниже, для всех режимов окончательные значения рассчитываемых параметров приводятся в таблице 18.

Литраж двигателя:

$$V_n = 30\tau N_e / (p_e n), \text{ об/мин} \quad (2.46)$$

Рабочий объем одного цилиндра:

$$V_h = V_n / i, \text{ л} \quad (2.47)$$

Диаметр цилиндра:

$$D = 100 \cdot \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_h}{\pi \cdot S / D}}, \text{ мм} \quad (2.48)$$

Основные параметры и показатели двигателя определяем по окончательно принятым значениям S и D, таблица 10:

- площадь поршня:

$$F_n = \pi D^2 / (4 \cdot 100), \text{ см}^2 \quad (2.49)$$

- литраж двигателя:

$$V_n = \pi D^2 S i / (4 \cdot 10^6), \text{ л} \quad (2.50)$$

- мощность двигателя:

$$N_e = p_e V_n n / 30\tau, \text{ кВт} \quad (2.51)$$

- крутящий момент:

$$M_e = \frac{3 \cdot 10^4}{\pi} \frac{N_e}{n}, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.52)$$

- часовой расход топлива:

$$V_T = N_e v_e = N_e v_e, \text{ м}^3 / \text{ч} \quad (2.53)$$

- литровая мощность двигателя:

$$N_{л} = N_e / V_{л}, \text{ кВт/л} \quad (2.54)$$

Таблица 10 - Основные параметры и показатели двигателя

Параметры	Основные параметры и показатели двигателя									
	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ	СПГ	КГТ
$n, \text{мин}^{-1}$	850		1500		2500		4000		5200	
$F_n, \text{см}^2$	52,7834									
$V_{л}, \text{л}$	1,499809									
$N_{л}, \text{кВт/л}$	36,76									
$N_e, \text{кВт}$	6,9	8,15	14,4	17,5	26,1	32,2	43,3	49,51	54,48	59,1
$M_e, \text{Н} \cdot \text{м}$	102,3	106,1	105,2	109,12	108,2	111,4	107	110,5	104,6	106,3
$V_T, \text{м}^3 / \text{ч}$	2,41	3,18	5,44	7,2	10,1	13,3	13,7	18,15	15,76	20,85

2.1.11 Построение индикаторной диаграммы

Построение индикаторной диаграммы двигателя осуществляется для номинального режима работы двигателя внутреннего сгорания, которая представлена на плакате.

2.2 Тепловой баланс

Тепловой баланс рассчитывается по формулам ниже, расчетные данные для всех режимов работы двигателя внутреннего сгорания приведены в таблице 11.

Общее количество теплоты, введенной в двигатель с топливом:

$$Q_0 = H_u G_T, \text{кДж/ч} \quad (2.64)$$

Теплота, эквивалентная эффективной работе за 1 секунду:

$$Q_e = 3600 \cdot N_e, \text{кДж/ч} \quad (2.65)$$

Теплота, передаваемая окружающей среде:

$$Q_s = (c \cdot i \cdot D^{1+2m} \cdot n^m \cdot (H_u - \Delta H_u) / (\alpha \cdot H_u)) \cdot 3600 / 1000, \text{Дж/ч} \quad (2.66)$$

Теплота, унесенная отработавшими газами:

$$Q_r = G_m \cdot \left\{ M_2 \left[(\mu c_v)_{t_0}^{t_r} + 8,315 \right] \cdot t_r - M_1 \cdot \left[(\mu c_v)_{t_0}^{t_k} + 8,315 \right] \cdot t_k \right\}, \text{кДж/ч} \quad (2.67)$$

где $(\mu c_v)_{t_0}^{t_r} = 20,755 \text{кДж}$ – теплоемкость отработавших газов, при $\alpha = 1$ и $t_r = 978,94^\circ\text{C}$.

Количество невыделившейся теплоты из-за наличия в продуктах сгорания окиси углерода и водорода при сгорании 1 кг топлива:

$$\Delta H_u = A \cdot (1 - \alpha) \cdot L_0, \text{кДж/кг} \quad (2.68)$$

Теплота, потерянная из-за химической неполноты сгорания топлива, определяется по формуле:

$$Q_{н.с.} = \Delta H_u \cdot G_t \quad (2.69)$$

Неучтенные потери теплоты:

$$Q_{ост.} = Q_0 + (Q_c + Q_s + Q_r + Q_{н.с.}), \text{кДж/ч} \quad (2.70)$$

Составляющие теплового баланса представлены в таблице 21. Тепловой

Таблица 11 - Параметры теплового баланса

Составляющие теплового баланса		Q_e		Q_v		Q_r		$Q_{ост}$		Q_0	
Уравнение теплового баланса		Q, кДж/ч	q, % кДж/ч	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч	Q, кДж/ч	q, % кДж/ч
850 об/мин	СПГ	35235,5	31,33	5613	23,7	27171	31,8	2737	3,208	85351	100
	КГТ	35832,2	31,41	20206	23,2	29543	33,8	1701	1,949	87282	100
1500 об/мин	СПГ	60291,7	31,215	18057	33,6	61512	31,8	6342	3,283	193149	100
	КГТ	61649,1	31,212	65004	32,9	66428	33,6	4437	2,246	197519	100
2500 об/мин	СПГ	97285,5	27,224	38433	34,7	113808	31,8	7905	2,212	357357	100
	КГТ	99322,6	27,179	139204	33,1	122949	33,6	3965	1,085	365441	100
4000 об/мин	СПГ	147280	30,26	49455	36,6	154956	31,8	6435	1,322	486712	100
	КГТ	151722	30,48	178039	35,8	167457	33,6	502,5	0,101	497722	100
5200 об/мин	СПГ	198509	35,5	49948	32,2	177971	31,8	2715	0,486	559007	100
	КГТ	207988	36,38	169149	29,6	192325	33,6	2191	0,383	571652	100

Результаты теплового баланса двигателя представлены на плакате.

3 Построение внешней скоростной характеристики

На основании теплового расчета, посчитанного для пяти режимов работы двигателя внутреннего сгорания, были посчитаны и сведены в таблицу 12 величины параметров, необходимые для построения внешней скоростной характеристики двигателя, работающего на комбинированном газовом топливе и сжиженном природном газе

Внешняя скоростная характеристика двигателя работающего на КГТ и СПГ результаты внешней скоростной характеристики двигателя представлены на плакате.

Таблица 12- Параметры внешней скоростной характеристики

Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Топливо	Параметры внешней скоростной характеристики					
		N_e , кВт	g_e , м ³ /(кВт ч)	M_e , Н м	G_T , м ³ /ч	η_v	α
850	СПГ	6,9	0,246	102,3	2,407	0,652	1
	КГТ	8,15	0,320	106,1	3,184		
1500	СПГ	14,4	0,325	105,2	5,445	0,836	1
	КГТ	17,5	0,421	109,12	7,206		
2500	СПГ	26,1	0,373	108,2	10,077	0,928	1
	КГТ	32,2	0,483	111,4	13,331		
4000	СПГ	43,3	0,335	107	13,724	0,790	1
	КГТ	49,51	0,431	110,5	18,16		
5200	СПГ	54,48	0,286	104,6	15,763	0,698	1
	КГТ	59,1	0,361	106,3	20,85		

Коэффициент приспособляемости по скоростным характеристикам для ДВС работающего на СПГ и КГТ рассчитывается по формуле:

$$K = M_{e_{\max}} / M_{eN} \quad (3.1)$$

$$K_{СПГ} = 109,96/101,3 = 1,085, \quad K_{КГТ} = 111,82/106,1 = 1,053$$

4 Кинематический расчет

Величина отношения радиуса кривошипа к длине шатуна предварительно была посчитана в тепловом расчете, $\lambda=0,293$.

Кинематически расчет проводится по формулам ниже, расчетные данные сведены в таблицу 13.

При этих условиях, длина шатуна:

$$L_{ш} = R/\lambda = 35,5 / 0,293 = 121 \text{ мм} \quad (4.1)$$

Перемещение поршня рассчитывается по формуле:

$$S_x = r \left[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right], \text{ мм} \quad (4.2)$$

Расчет S_x производится через каждые 10° угла поворота коленчатого вала.

Скорость поршня рассчитывается по следующей формуле:

$$V_n = \omega \cdot R \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right) \text{ м/с}, \quad (4.3)$$

где $\omega = \frac{\pi n}{30}$ - угловая скорость вращения коленчатого вала, рад/с.

$$\omega = 3,14 \cdot 5200/30 = 544,5 \text{ рад/с} \quad (4.3)$$

Средняя скорость поршня:

$$V_{п.ср} = S_n/30 = 0,071 \cdot 5200/30 = 13,25 \text{ м/с} \quad (4.4)$$

Ускорение поршня рассчитывается по следующей формуле:

$$j = \omega^2 R(\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi), \text{ м/с}^2 \quad (4.5)$$

Диаграмма перемещения, скорости и ускорения поршня приведена на плакатах.

Таблица 13 - Кинематический расчет

φ	S_x	$V_{п.сп}$	j
0	0	0	13612,98
10	0,0006964	4,3263954	13266,85
20	0,0027501	8,4338283	12255,8
30	0,006058	12,120544	10658,92
40	0,0104571	15,217408	8598,868
50	0,015737	17,599932	6229,158
60	0,0216557	19,195724	3718,561
70	0,0279568	19,986688	1234,289
80	0,0343861	20,005907	-1074,05
90	0,0407076	19,32975	-3087,93
100	0,0467151	18,066268	-4729,36
110	0,0522402	16,341359	-5965,27
120	0,0571557	14,284385	-6806,49
130	0,0613749	12,014964	-7301,58
140	0,0648463	9,6324399	-7526,44
150	0,0675458	7,2092058	-7571
160	0,0694683	4,7884994	-7524,82
170	0,0706177	2,3867564	-7463,45
180	0,071	1,673E-15	-7437,12
190	0,0706177	-2,3867564	-7463,45
200	0,0694683	-4,7884994	-7524,82
210	0,0675458	-7,2092058	-7571
220	0,0648463	-9,6324399	-7526,44
230	0,0613749	-12,014964	-7301,58
240	0,0571557	-14,284385	-6806,49
250	0,0522402	-16,341359	-5965,27
260	0,0467151	-18,066268	-4729,36
270	0,0407076	-19,32975	-3087,93
280	0,0343861	-20,005907	-1074,05
290	0,0279568	-19,986688	1234,289
300	0,0216557	-19,195724	3718,561
310	0,015737	-17,599932	6229,158
320	0,0104571	-15,217408	8598,868
330	0,006058	-12,120544	10658,92
340	0,0027501	-8,4338283	12255,8
350	0,0006964	-4,3263954	13266,85
360	0	-6,126E-15	13612,98

5 Динамический расчет двигателя работающего на газе

5.1 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма

Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма определяется по формулам ниже:

- масса поршневой группы (для поршня из алюминиевого сплава $m_{п}=80$ кг/м²):

$$m_n = m_n \cdot F_n = 80 \cdot 0,005278 = 0,422 \text{ кг} \quad (5.3)$$

- масса шатуна определяются по формуле (для стального ковального шатуна $m_{ш}=100$ кг/м²):

$$m_{ш} = m_{ш} \cdot F_n = 100 \cdot 0,005278 = 0,527 \text{ кг} \quad (5.4)$$

- масса неуравновешенных частей (для стального ковального вала $m_k=120$ кг/м²):

$$m_k = m_k \cdot F_n = 120 \cdot 0,005278 = 0,633 \text{ кг} \quad (5.5)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца определяются по формуле:

$$m_{ш.п.} = 0,275 \cdot m_{ш} = 0,275 \cdot 0,527 = 0,1451 \text{ кг} \quad (5.6)$$

Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа определяются по формуле:

$$m_{ш.к.} = 0,725 \cdot m_{ш} = 0,725 \cdot 0,527 = 0,382 \text{ кг} \quad (5.7)$$

Массы, совершающие возвратно-поступательное движение определяются по формуле:

$$m_j = m_n + m_{ш.п} = 0,422 + 0,1451 = 0,567 \text{ кг} \quad (5.8)$$

Массы, совершающие вращательное движение определяются по формуле:

$$m_R = m_k + m_{ш.к} = 0,633 + 0,382 = 1,016 \text{ кг} \quad (5.9)$$

5.2 Силы инерции

Силы инерции определяются по формулам ниже:

$$P_j = -m_j j = 0,746 \cdot j \quad (5.10)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна одного цилиндра определяется по формуле:

$$K_{Rш} = -m_{ш.к.} \cdot R \cdot \omega^2 \cdot 10^{-3} = -4027,722 \text{ кН} \quad (5.11)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа определяется по формуле:

$$K_{Rк} = -m_k \cdot R \cdot \omega^2 \cdot 10^{-3} = -6666,5 \text{ кН} \quad (5.12)$$

Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа определяется по формуле:

$$K_R = K_{Rш} + K_{Rк} = -10694,3 \text{ кН} \quad (5.13)$$

5.3 Суммарные силы

Суммарные силы определяются по формулам ниже.

Сила, сосредоточенная на оси поршневого пальца определяется по формуле:

$$P = \Delta P_r + P_j \quad (5.14)$$

Нормальная сила определяется по формуле:

$$N = P \operatorname{tg} \beta \quad (5.15)$$

Сила (кН), действующая вдоль шатуна определяется по формуле:

$$S = P \cdot (1 / \cos \beta) \quad (5.16)$$

Сила (кН), действующая по радиусу кривошипа определяется по формуле:

$$K = P \cdot \cos(\varphi + \beta) / \cos \beta \quad (5.17)$$

Полная тангенциальная сила (кН) определяется по формуле:

$$T = \frac{P \sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta} \quad (5.18)$$

Результаты динамического расчета, двигателя внутреннего сгорания, графически представлены на плакатах.

5.4 Крутящие моменты

Крутящий момент одного цилиндра определяется по формуле:

$$M_{кр.ц} = T \cdot R \quad (5.19)$$

Период изменения крутящего момента четырехтактного двигателя с

равными интервалами между вспышками определяется по формуле:

$$\theta = 720 / i = 720 / 4 = 180^\circ \quad (5.20)$$

Значения крутящих моментов приведены в таблице Б1 (Приложение Б) через каждые 10° ПКВ, также по полученным данным строится кривая $M_{кр.}$ (Н·м).

Средний крутящий момент двигателя определяется по формуле:

- по данным теплового расчета:

$$M_{кр.ц.} = M_i = \frac{M_e}{\eta_M} = 106 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.21)$$

- по площади, заключенной под кривой $M_{кр.}$:

$$M_{кр.ср.} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{M_{кр.i} + M_{кр.i+1}}{2} \right) \cdot 10^\circ}{360^\circ} = 109,01 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.22)$$

Ошибка:

$$\Delta = ((168-161) / 168) * 100 = 3\% \quad (5.23)$$

Максимальный и минимальный крутящие моменты:

$$M_{кр.маx} = 109,01 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (5.24)$$

$$M_{кр.миn} = 100,61 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (5.25)$$

5.5 Расчет сил, действующих на шатунную шейку коленчатого вала

Расчет сил, действующих на шатунную шейку коленчатого вала, приведен

в таблице 15.

Таблица 15 - Результаты расчета сил, действующих на шатунную шейку коленчатого вала

$\varphi, ^\circ$	Полные силы, Н					
	T	K	P _K	$R_{u,u}$	K	K _{Rш}
0	0	-7029	-7029	11057,64	-7725,5	696,2
20	-2842,00	-5890	-6507	10317,22	-6955,3	448,8
40	-3500,17	-2848	-4431	7715,50	-4879,9	448,8
60	-1657,21	-453	-1662	4777,74	-2110,3	448,8
80	1097,67	-131	1058	4301,54	609,5	448,8
100	2920,94	-1475	3133	6230,55	2684,0	448,8
120	3167,55	-3137	4312	7833,95	3862,8	448,8
140	2339,66	-4198	4720	8553,01	4271,3	448,8
160	1166,81	-4597	4719	8704,26	4270,4	448,8
180	0,00	-4669	4669	8697,75	4220,6	448,8
200	-1169,78	-4609	4731	8716,27	4270,4	460,8
220	-2365,42	-4245	4772	8604,51	4271,3	500,7
240	-3265,55	-3234	4445	7962,48	3862,8	582,1
260	-3189,68	-1611	3421	6478,75	2684,0	737
280	-1711,22	-204	1650	4565,08	609,5	1040
300	424,73	-116	-426	4166,10	-2110,3	1684
320	1333,16	-1085	-1688	5283,88	-4879,9	3192
340	98,92	-205	-226	4234,51	-6955,3	6729
360	0,00	10370	10370	6341,70	-7725,5	18096
380	8824,61	18288	20203	16769,31	-6955,3	27159
400	6956,68	5660	8807	7145,36	-4879,9	13687
420	5649,41	1543	5664	6171,75	-2110,3	7775
440	5896,67	-703	5685	7559,88	609,5	5076
460	5990,98	-3025	6425	9254,64	2684,0	3741
480	5068,87	-5019	6899	10370,92	3862,8	3037
500	3434,59	-6163	6929	10754,75	4271,3	2658
520	1604,04	-6320	6488	10472,03	4270,4	2217
540	0,00	-5593	5593	9621,19	4220,6	1372
560	-1227,99	-4838	4967	8951,41	4270,4	696,2
580	-2462,33	-4419	4968	8798,47	4271,3	696,2
600	-3349,36	-3317	4559	8072,66	3862,8	696,2
620	-3151,68	-1592	3380	6443,38	2684,0	696,2
640	-1354,35	-161	1306	4403,17	609,5	696,2
660	1410,39	-385	-1414	4633,56	-2110,3	696,2
680	3304,70	-2689	-4184	7485,80	-4879,9	696,2
700	2733,91	-5666	-6259	10072,20	-6955,3	696,2
720	0	-7029	-7029	11057,64	-7725,5	696,2

Суммарная сила, действующая на шатунную шейку по радиусу кривошипа определяется по следующей формуле:

$$P_k = K + K_{Rш}, Н \quad (5.26)$$

Среднее значение $R_{ш.ш.}$ определяется по развернутой диаграмме определяется по следующей формуле:

$$R_{ш.ш.ср} = \sum_{i=1}^n ((R_{ш.ш.i} + R_{ш.ш.i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 6628 Н \quad (5.27)$$

По полярной диаграмме строится диаграмма износа шатунной шейки. Сумма сил $R_{ш.ш.}$, действующих по каждому лучу диаграммы износа (от 1 до 12), определяется с помощью таблицы 16.

Таблица 16 – Определение суммарных сил, действующих по каждому лучу диаграммы износа шатунной шейки

$R_{ш.ш.i}$	Значения $R_{шш}$ в Н, для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	11058	11058	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11058
10	11053	11053	11053	0	0	0	0	0	0	0	0	11053
20	10317	10317	10317	0	0	0	0	0	0	0	0	10317
30	9166	9166	9166	0	0	0	0	0	0	0	0	9166
40	7715	7715	7715	0	0	0	0	0	0	0	0	7715
50	6152	6152	6152	0	0	0	0	0	0	0	0	6152
60	4778	4778	4778	0	0	0	0	0	0	0	0	4778
70	4055	4055	4055	0	0	0	0	0	0	0	0	4055
80	4302	4302	0	0	0	0	0	0	0	0	4302	4302
90	5193	5193	0	0	0	0	0	0	0	0	5193	5193
100	6231	6231	0	0	0	0	0	0	0	0	6231	6231
110	7143	7143	0	0	0	0	0	0	0	0	7143	7143
120	7834	7834	0	0	0	0	0	0	0	0	7834	7834
130	8292	8292	0	0	0	0	0	0	0	0	8292	8292
140	8553	8553	0	0	0	0	0	0	0	0	8553	8553
150	8671	8671	0	0	0	0	0	0	0	0	8671	8671
160	8704	8704	0	0	0	0	0	0	0	0	8704	8704
170	8702	8702	0	0	0	0	0	0	0	0	8702	8702
180	8698	8698	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8698
190	8705	8705	8705	0	0	0	0	0	0	0	0	8705
200	8716	8716	8716	0	0	0	0	0	0	0	0	8716
210	8699	8699	8699	0	0	0	0	0	0	0	0	8699
220	8605	8605	8605	0	0	0	0	0	0	0	0	8605
230	8377	8377	8377	0	0	0	0	0	0	0	0	8377
240	7962	7962	7962	0	0	0	0	0	0	0	0	7962
250	7328	7328	7328	0	0	0	0	0	0	0	0	7328
260	6479	6479	6479	0	0	0	0	0	0	0	0	6479
270	5493	5493	5493	0	0	0	0	0	0	0	0	5493
280	4565	4565	4565	0	0	0	0	0	0	0	0	4565
290	4033	4033	4033	0	0	0	0	0	0	0	0	4033
300	4166	4166	0	0	0	0	0	0	0	0	4166	4166
310	4758	4758	0	0	0	0	0	0	0	0	4758	4758

320	5284	5284	0	0	0	0	0	0	0	0	5284	5284
330	5250	5250	0	0	0	0	0	0	0	0	5250	5250
340	4235	4235	0	0	0	0	0	0	0	0	4235	4235
350	1708	1708	1708	0	0	0	0	0	0	0	0	1708
360	6342	6342	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6342
370	16304	16304	16304	0	0	0	0	0	0	0	0	16304
380	16769	16769	16769	1676	0	0	0	0	0	0	0	0
390	10179	10179	10179	1017	0	0	0	0	0	0	0	0
400	0	7145	7145	7145	7145	0	0	0	0	0	0	0
410	0	0	0	0	0	0	0	0	6113	6113	6113	6113
420	0	0	0	0	0	0	0	0	6172	6172	6172	6172
430	6745	0	0	0	0	0	0	0	0	6745	6745	6745
440	7560	0	0	0	0	0	0	0	0	7560	7560	7560
450	8442	0	0	0	0	0	0	0	0	8442	8442	8442
460	9255	0	0	0	0	0	0	0	0	9255	9255	9255
470	9911	0	0	0	0	0	0	0	0	9911	9911	9911
480	10371	10371	0	0	0	0	0	0	0	0	10371	10371
490	10641	10641	0	0	0	0	0	0	0	0	10641	10641
500	10755	10755	0	0	0	0	0	0	0	0	10755	10755
510	10765	10765	0	0	0	0	0	0	0	0	10765	10765
520	10472	10472	0	0	0	0	0	0	0	0	10472	10472
530	10048	10048	0	0	0	0	0	0	0	0	10048	10048
540	9621	9621	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9621
550	9203	9203	9203	0	0	0	0	0	0	0	0	9203
560	8951	8951	8951	0	0	0	0	0	0	0	0	8951
570	8918	8918	8918	0	0	0	0	0	0	0	0	8918
580	8798	8798	8798	0	0	0	0	0	0	0	0	8798
590	8535	8535	8535	0	0	0	0	0	0	0	0	8535
600	8073	8073	8073	0	0	0	0	0	0	0	0	8073
610	7373	7373	7373	0	0	0	0	0	0	0	0	7373
620	6443	6443	6443	0	0	0	0	0	0	0	0	6443
630	5371	5371	5371	0	0	0	0	0	0	0	0	5371
640	4403	4403	4403	0	0	0	0	0	0	0	0	4403
650	4029	4029	0	0	0	0	0	0	0	0	4029	4029
660	4634	4634	0	0	0	0	0	0	0	0	4634	4634
670	5948	5948	0	0	0	0	0	0	0	0	5948	5948
680	7486	7486	0	0	0	0	0	0	0	0	7486	7486
690	8925	8925	0	0	0	0	0	0	0	0	8925	8925
700	10072	10072	0	0	0	0	0	0	0	0	10072	10072
710	10806	10806	0	0	0	0	0	0	0	0	10806	10806
720	11058	11058	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11058
$\Sigma R_{u.u.i}$	554183	554183	519417	260373	34094	7145	0	0	0	12285	54196	266464

5.6 Силы, действующие на колено вала

Суммарная сила, действующая на колено вала по радиусу кривошипа определяется по формуле:

$$K_{Pк} = P_{к} + K_{Rк}, H \quad (5.28)$$

Результирующая сила, действующая на колено вала определяется по формуле:

$$R_k = \sqrt{R_{u.u}^2 + K_{Rk}^2} \quad (5.29)$$

5.7 Силы, действующие на коренные шейки

Силы, действующие на коренные шейки, определяются по формулам ниже, расчетные данные сведены в таблицу 26.

Сила, действующая на первую коренную шейку, определяется по формуле:

$$R_{к.ш.1} = -0,5 * R_{k1} \quad (5.30)$$

Сила, действующая на вторую коренную шейку, определяется по формуле:

$$R_{к.ш.2} = \sqrt{T_{k2}^2 + K_{k2}^2}, \quad (5.31)$$

где:

$$T_{k2} = -0.5 \cdot (T_1 + T_2 \cdot \cos \gamma_{k(1-2)} - K_{pk2} \cdot \sin \gamma_{k(1-2)}) = -0.5 \cdot (T_1 + T_2 \cdot \cos 180^\circ - K_{pk2} \cdot \sin 180^\circ) = -0.5 \cdot (T_1 - T_2); \quad (5.32)$$

$$K_{k2} = -0.5 \cdot (K_{pk1} + T_2 \cdot \sin \gamma_{k(1-2)} - K_{pk2} \cdot \cos \gamma_{k(1-2)}) = -0.5 \cdot (T_1 + T_2 \cdot \sin 180^\circ - K_{pk2} \cdot \cos 180^\circ) = -0.5 \cdot (K_{pk1} - K_{pk2}). \quad (5.33)$$

Сила, действующая на третью коренную шейку, определяется по формуле:

$$R_{к.ш.3} = \sqrt{T_{k3}^2 + K_{k3}^2},$$

где:

$$T_{k3} = -0.5 * (T_2 + T_3 * \cos \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} * \sin \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0.5 * (T_2 + T_3 * \cos 0^\circ - K_{pk3} * \sin 0^\circ) * \cos 180 = 0.5 * (T_2 + T_3); \quad (5.34)$$

$$K_{k2} = -0.5 * (K_{pk2} + T_3 * \sin \gamma_{k(2-3)} - K_{pk3} * \cos \gamma_{k(2-3)}) \cos \gamma_{k(1-2)} = -0.5 * (K_{pk2} + T_3 * \sin 0^\circ - K_{pk3} * \cos 0^\circ) * \cos 180^\circ = 0.5 * (K_{pk2} - K_{pk3}). \quad (5.35)$$

Таблица 17 - Расчет сил, действующих на коренные шейки коленчатого вала

1 к.ш	1-ый кривошип			2-ой кривошип			2-ая кор. шейка			3-ий кривошип			3-ая кор. шейка		
	$R_{к.ш1}$	φ_1	T_1, H	K'_{pk1}	φ_2	T_2, H	K'_{pk2} H	T_{k2}, H	K_{k2}, H	$R_{к.ш2}$	φ_3	T_3, H	K'_{pk3}, H	T_{k3}	K_{k3}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
5529	0	0	-5529	0	0	-4811	0	-718	718	0	0	-4349	0	9159	9159
5526	10	-793	-5469	10	-320	-4590	473	-879	998	10	-289	-4343	-609	8933	8954
5159	20	-1421	-4959	20	-614	-4433	807	-526	963	20	-585	-4319	-1199	8752	8834
4583	30	-1760	-4232	30	-928	-4361	832	130	842	30	-887	-4258	-1814	8619	8808
3858	40	-1750	-3438	40	-1231	-4223	519	786	941	40	-1183	-4136	-2414	8360	8701
3076	50	-1411	-2733	50	-1495	-3997	-84	1264	1267	50	-1445	-3931	-2940	7928	8456
2389	60	-829	-2241	60	-1675	-3673	-846	1432	1663	60	-1633	-3631	-3307	7304	8018
2028	70	-131	-2023	70	-1718	-3262	-1587	1239	2013	70	-1697	-3247	-3414	6509	7351
2151	80	549	-2080	80	-1576	-2810	-2125	730	2247	80	-1595	-2820	-3171	5630	6461
2597	90	1101	-2352	90	-1224	-2390	-2325	38	2325	90	-1307	-2415	-2532	4805	5431
3115	10	1460	-2752	100	-677	-2095	-2138	-657	2236	100	-856	-2116	-1533	4211	4481
3572	11	1613	-3187	110	2	-2014	-1611	-1172	1992	110	-311	-1992	-308	4007	4019
3917	12	1584	-3583	120	705	-2207	-879	-1376	1632	120	212	-2072	918	4279	4376
4146	130	1419	-3896	130	1298	-2676	-121	-1220	1226	130	576	-2308	1874	4984	5325
4277	140	1170	-4113	140	1652	-3358	483	-755	896	140	667	-2556	2319	5915	6353
4336	150	882	-4245	150	1682	-4134	800	-111	808	150	454	-2586	2136	6719	7051
4352	160	583	-4313	160	1367	-4847	784	534	948	160	49	-2117	1416	6964	7106
4351	170	289	-4342	170	765	-5348	476	1007	1114	170	-277	-808	488	6156	6176
4349	180	0	-4349	180	0	-5529	0	1180	1180	180	0	3171	0	2358	2358
4353	190	-289	-4343	190	-793	-5469	-503	1126	1234	190	2259	7833	1466	2363	2781
4358	200	-585	-4319	200	-1421	-4959	-836	640	1053	200	4412	7130	2991	2171	3696
4349	210	-887	-4258	210	-1760	-4232	-873	-27	873	210	4047	3086	2288	1146	2559
4302	220	-1183	-4136	220	-1750	-3438	-567	-699	900	220	3478	816	1728	2622	3141
4188	230	-1445	-3931	230	-1411	-2733	34	-1198	1198	230	3019	-475	1608	3208	3589
3981	240	-1633	-3631	240	-829	-2241	804	-1390	1606	240	2825	-1242	1996	3483	4014
3664	250	-1697	-3247	250	-131	-2023	1566	-1224	1988	250	2842	-1816	2711	3839	4700
3239	260	-1595	-2820	260	549	-2080	2144	-740	2268	260	2948	-2365	3497	4445	5656
2747	270	-1307	-2415	270	1101	-2352	2408	-63	2409	270	3026	-2943	4126	5295	6713
2283	280	-856	-2116	280	1460	-2752	2316	636	2402	280	2995	-3527	4456	6279	7699
2017	290	-311	-1992	290	1613	-3187	1924	1194	2264	290	2828	-4069	4441	7256	8507
2083	300	212	-2072	300	1584	-3583	1371	1510	2040	300	2534	-4524	4118	8106	9092
2379	310	576	-2308	310	1419	-3896	842	1588	1797	310	2150	-4866	3569	8762	9461
2642	320	667	-2556	320	1170	-4113	503	1557	1636	320	1717	-5096	2887	9209	9651
2625	330	454	-2586	330	882	-4245	428	1659	1713	330	1271	-5230	2153	9475	9716
2117	340	49	-2117	340	583	-4313	534	2196	2260	340	802	-5174	1385	9487	9588
854	350	-277	-808	350	289	-4342	566	3534	3579	350	372	-5010	661	9352	9375
3171	360	0	3171	360	0	-4349	0	7520	7520	360	0	-4811	0	9159	9159
8152	370	2259	7833	370	-289	-4343	-2548	12176	1243	370	-320	-4590	-609	8933	8954

8385	380	4412	7130	380	-585	-4319	-4997	11449	1249	380	-614	-4433	-1199	8752	8834
5090	390	4047	3086	390	-887	-4258	-4934	7344	8848	390	-928	-4361	-1814	8619	8808
3573	400	3478	816	400	-1183	-4136	-4661	4952	6801	400	-1231	-4223	-2414	8360	8701
3057	410	3019	-475	410	-1445	-3931	-4465	3456	5646	410	-1495	-3997	-2940	7928	8456
3086	420	2825	-1242	420	-1633	-3631	-4457	2389	5057	420	-1675	-3673	-3307	7304	8018
3372	430	2842	-1816	430	-1697	-3247	-4539	1432	4759	430	-1718	-3262	-3414	6509	7351
3780	440	2948	-2365	440	-1595	-2820	-4543	454	4566	440	-1576	-2810	-3171	5630	6461
4221	450	3026	-2943	450	-1307	-2415	-4333	-527	4365	450	-1224	-2390	-2532	4805	5431
4627	460	2995	-3527	460	-856	-2116	-3851	-1411	4101	460	-677	-2095	-1533	4211	4481
4955	470	2828	-4069	470	-311	-1992	-3138	-2077	3763	470	2	-2014	-308	4007	4019
5185	480	2534	-4524	480	212	-2072	-2322	-2452	3377	480	705	-2207	918	4279	4376
5320	490	2150	-4866	490	576	-2308	-1574	-2558	3004	490	1298	-2676	1874	4984	5325
5377	500	1717	-5096	500	667	-2556	-1051	-2539	2748	500	1652	-3358	2319	5915	6353
5382	510	1271	-5230	510	454	-2586	-817	-2644	2768	510	1682	-4134	2136	6719	7051
5236	520	802	-5174	520	49	-2117	-753	-3058	3149	520	1367	-4847	1416	6964	7106
5024	530	372	-5010	530	-277	-808	-649	-4202	4252	530	765	-5348	488	6156	6176
4811	540	0	-4811	540	0	3171	0	-7981	7981	540	0	-5529	0	2358	2358
4602	550	-320	-4590	550	2259	7833	2579	-12423	1268	550	-793	-5469	1466	2363	2781
4476	560	-614	-4433	560	4412	7130	5026	-11563	1260	560	-1421	-4959	2991	2171	3696
4459	570	-928	-4361	570	4047	3086	4975	-7447	8956	570	-1760	-4232	2288	1146	2559
4399	580	-1231	-4223	580	3478	816	4710	-5039	6897	580	-1750	-3438	1728	2622	3141
4268	590	-1495	-3997	590	3019	-475	4514	-3522	5726	590	-1411	-2733	1608	3208	3589
4036	600	-1675	-3673	600	2825	-1242	4499	-2430	5114	600	-829	-2241	1996	3483	4014
3687	610	-1718	-3262	610	2842	-1816	4559	-1447	4783	610	-131	-2023	2711	3839	4700
3222	620	-1576	-2810	620	2948	-2365	4524	-445	4546	620	549	-2080	3497	4445	5656
2685	630	-1224	-2390	630	3026	-2943	4250	553	4286	630	1101	-2352	4126	5295	6713
2202	640	-677	-2095	640	2995	-3527	3673	1432	3942	640	1460	-2752	4456	6279	7699
2014	650	2	-2014	650	2828	-4069	2826	2055	3494	650	1613	-3187	4441	7256	8507
2317	660	705	-2207	660	2534	-4524	1829	2317	2952	660	1584	-3583	4118	8106	9092
2974	670	1298	-2676	670	2150	-4866	852	2191	2351	670	1419	-3896	3569	8762	9461
3743	680	1652	-3358	680	1717	-5096	65	1737	1739	680	1170	-4113	2887	9209	9651
4463	690	1682	-4134	690	1271	-5230	-411	1097	1171	690	882	-4245	2153	9475	9716
5036	700	1367	-4847	700	802	-5174	-565	327	653	700	583	-4313	1385	9487	9588
5403	710	765	-5348	710	372	-5010	-393	-338	518	710	289	-4342	661	9352	9375
5529	720	0	-5529	720	0	-4811	0	-718	718	720	0	-4349	0	9159	9159

По данным таблице 17 строим полярные диаграммы нагрузки на первую, вторую и третью коренные шейки.

По этим диаграммам определяем:

- для 1 (5)-й коренной шейки определяется по формуле:

$$R_{к.ш1ср} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш1i} + R_{к.ш1i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 3929 \quad (5.36)$$

$$R_{к.ш1max} = 5529 H \quad (5.37)$$

$$R_{к.ш1\min} = 3057 H \quad (5.38)$$

- для 2 (4)-й коренной шейки определяется по формуле:

$$R_{к.ш2\text{ср}} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш2i} + R_{к.ш2i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 3397 H \quad (5.38)$$

$$R_{к.ш2\max} = 12492 H \quad (5.39)$$

$$R_{к.ш2\min} = 518 H \quad (5.40)$$

- для 3-й коренной шейки определяется по формуле:

$$R_{к.ш3\text{ср}} = \sum_{i=1}^n ((R_{к.ш3i} + R_{к.ш3i+1}) / 2) * 10^\circ / 720^\circ = 6628 H \quad (5.41)$$

$$R_{к.ш3\max} = 9716 H \quad (5.42)$$

$$R_{к.ш3\min} = 2358 H \quad (5.43)$$

Строим диаграмму износа наиболее нагруженной 3-й шейки в таблице 18.

Таблица 18 - Определение суммарных сил, действующих по каждому лучу диаграммы износа третьей коренной шейки без противовесов

$R_{к.шi}$	Значения $R_{к.шi}, H$, для лучей											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	9159	9159	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9159
10	8954	8954	0	0	0	0	0	0	0	0	8954	8954
20	8834	8834	0	0	0	0	0	0	0	0	8834	8834
30	8808	8808	0	0	0	0	0	0	0	0	8808	8808
40	8701	8701	0	0	0	0	0	0	0	0	8701	8701
50	8456	8456	0	0	0	0	0	0	0	0	8456	8456
60	8018	8018	0	0	0	0	0	0	0	0	8018	8018
70	7351	7351	0	0	0	0	0	0	0	0	7351	7351

80	6461	6461	0	0	0	0	0	0	0	0	6461	6461
90	5431	5431	0	0	0	0	0	0	0	0	5431	5431
100	4481	4481	0	0	0	0	0	0	0	0	4481	4481
110	4019	4019	0	0	0	0	0	0	0	0	4019	4019
120	4376	4376	4376	0	0	0	0	0	0	0	0	4376
130	5325	5325	5325	0	0	0	0	0	0	0	0	5325
140	6353	6353	6353	0	0	0	0	0	0	0	0	6353
150	7051	7051	7051	0	0	0	0	0	0	0	0	7051
160	7106	7106	7106	0	0	0	0	0	0	0	0	7106
170	6176	6176	6176	0	0	0	0	0	0	0	0	6176
180	2358	2358	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2358
190	2781	0	0	0	0	0	0	0	0	2781	2781	2781
200	3696	0	0	0	0	0	0	0	0	3696	3696	3696
210	0	2559	2559	2559	2559	0	0	0	0	0	0	0
220	3141	3141	3141	3141	0	0	0	0	0	0	0	0
230	3589	3589	3589	0	0	0	0	0	0	0	0	3589
240	4014	4014	4014	0	0	0	0	0	0	0	0	4014
250	4700	4700	4700	4700	0	0	0	0	0	0	0	0
260	5656	5656	5656	5656	0	0	0	0	0	0	0	0
270	6713	6713	6713	6713	0	0	0	0	0	0	0	0
280	7699	7699	7699	7699	0	0	0	0	0	0	0	0
290	8507	8507	8507	8507	0	0	0	0	0	0	0	0
300	9092	9092	9092	0	0	0	0	0	0	0	0	9092
310	9461	9461	9461	0	0	0	0	0	0	0	0	9461
320	9651	9651	9651	0	0	0	0	0	0	0	0	9651
330	9716	9716	9716	0	0	0	0	0	0	0	0	9716
340	9588	9588	9588	0	0	0	0	0	0	0	0	9588
350	9375	9375	9375	0	0	0	0	0	0	0	0	9375
360	9159	9159	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9159
370	8954	8954	0	0	0	0	0	0	0	0	8954	8954
380	8834	8834	0	0	0	0	0	0	0	0	8834	8834
390	8808	8808	0	0	0	0	0	0	0	0	8808	8808
400	8701	8701	0	0	0	0	0	0	0	0	8701	8701
410	8456	8456	0	0	0	0	0	0	0	0	8456	8456
420	8018	8018	0	0	0	0	0	0	0	0	8018	8018
430	7351	7351	0	0	0	0	0	0	0	0	7351	7351
440	6461	6461	0	0	0	0	0	0	0	0	6461	6461
450	5431	5431	0	0	0	0	0	0	0	0	5431	5431
460	4481	4481	0	0	0	0	0	0	0	0	4481	4481
470	4019	4019	0	0	0	0	0	0	0	0	4019	4019
480	4376	4376	4376	0	0	0	0	0	0	0	0	4376
490	5325	5325	5325	0	0	0	0	0	0	0	0	5325
500	6353	6353	6353	0	0	0	0	0	0	0	0	6353
510	7051	7051	7051	0	0	0	0	0	0	0	0	7051
520	7106	7106	7106	0	0	0	0	0	0	0	0	7106
530	6176	6176	6176	0	0	0	0	0	0	0	0	6176
540	2358	2358	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2358
550	2781	0	0	0	0	0	0	0	0	2781	2781	2781
560	3696	0	0	0	0	0	0	0	0	3696	3696	3696
570	0	2559	2559	2559	2559	0	0	0	0	0	0	0
580	3141	3141	3141	3141	0	0	0	0	0	0	0	0
590	3589	3589	3589	0	0	0	0	0	0	0	0	3589
600	4014	4014	4014	0	0	0	0	0	0	0	0	4014
610	4700	4700	4700	4700	0	0	0	0	0	0	0	0
620	5656	5656	5656	5656	0	0	0	0	0	0	0	0
630	6713	6713	6713	6713	0	0	0	0	0	0	0	0

640	7699	7699	7699	7699	0	0	0	0	0	0	0	0
650	8507	8507	8507	8507	0	0	0	0	0	0	0	0
660	9092	9092	9092	0	0	0	0	0	0	0	0	9092
670	9461	9461	9461	0	0	0	0	0	0	0	0	9461
680	9651	9651	9651	0	0	0	0	0	0	0	0	9651
690	9716	9716	9716	0	0	0	0	0	0	0	0	9716
700	9588	9588	9588	0	0	0	0	0	0	0	0	9588
710	9375	9375	9375	0	0	0	0	0	0	0	0	9375
720	9159	9159	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9159
$\sum R_{к.ш.и}$	478756	470918	279696	77947	5117	0	0	0	0	12954	171983	405925

5.8 Равномерность крутящего момента и равномерность хода двигателя

Равномерность крутящего момента определяется по формуле:

$$\mu = (M_{кр.маx} - M_{кр.мин}) / M_{кр.ср.} = [499,87 - (201,57)] / 147,93 = 4,74 \quad (5.52)$$

Избыточная работа крутящего момента определяется по формуле:

$$L_{изб} = A \cdot 4 \cdot \pi / (4 \cdot 90) = 13961 \cdot 4 \cdot \pi / 360 = 492,05 \text{ Дж}, \quad (5.53)$$

где $L_{изб}$ - площадь над прямой среднего крутящего момента.

Равномерность хода двигателя принимаем $\delta = 0,015$.

Момент инерции движущихся масс двигателя, приведенных к оси коленчатого вала

$$I_0 = L_{изб} / (\delta \cdot \omega^2) = 492,02 / (0,015 \cdot 544,5^2) = 0,110 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (5.54)$$

6 Безопасность и экологичность бакалаврской работы

6.1 Согласно регламенту "О безопасности колесных транспортных средств" (с изменениями на 14 октября 2015 года), в целях защиты жизни и здоровья человека, имущества, охраны окружающей среды, устанавливаются требования к колесным транспортным средствам в соответствии с пунктом 16 (Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011, О безопасности колесных транспортных средств) независимо от места их изготовления, при их выпуске в обращение и нахождении в эксплуатации на единой таможенной территории Таможенного союза.

6.2 Подразделение транспортных средств категорий М и N и двигателей внутреннего сгорания для таких транспортных средств на экологические классы.

Уровни выбросов и требования, обеспечивающие выполнение установленных уровней выбросов для газовых двигателей регламентируется Правилами ЕЭК ООН N 83-02 (уровень выбросов А).

6.3 Согласно регламенту ТР ТС 018/2011 (раздел 2, позиция 3), оборудование, для питания двигателя работающего на компримированном газе включает:

- баллон газовый, вспомогательное оборудование баллона;
- газоредуцирующая аппаратура;
- теплообменные устройства;
- газосмесительные устройства;
- газодозирующие устройства;
- электромагнитные клапаны;
- расходно-наполнительное и контрольно-измерительное оборудование;
- фильтр газовый;
- гибкие шланги;
- топливопроводы;

- электронные блоки управления.

6.4 Согласно требованиям к транспортным средствам в отношении их внутреннего шума, раздел 2, (Приложение N 3 к техническому регламенту Таможенного союза "О безопасности колесных транспортных средств" (ТР ТС 018/2011)), допустимый уровень звука, для транспортных средств использующих газовое оборудование, не должно превышать значений 77 - 81 дБ А.

6.5 Согласно требованиям к транспортным средствам в отношении содержания вредных (загрязняющих) веществ в воздухе обитаемого помещения (раздел 2, пункт 3), номенклатура вредных (загрязняющих) веществ, подлежащих проверке, зависит от установленного на транспортном средстве типа двигателя и применяемого топлива, содержание вредных (загрязняющих) веществ в воздухе, для двигателя, работающего на комбинированном топливе приведены в таблице 19.

Таблица 19 - Содержание вредных веществ в воздухе

Вредное (загрязняющее) вещество	Предельная концентрация вредного (загрязняющего) вещества в воздухе обитаемого помещения транспортного средства, мг/м ³
оксид углерода CO	5,0
диоксид азота NO ₂	0,2
оксид азота NO	0,4
метан CH ₄	50
углеводороды предельные C ₂ H ₆ C ₇ H ₁₆	50
формальдегид CH ₂ O	0,035

6.6 Согласно ГОСТ Р 17.2.2.06-99, " Охрана природ, Атмосфера, Нормы и методы измерения содержания оксида углерода и углеводородов в отработавших газах газобаллонных автомобилей" (Раздел 4), содержание оксида углерода и углеводородов в отработавших газах автомобилей, работающих на газе, не должно превышать норм, приведенных в таблице 20.

Таблица 20 - Предельно допустимое содержание оксида углерода и углеводородов в отработавших газах автомобилей

Частота вращения КВ	Оксид углерода, объемная доля %, по видам моторного топлива		Углеводороды, объемная доля, млн ⁻¹ по видам моторного топлива и рабочему объему			
	СНГ	СПГ	до 3 дм ³ включительно		свыше 3 дм ³	
			СНГ	СПГ	СНГ	СПГ
n _{min}	3,0	2,0	1000	700	2200	1800
n _{max}	2,0	1,5	600	400	900	750

Газовая система питания газобаллонных АТС должна быть герметична. Не допускается использование на газобаллонных АТС баллонов с истекшим сроком периодического их освидетельствования. В соединениях и элементах системы выпуска отработавших газов не должно быть утечек.

6.7 В разделе "Безопасность и экологичность бакалаврской работы" рассмотрен вопрос о утилизации колесных транспортных средств работающих на композитном газовом топливе.

Настоящий технический регламент Таможенного союза (ТР ТС 00_/2011, о требованиях к колесным транспортным средствам по обеспечению их безопасной утилизации) устанавливает требования к колесным транспортным средствам, их компонентам при выпуске в обращение и нахождении в

эксплуатации на единой таможенной территории Таможенного союза независимо от места их изготовления, процессам утилизации колесных транспортных средств в целях защиты жизни и здоровья человека, имущества, охраны окружающей среды, а также предупреждения действий, вводящих в заблуждение потребителей (пользователей), относительно их назначения и безопасности.

Автомобильный двигатель, работающий на комбинированном газовом топливе, попадает под технические требования регламента ТР ТС 00_/2011, а именно п. 4, п. 5, п. 7, п. 9, п. 11, п. 12, п. 13, Статьи 4, об утилизации колесных транспортных средств, в которых описывается подготовка каждого компонента автомобиля к утилизации, повторного использования, переработки.

Как следует из раздела "Конструкторская часть бакалаврской работы", использование двигателя внутреннего сгорания работающего на комбинированном газовом топливе, позволяет:

- снизить выброс вредных веществ в 2-3 раза;
- снизить уровень шума на 3-8 дБ;
- снизить расход топлива в 2-3 раза;
- повысить технико-экономические показатели систем, обслуживающих двигатель;
- снизить износ двигателя на 15-20%.

Таким образом, разрабатываемый двигатель, работающий на комбинированном газовом топливе, характеризуется улучшенными экологическими показателями, уменьшением выброса вредных веществ в атмосферу, а также такие двигатели попадают под нормы современных требований ЕВРО.

7 Специальная часть

7.1 Сравнительный анализ показателей работы двигателя на природном газе и с добавками к нему.

Проведя расчет четырехцилиндрового двигателя по методике И.И.Вибе, работающего на природном газе, а также с добавкой водорода в 5% и 10% были получены следующие результаты крутящего момента, сведенные в таблицу 21:

Таблица 21 - Результаты расчетов изменения крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала

n, min ⁻¹	Природный газ	Природный газ + 5% H ₂	Природный газ + 10% H ₂
850	102,3	106,1	99,9
1500	105,2	109,12	102,3
2500	108,2	111,4	103,6
4000	107	110,5	104
5200	104,6	106,3	101,1
5600	102,9	103,9	99,8

По результатам расчетов построен график (рисунок 1) зависимости крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала на трёх видах топлива:

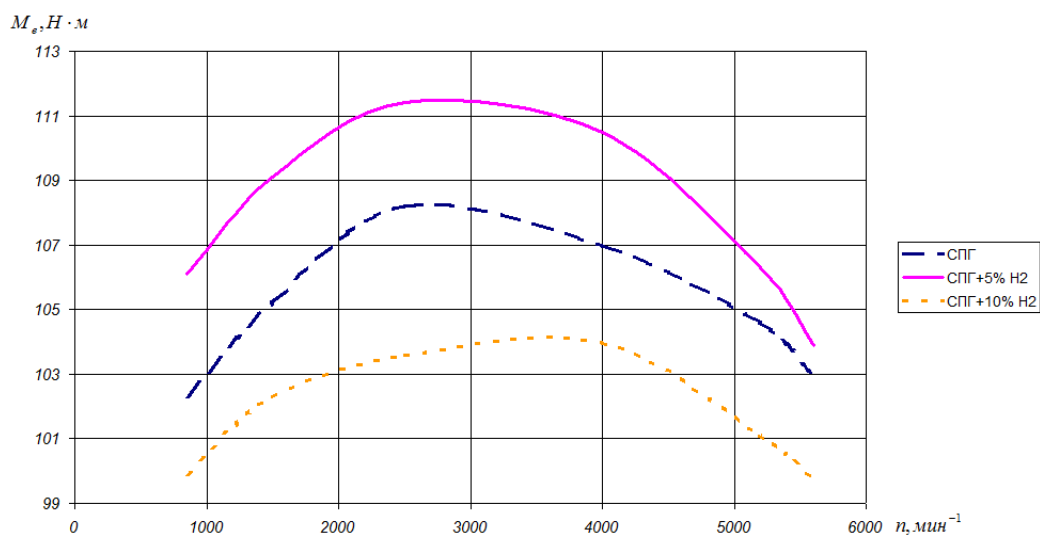


Рисунок 1 – Зависимость изменения $M_{кр}$ от частоты вращения коленчатого вала

Анализируя рисунок 1 можно увидеть что максимальный крутящий момент, получен на природном газе с добавкой водорода на 2500 об/мин и составляет 111,4 Нм. При добавке водорода в 10 % максимальный крутящий момент составил 103,6 Нм, что составляет 92,97 % от природного газа значит падение крутящего момента составило около 7 %. При СПГ- максимальный крутящий момент составил 108,2 Нм., что составляет 97,12 % от добавки водорода в 5 % значит падение составило 2,88 % и 88,3 % от значения крутящего момента при добавке 10% водорода.

Результаты расчетов зависимости мощности от оборотов коленчатого вала сведены в таблице 22 и показаны на графике (рисунок 2).

Таблица 22 – Результаты расчета зависимости мощности от частоты вращения коленчатого вала

n, min-1	Природный газ	Природный газ + 5% H2	Природный газ + 10% H2
850	6,9	8,15	6,65
1500	14,4	17,5	13,82
2500	26,1	32,2	23,22
4000	43,3	49,51	39,78
5200	54,48	59,1	51,41
5600	52,2	56,3	48,3

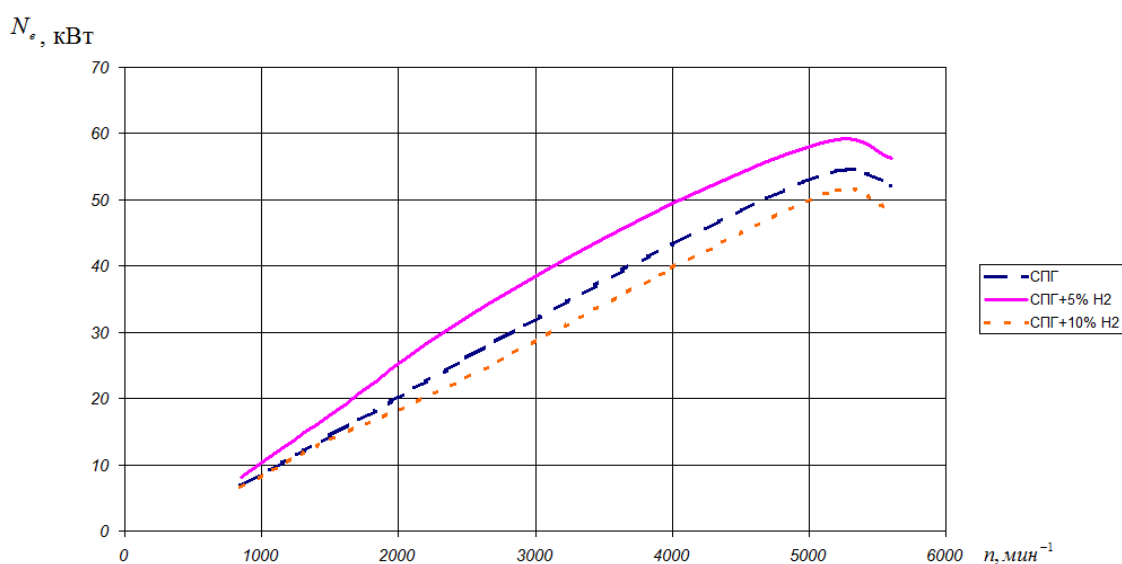


Рисунок 2 –Результаты расчета изменения мощности от частоты вращения коленчатого вала

Максимальная мощность, получена при работе ДВС, на природном газе и составляет 54,48 кВт. При добавке 5% водорода максимальная мощность составила - 59,1 кВт на номинальных оборотах, разница составила 5,7 %, при дальнейшем увеличении добавки водорода до 10% получена максимальная мощность в 51,41 кВт, что падение мощности составило 11,7%.

Расчёты зависимости эффективного удельного расхода топлива от оборотов коленчатого вала сведены в таблицу 23 и показаны на рисунке 3.

Таблица 23 – Результаты расчета зависимости удельного расхода топлива от оборотов коленчатого вала

n, min-1	Природный газ	Природный газ + 5% H2	Природный газ + 10% H2
850	0,335	0,431	0,385
1500	0,311	0,361	0,342
2500	0,263	0,319	0,301
4000	0,246	0,321	0,298
5200	0,325	0,43	0,42
5600	0,373	0,483	0,453

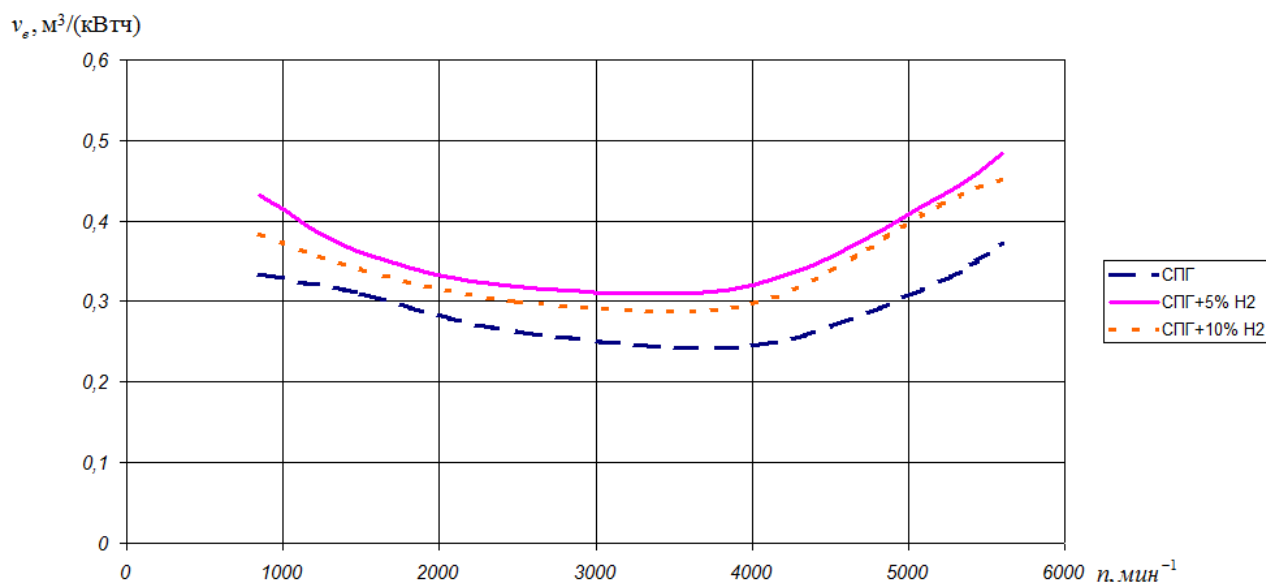


Рисунок 3 – Зависимость эффективного удельного расхода топлива от оборотов коленчатого вала.

Максимальное значение эффективного удельного расхода топлива, получена у природного газа и составляет $0,335 \text{ м}^3/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$.

При добавке водорода в 5%, максимальное значение эффективного удельного расхода топлива составило $0,483 \text{ м}^3/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ на номинальных оборотах, разница составила 24,9 %. При дальнейшем увеличении добавки водорода до 10% получено значение $0,453 \text{ м}^3/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$, что составило 81 % от значения v_e , при добавке водорода в 5% и 61 % от значения v_e , на природном газе.

Расчёты зависимости часового расхода топлива от оборотов коленчатого вала сведены в таблицу 24 и показаны на рисунке 4.

Таблица 24 – Результаты расчета зависимости часового расхода топлива от оборотов коленчатого вала

n, min-1	Природный	5%	10%
850	2,407	3,184	4,4
1500	5,445	7,206	8,9
2500	10,077	13,331	14,78
4000	13,724	18,6	20,4
5200	15,763	20,85	21,9
5600	17,445	21	22,544

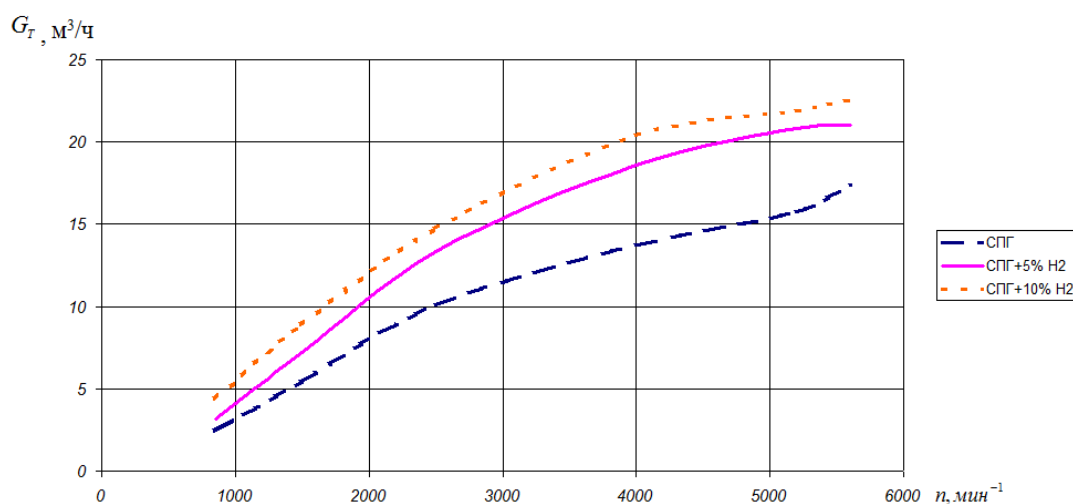


Рисунок 4 – Зависимость часового расхода топлива от оборотов коленчатого вала

Часовой расход топлива имеет максимальное значение для природного газа на номинальном режиме работы и составляет 17,445 м³/ч. При добавке водорода в 5% значение Gt на номинальном режиме составило 21 м³/ч, что соответствует 70 % от максимального значения без добавки. При добавке в 10% максимальное значение часового расхода топлива составило 22,544 м³/ч, что составляет 76,7 % от значения Gt при добавке водорода в 5% и 53,75% от природного газа без добавок.

Расчёты зависимости коэффициента полезного действия от оборотов коленчатого вала сведены в таблицу 25 и показаны на рисунке 5.

Таблица 25 – результаты расчета зависимости коэффициента полезного действия от оборотов коленчатого вала

n, min-1	Природный	5%	10%
850	33,2	40,704	42,779
1500	34,3	41,472	43,8877
2500	35,4	41,27	43,906
4000	34,2	39,62	42,225
5200	32,4	37,677	39,865
5600	28,4	32,9974	35,083

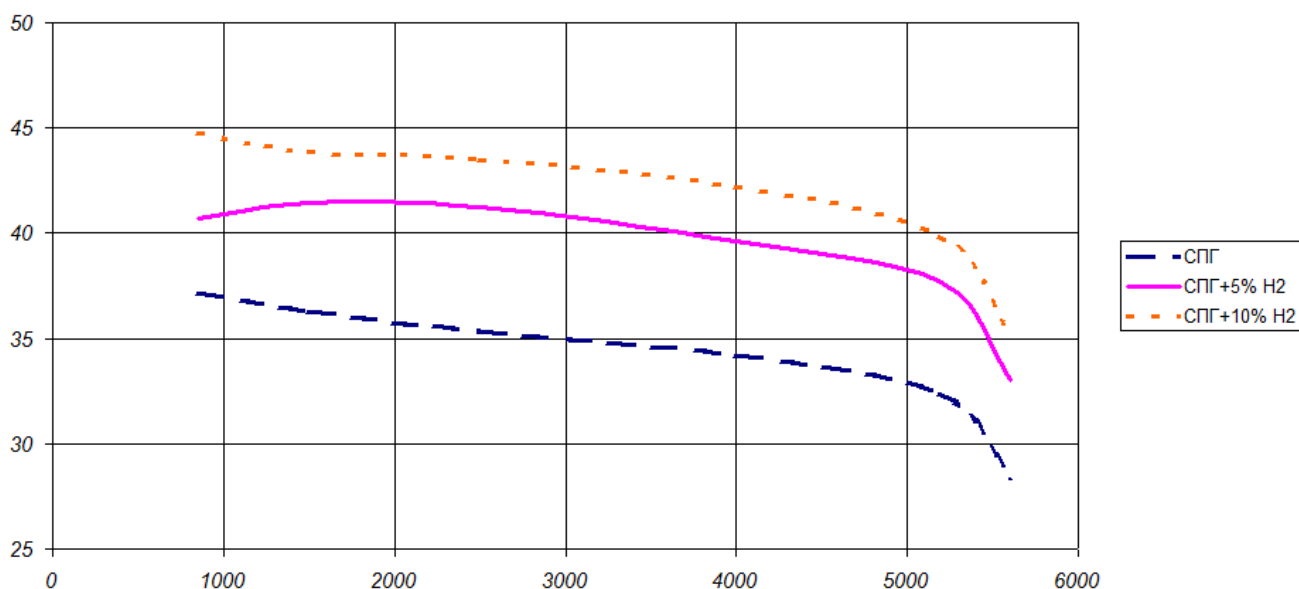


Рисунок 5 – Зависимость КПД от оборотов коленчатого вала.

На графике видно, что максимальное значение КПД достигается на 2500 об/мин при добавке водорода в 10% и составляет около 44%. При добавке водорода в 5% рассчитано, что КПД на 2500 об/мин составляет около 41%, что показывает снижение КПД на 7,5 процентов. КПД двигателя, работающего на сжатом природном газе максимально составляет 35%, значит падение КПД составило 17,4% от максимального КПД при добавке водорода в 5% и 22,5% от максимального КПД при добавке водорода в 10%.

На рисунке, приведенном ниже, идет сравнение распределения масс сгоревшей фракции X_b , а на рисунке 7 сравнения уровня тепловыделения изменяющихся по УП КВ для ДВС, работающего на трех видах топлива, при значениях α соответствующих максимальному уровню сгорания: т.е. $\alpha = 1$ для бензина и $\alpha = 1$ для сжатого природного газа и водорода, а из рисунка 7 видно что, уровень тепло выделения при работе ДВС на бензине выше, чем при работе его на СПГ и давление также в этом случае должно быть при работе на бензине выше, соответственно.

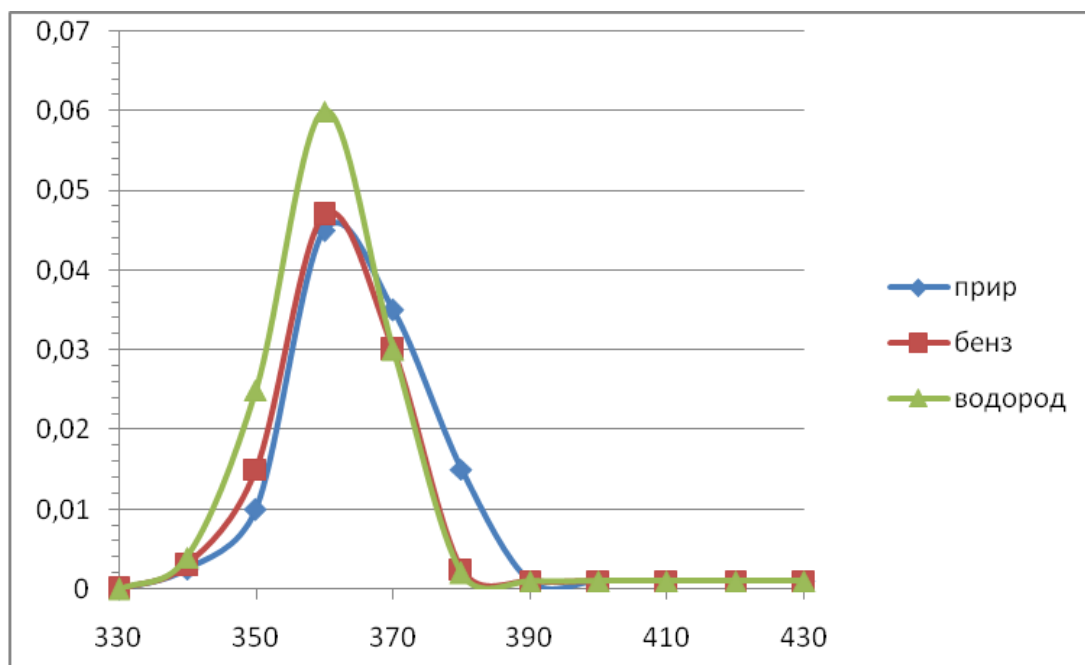


Рисунок 6 – Зависимость КПД от оборотов коленчатого вала.

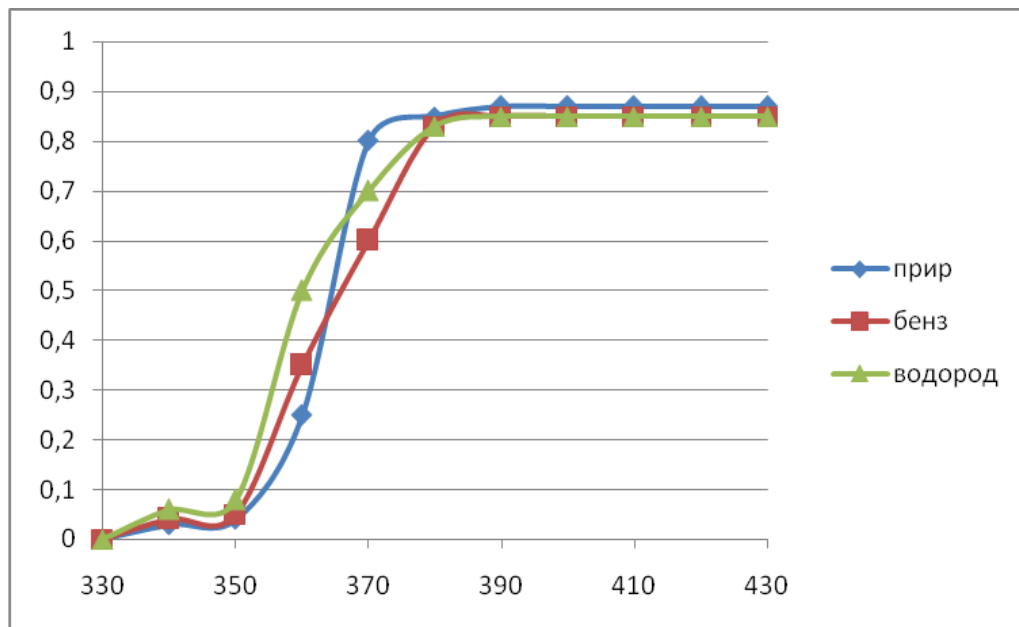


Рисунок 7 - Масса сгоревшей фракции (а) и уровень тепловыделения (б) при работе на бензине и на СПГ при α соответствующем минимальному времени сгорания

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе произведена расчетная оценка возможности использования в качестве топлива природного газа с добавками водорода. По результатам работ были сделаны следующие основные выводы:

- предложено использовать в качестве топлива - композитное газовое топливо;

- спроектирован двигатель на базе двигателя ВАЗ;

- проведены расчеты, показавшие работоспособность двигателя;

- предложенное топливо позволяет в среднем при 10% добавке водорода на 10-15 % уменьшить удельный эффективный расход топлива, при снижении мощности примерно на 10 %, при 5 % добавке водорода – мощность повышается на 5%, увеличивается крутящий момент на 5%.

- эффективный КПД двигателя при использовании предложенного топлива по результатам расчета увеличивается в среднем на 10-15%;

- в разделе экологичность и безопасность работы были рассмотрены технические требования и методы испытаний газового двигателя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Колчин, А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей [Текст]/ Колчин, А.И. Демидов В.П. // Учебное пособие для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Высшая школа 1980. - с.496.
- 2 Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Системы поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] /С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова//. –3-е издание, перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1985. - с.456.
- 3 Ховаха, М.С. Автомобильные двигатели – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] /Под редакцией М.С. Ховаха// М.: Машиностроение, 1977. - с.636.
- 4 Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] /В.П. Алексеев, Н.А. Иващенко и др.; Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова//. –3-е издание, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. - с.528.
- 5 Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] /Д.Н. Вырубов, С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко и др.; Под общей редакцией А.С. Орлина, М.Г. Круглова. –4-е издание, перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1984. – с.384
- 6 Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя [Текст] / В.И. Анурьев// В 3-х т. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. - с.296.
- 7 Вибе, И.И. Уточненный тепловой расчет двигателя [Текст] / И.И. Вибе// М. Машиностроение, 1971. - с.282
- 8 Кузнецов Ю.М. «Охрана труда на предприятиях автомобильного транспорта». М.: Транспорт, 1986.

- 9 Долин П.А. «Справочник по технике безопасности». М.: Энергоатомиздат, 1985.
- 10 Чумаков Л.Л. Курс лекций по дисциплине «Экономика предприятия», 2004
- 11 Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982.
- 12 Кузнецов В.Р., Собольников В.А. “Турбулентность и горение”. М. Наука, 1986.
- 13 Войнов В.В. “Процессы сгорания в двигателях внутреннего сгорания”. М. Наука, 1984.
- 14 Звонов В.А. “Токсичность двигателей внутреннего сгорания”. М. Машиностроение, 1981.
- 15 Nlootat G., et al, “A Model for Converting SI Engine Flame Arrival Signals into Flame Contours”, SAE, SP 1099, №950109, стр. 99-110, 1999.
- 16 Khalighi B., et al, “ Computation and Measurement of Flow and Combustion in a Four-Valve Engine with Intake Variations”, SAE, SP 1101, стр. 147-179, 2001.
- 17 Jones P., et al, “Full Cycle Computational Fluid Dynamics Calculations in a Motored Four Valve Pent Roof Combustion Chamber and Comparison with Experiment”, SAE, SP 1101, №950286, 131-146, 2001.
- 18 Naha, S, Briones, A. M, Aggarwa. Effect of Fuel Blends on Pollutant Emissions in Flames [Text] / Naha, S, Briones, A. M, Aggarwa. Combustion Sciences and Technology. [Thermal Science](#). 2005 – pp. 183- 220.
- 19 Bysveen, M. Engine Characteristics of Emissions and Performance Using Mixtures Natural Gas and Hydrogen [Text] / Bysveen, International Journal Hydrogen Energy. 2007 – pp. 482-489.
- 20 Наканиши К., и др, “Разработка новой системы впуска для четырёхклапанного двигателя, работающего на бедных смесях”, SAE, SP 1097, №95050, стр. 25-43, 1997.
- 21 Хашимото Н., и др, “Разработка низкотоксичной, высокоэффективной камеры сгорания для высокомоощного четырехклапанного двигателя”, SAE, SP 1098, №95068, стр. 347-365, 1998.

- 22 Аносов Ю.М. “Основы отраслевых технологий и организации производства”. С-П., Политехника, 2002.
- 23 Каргин, С.А. Теоретическое обоснование и экспериментальное исследование рабочего процесса судового ДВС с комбинированным смесеобразованием и принудительным воспламенением : канд. техн. наук : 05.08.05 / Каргин Сергей Александрович. – Астрахань, 2006. – 177 с.
- 24 Каменев, В.Ф. Научные основы и пути совершенствования токсических характеристик автомобильных двигателей с искровым зажиганием: Дисс. . докт.техн.наук: 05.04.02 ГНЦ НАМИ / Каменев Владимир Федорович. - Москва, 1996. - 454 с.
- 25 Кутенёв, В.Ф. Комплексное решение проблем снижения выбросов вредных веществ и расхода топлива автомобильными двигателями. Автореф. дисс. докт. техн. наук. 05.04.02 / Кутенёв Вадим Федорович. - М.: МАМИ. - 1990. - 45 с.
- 26 Машиностроение. Энциклопедия : в 40 т. / гл. ред. К.В. Фролов (пред.) и др.— М.: Машиностроение, 2013.- Т. IV-14: Двигатели внутреннего сгорания.- 784с.
- 27 Семенов, Е.С. Исследование турбулентности в цилиндре поршневого двигателя / Е.С. Семенов, А.С. Соколик // Известия АН СССР. – 1958. - № 8. - С. 130-140.
- 28 Смоленская, Н.М. Исследование эффективности рабочего процесса бензиновых двигателей с использованием электропроводности пламени / Н.М. Смоленская, В.В. Смоленский, П.В. Ивашин, А.П. Шайкин // ВНТК "Проведение научных исследований в области машиностроения". 27-28 ноября 2009. Тольятти: Изд-во ТГУ. - 2009. С.244-250.
- 29 Стечкин, Б.С. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя / Б.С. Стечкин, К.И. Генкин, В.С. Золотаревский. – М. : АН СССР, 1960. – 200 с.
- 30 Рахимов, Р.Р. Улучшение показателей двигателей с искровым зажиганием путем интенсификации сгорания бедных смесей : автореферат дис. ... кандидата технических наук / Р. Р. Рахимов. - Волгоград: ВолГТУ, 1999.

ПРИЛОЖЕНИЕ А - Расчет основных деталей двигателя

А1 Расчет поршневой группы

А.1.1 Расчет поршня

Напряжение изгиба в днище поршня:

$$\sigma_{из} = P_{z0} * (r_i / \delta)^2 = 5,47 * (29,8 / 8,2)^2 = 74,1 \text{ МПа}, \quad (\text{A.1})$$

где:

$$r_i = D / 2 - (s + t + \Delta t) = 82 / 2 - (7 + 3,5 + 0,7) = 30,3 \text{ мм}. \quad (\text{A.2})$$

Днище поршня должно быть усилено ребрами жесткости.

Напряжение сжатия в сечении х – х:

$$\sigma_{сжс} = P_{z0} / F_{x-x} = 0,0358 / 0,0012 = 25,2 \text{ МПа}$$

где:

$$P_{z0} = p_{z0} * F_{II} = 5,47 * 52,7834 * 10^{-4} = 0,0358 \text{ МН} \quad (\text{A.3})$$

$$F_{x-x} = (\pi / 4) * (d_k^2 * d_i^2) * -n'_M F' = [(3,14 / 4) * (73,6^2 - 60^2) - 4 * 15] * 10^{-6} = 0,0012 \text{ м}^2 \quad (\text{A.4})$$

$$d_k = D - 2 * (t + \Delta t) = 82 - 2 * (3,5 + 0,7) = 71,6 \text{ мм} \quad (\text{A.5})$$
$$F' = (d_k - d_i) * d_M / 2 = (71,6 - 60) * 3 / 2 = 14 \text{ мм}^2$$

Напряжение разрыва в сечении х - х:

- максимальная угловая скорость холостого хода

$$\omega_{x.x. \max} = \pi * n_{x.x. \max} / 30 = 3,14 * 5200 / 30 = 528 \text{ рад/сжс} \quad (\text{A.6})$$

- масса головки поршня с кольцами, расположенными выше сечения х - х:

$$m_{x.x.} = 0,5 * m_{II} = 0,5 * 0,422 = 0,211 \text{ кг} \quad (\text{A.7})$$

- максимальная разрывающая сила:

$$Pj = m_{x.x.} * R * \omega_{x.x.\text{max}}^2 * (1 + \lambda) = 0,211 * 0,0295 * 528^2 * (1 + 0,3125) * 10^{-6} = 0,00598 \text{ МН}; \quad (\text{A.8})$$

- напряжение разрыва:

$$\sigma_p = Pj / F_{x-x} = 0,00598 / 0,0012 = 3,69 \text{ МПа}. \quad (\text{A.10})$$

Напряжения в верхней кольцевой перемычке:

- среза:

$$\tau = 0,0314 p_{z0} D / h_{II} = 0,0314 * 5,47 * 82 / 3 = 4,44 \text{ МПа} \quad (\text{A.11})$$

- изгиба:

$$\sigma_{uz} = 0,0045 p_{z0} (D / h_{II})^2 = 0,0045 * 5,47 * (82 / 3)^2 = 16,62 \text{ МПа} \quad (\text{A.12})$$

- сложное:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{uz}^2 + 4\tau^2} = 19,67 \text{ МПа} \quad (\text{A.13})$$

Удельное давление поршня на стенку цилиндра:

$$q_1 = N_{\text{max}} / (h_{\text{ю}} * D) = 0,494 \text{ МПа}; \quad (\text{A.14})$$

$$q_2 = N_{\text{max}} / (H * D) = 0,35 \text{ МПа}. \quad (\text{A.15})$$

Диаметры головки и юбки поршня:

$$D_r = D - \Delta_r = 82 - 0,58 = 81,42 \text{ мм}; \quad (\text{A.16})$$

$$D_{ю} = D - \Delta_{ю} = 82 - 0,17 = 81,83 \text{ мм}, \quad (\text{A.17})$$

где :

$$\Delta_{г} = 0,007D = 0,0071 \cdot 82 = 0,56 \text{ мм}; \quad (\text{A.18})$$

$$\Delta_{ю} = 0,002D = 0,0021 \cdot 82 = 0,15 \text{ мм}. \quad (\text{A.19})$$

Диаметральные зазоры в горячем состоянии:

$$\Delta'_{г} = D * [1 + \alpha_{ц}(T_{ц} - T_0)] - D_{г} * [1 + \alpha_{п}(T_{г} - T_0)] = 0,111 \text{ мм}; \quad (\text{A.20})$$

$$\Delta'_{ю} = D * [1 + \alpha_{ц}(T_{ц} - T_0)] - D_{ю} * [1 + \alpha_{п}(T_{ю} - T_0)] = 0,021 \text{ мм}; \quad (\text{A.21})$$

где $T_{ц} = 383 \text{ К}$, $T_{г} = 593 \text{ К}$, $T_{ю} = 413 \text{ К}$ приняты с учетом водяного охлаждения двигателя.

А.1.2 Расчет поршневого кольца

Материал кольца - серый чугун, $E = 1,0 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Среднее давление кольца на стенку цилиндра:

$$P_{cp} = 0,152 * E * \frac{A_0 / t}{(D/t - 1)^3 * (D/t)} = 0,155 \text{ МПа} \quad (\text{A.22})$$

где

$$A_0 = 3t = 3 * 3 = 9 \text{ мм} \quad (\text{A.23})$$

Давление кольца на стенку цилиндра в различных точках окружности:

$$p = p_{cp} * \mu_{к} \quad (\text{A.24})$$

Результаты расчета p , а также $\mu_{к}$ для различных углов φ приведены в таблице 26.

Таблица 26 – Результаты расчета

\ ,град	0	30	60	90	120	150	180
μ_k	1,02	1,08	1,04	0,86	0,42	0,61	2,95
p,МПА	0,162	0,162	0,133	0,146	0,068	0,126	0,453

Напряжение изгиба кольца в рабочем состоянии:

$$\sigma_{из1} = 2,61 * p_{cp} * (D/t - 1)^2 = 225 \text{ МПа.} \quad (\text{A.25})$$

Напряжение изгиба при надевании кольца на поршень:

$$\sigma_{из2} = \frac{4E * (1 - 0,114 * A_0/t)}{m * (D/t - 1,4) * (D/t)} = \frac{4 * 10^5 * (1 - 0,114 * 10,5/3,5)}{1,57 * (82/3,5 * 1,4) * (82/3,5)} = 315 \text{ МПа} \quad (\text{A.26})$$

Монтажный зазор в замке поршневого кольца:

$$\Delta_k = \Delta'_k + \pi D * [\alpha_K (T_K - T_0)] - \alpha_{II} * (T_{II} - T_0) = 0,385 \text{ мм,} \quad (\text{A.27})$$

где $\Delta'_k = 0,08$ мм, $T_{II} = 383$, $T_K = 493$ и $T_0 = 293$ К.

А.1.3 Расчет поршневого пальца

Расчетная сила, действующая на поршневой палец:

- газовая:

$$P_{Z_{max}} = p_{Z_{max}} * F_{II} = 0,0358 \text{ МН;} \quad (\text{A.28})$$

- инерционная:

$$P_j = -m_{II} * R * \omega^2_M * (1 + \lambda) * 10^{-6} = -0,00255 \text{ МН,} \quad (\text{A.29})$$

где

$$\omega_M = \pi * n_M / 30 = 3,14 * 3200 / 30 = 325 \text{ рад/сэж} \quad (\text{A.30})$$

- расчетная:

$$P = P_{Z_{\max}} + k * P_j = 0,0335 \text{ Мн} \quad (\text{A.31})$$

Удельное давление пальца на втулку поршневой головки:

$$q_{iu} = P / (d_{II} * l_{iu}) = 63,6 \text{ МПа} \quad (\text{A.32})$$

Удельное давление пальца на бобышки:

$$q_b = P / (d_{II} * (l_{II} - b)) = 55,2 \text{ МПа} \quad (\text{A.33})$$

Напряжение изгиба в среднем сечении пальца:

$$\sigma_{из} = P(l_{II} + 2b - 1,5l_{iu}) / (1,2(1 - \alpha^4) * d_{II}^3) = 351 \text{ МПа}, \quad (\text{A.34})$$

где

$$\alpha = d_B / d_{II} = 0,652. \quad (\text{A.35})$$

Касательные напряжения среза в сечениях между бобышками и головкой шатуна:

$$\tau = 0,85 * P * (1 + \alpha + \alpha^2) / ((1 - \alpha^4) * d_{II}^2) = 156 \text{ МПа} \quad (\text{A.36})$$

Наибольшее увеличение горизонтального диаметра пальца при оваллизации:

$$\Delta d_{n_{\max}} = \frac{1,35 * P}{E * l_{II}} * \left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^3 * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = 0,049 \text{ мм} \quad (\text{A.37})$$

Напряжения оваллизации на внешней поверхности пальца:

- в горизонтальной плоскости (точки 1, $\psi = 0^\circ$)

$$\sigma_{\alpha 0^\circ} = \frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[0,19 * \frac{(2 + \alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} - \frac{1}{1 - \alpha} \right] * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \frac{15 * 0,0379}{0,06 * 0,022} * \left[0,19 * \frac{(2 + 0,682) * (1 + 0,682)}{(1 - 0,682)^2} - \frac{1}{1 - 0,682} \right] * [0,1 - (0,682 - 0,4)^3] = 175 \text{ МПа} \quad (\text{A.38})$$

- в вертикальной плоскости (точки 3, $\psi = 90^\circ$)

$$\sigma_{\alpha 90^\circ} = \frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[0,174 * \frac{(2 + \alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} + \frac{0,636}{1 - \alpha} \right] * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \frac{15 * 0,0379}{0,06 * 0,022} * \left[0,174 * \frac{(2 + 0,682) * (1 + 0,682)}{(1 - 0,682)^2} + \frac{0,636}{1 - 0,682} \right] * [0,1 - (0,682 - 0,4)^3] = -236 \text{ МПа} \quad (\text{A.39})$$

Напряжения оваллизации на внутренней поверхности пальца:

- в горизонтальной плоскости (точки 2, $\psi = 0^\circ$)

$$\sigma_{i 0^\circ} = -\frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[0,19 * \frac{(1 + 2\alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2 * \alpha} + \frac{1}{1 - \alpha} \right] * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = -\frac{15 * 0,0379}{0,06 * 0,022} * \left[0,19 * \frac{(1 + 2 * 0,682) * (1 + 0,682)}{(1 - 0,682)^2 * 0,682} + \frac{1}{1 - 0,682} \right] * [0,1 - (0,682 - 0,4)^3] = -329 \text{ МПа} \quad (\text{A.40})$$

- в вертикальной плоскости (точки 4, $\psi = 90^\circ$)

$$\sigma_{i 90^\circ} = \frac{15 * P}{l_n * d_n} * \left[0,174 * \frac{(1 + 2\alpha) * (1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2 * \alpha} + \frac{0,636}{1 - \alpha} \right] * [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = \frac{15 * 0,0379}{0,06 * 0,022} * \left[0,174 * \frac{(1 + 2 * 0,682) * (1 + 0,682)}{(1 - 0,682)^2 * 0,682} + \frac{0,636}{1 - 0,682} \right] * [0,1 - (0,682 - 0,4)^3] = 233 \text{ МПа} \quad (\text{A.41})$$

А.2 Расчет шатунной группы

А.2.1 Расчет поршневой головки шатуна

По формулам определяем:

- при изгибе:

$$\beta_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_m} = 0,855 \quad (\text{A.42})$$

$$\frac{(\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma})}{(1 - \beta_{\sigma})} = 4 \quad (\text{A.43})$$

- при растяжении-сжатии:

$$\beta_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1p}}{\sigma_m} = 0,4$$

$$\frac{(\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma})}{(1 - \beta_{\sigma})} = 0,73$$

Расчет сечения I-I:

- максимальное напряжение пульсирующего цикла:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{(m_n + m_{\text{г.з.}}) * \omega_{\text{x.x.max}}^2 * R * (1 + \lambda) * 10^{-6}}{2 * h_z * l_u} = \\ &= \frac{(0,422 + 0,032) * 628 * 0,0375 * (1 + 0,3125) * 10^{-6}}{2 * 0,004 * 0,027} = 40,8 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (\text{A.44})$$

где $m_{\text{г.з.}} = 0,06 * m_{\text{II}} = 0,06 * 0,528 = 0,032 \text{ кг}$ - масса части головки выше сечения I-I;

$$\omega_{\text{x.x.max}} = \pi * n_{\text{x.x.max}} / 30 = 3,14 * 5200 / 30 = 611 \text{ рад/сж}$$

- среднее напряжение и амплитуда напряжений:

$$\sigma_{m0} = \sigma_{a0} = \frac{\sigma_{\max}}{2} = \frac{40,8}{2} = 19 \text{ МПа} \quad (\text{A.45})$$

$$\sigma_{ak0} = \frac{\sigma_{a0} * k_{\sigma}}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = \frac{20,4 * 1,272}{0,85 * 1} = 29 \text{ МПа}, \quad (\text{A.46})$$

где $k_\sigma = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (\sigma_B - 400) = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (800 - 400) = 1,272$ - эффективный коэффициент концентрации напряжений; $\varepsilon_M = 0,85$ - масштабный коэффициент; $\varepsilon_{II} = 1$ - коэффициент поверхностной чувствительности.

Так как $\frac{\sigma_{ak0}}{\sigma_{m0}} = \frac{29}{19} = 1,56 \geq (\beta_\sigma - \alpha_\sigma) / (1 - \beta_\sigma) = 0,69$, то запас прочности в сечении

I-I определяется по пределу усталости:

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1p}}{\sigma_{ak0} + \alpha_\sigma * \sigma_{m0}} = 5,9 \quad (\text{A.47})$$

Напряжения от запрессованной втулки (суммарный натяг)

$$\Delta_\Sigma = \Delta + \Delta_t = 0,0511 \text{ мм},$$

где: $\Delta = 0,04 \text{ мм}$ - натяг посадки бронзовой втулки;

$\Delta_t = d * (\alpha_B - \alpha_\Gamma) * \Delta T = 0,0239 \text{ мм}$ - температурный натяг;

$\Delta T = 110 \text{ К}$ - средний подогрев головки и втулки.

Удельное давление на поверхности соприкосновения втулки с головкой:

$$P = \frac{\Delta_\Sigma}{d * \left[\frac{(d^2 + d_z^2) / (d^2 - d_z^2)^{+\mu}}{E_{III}} + \frac{(d^2 + d_n^2) / (d^2 - d_n^2)^{-\mu}}{E_B} \right]} = \quad (\text{A.48})$$

$$= \frac{0,0611}{24 * \left[\frac{(32^2 + 24^2) / (32^2 - 24^2)^{+0,3}}{2,2 * 10^5} + \frac{(24^2 + 22^2) / (24^2 - 22^2)^{-0,3}}{1,15 * 10^5} \right]} = 21,2 \text{ МПа}$$

где $\mu = 0,3$ - коэффициент Пуассона.

Напряжение от суммарного натяга на внутренней поверхности головки:

$$\sigma'_i = \frac{P * (d_2^2 + d^2)}{d_2^2 - d^2} = 75,9 \text{ МПа} \quad (\text{A.49})$$

Напряжение от суммарного натяга на внешней поверхности головки:

$$\sigma'_a = \frac{P * 2 * d^2}{d_2^2 - d^2} = 53,83 \text{ МПа} \quad (\text{A.50})$$

Расчет сечения А-А на изгиб:

- максимальная сила, растягивающая головку на режиме $n = n_N$

$$P_{jn} = -m_n * R * \omega^2 * (1 + \lambda) = 6936 \text{ Н}, \quad (\text{A.51})$$

где $\omega = \pi * n_N / 30 = 3,14 * 5200 / 30 = 581 \text{ рад/сж}$.

- нормальная сила и изгибающий момент в сечении 0-0:

$$N_{j0} = -P_{jn} * (0,572 - 0,0008 * \varphi_{u.3}) = 3320 \text{ Н}; \quad (\text{A.52})$$

$$M_{j0} = -P_{jn} * r_{cp} * (0,00033 * \varphi_{u.3} - 0,0297) = 0,494 \text{ Н*м}, \quad (\text{A.53})$$

где $\varphi_{u.3} = 105^\circ$ — угол заделки; $r_{cp} = (d_r + d) / 4 = 14 \text{ мм}$ - средний радиус головки;

- нормальная сила и изгибающий момент в расчетном сечении от растягивающей силы:

$$N_{j\varphi_{u.3}} = N_{j0} * \cos \varphi_{u.3} - 0,5 * P_{jn} * (\sin \varphi_{u.3} - \cos \varphi_{u.3}) = 3269 \text{ Н}; \quad (\text{A.54})$$

$$M_{j\varphi_{u.3}} = M_{j0} + N_{j0} * r_{cp} * (1 - \cos \varphi_{u.3}) + 0,5 * P_{jn} * r_{cp} * (\sin \varphi_{u.3} - \cos \varphi_{u.3}) = 0,68 \text{ Н*м} \quad (\text{A.55})$$

Напряжение на внешнем волокне от растягивающей силы:

$$\sigma_{aj} = \left[2 * M_{j\varphi_{u.3.}} * \frac{6 * r_{cp} + h_z}{h_z * (2 * r_{cp} + h_z)} + K * N_{j\varphi_{u.3.}} \right] * \frac{10^{-6}}{l_u * h_z} = 35 \text{ МПа}, \quad (\text{A.56})$$

ГДЕ:

$$\begin{aligned} K &= \frac{E_u * F_z}{E_u * F_z + E_B * F_B} = 0,70; \\ F_z &= (d_z - d) / l_u = 210 \text{ мм}^2; \\ F_B &= (d - d_n) / l_u = 50 \text{ мм}^2. \end{aligned} \quad (\text{A.57})$$

Суммарная сила, сжимающая головку:

$$P_{сж} = (P_{z0} - P_0) * F_n - m_n * R * \omega^2 (\cos \varphi + \lambda * \cos 2\varphi) = 26125 \text{ Н} \quad (\text{A.58})$$

Нормальная сила и изгибающий момент в расчетном сечении от сжимающей силы:

$$N_{сж\varphi_{u.3.}} = P_{сж} * \left[\frac{N_{сж0}}{P_{сж}} + \left(\frac{\sin \varphi_{u.3.}}{2} - \frac{\varphi_{u.3.}}{\pi} * \sin \varphi_{u.3.} - \frac{1}{\pi} * \cos \varphi_{u.3.} \right) \right] = 65,6 \text{ Н}; \quad (\text{A.59})$$

$$M_{сж\varphi_{u.3.}} = P_{сж} * r_{cp} * \left[\frac{M_{сж0}}{P_{сж} * r_{cp}} + \frac{N_{сж0}}{P_{сж}} * (1 - \cos \varphi_{u.3.}) - \left(\frac{\sin \varphi_{u.3.}}{2} - \frac{\varphi_{u.3.}}{\pi} * \sin \varphi_{u.3.} - \frac{1}{\pi} * \cos \varphi_{u.3.} \right) \right] = -0,6 \text{ Н} * \text{м}, \quad (\text{A.60})$$

где:

$$\frac{N_{сж0}}{P_{сж}} = 0,00045 ;$$

$$\frac{M_{сж0}}{P_{сж} * r_{cp}} = 0,00015 ;$$

$$\left(\frac{\sin \varphi_{u.3.}}{2} - \frac{\varphi_{u.3.}}{\pi} * \sin \varphi_{u.3.} - \frac{1}{\pi} * \cos \varphi_{u.3.} \right) = 0,0025 ;$$

$$f(\varphi_{u.3.}) = 1 - \cos \varphi_{u.3.} = 1,158 ;$$

Напряжение на внешнем волокне от сжимающей силы:

$$\sigma_{acc} = \left[2 * M_{сж.ци.з.} * \frac{6 * r_{cp} + h_z}{h_z * (2 * r_{cp} + h_z)} + K * N_{сж.ци.з.} \right] * \frac{10^{-6}}{l_{ш} * h_z} = -4,95 \text{ МПа.} \quad (\text{A.61})$$

Максимальное и минимальное напряжения асимметричного цикла:

$$\sigma_{max} = \sigma'_a + \sigma_{aj} = 83,6 \text{ МПа}; \quad (\text{A.62})$$

$$\sigma_{min} = \sigma'_a + \sigma_{acc} = 49,04 \text{ МПа}. \quad (\text{A.63})$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = 69,48 \text{ МПа}; \\ \sigma_a &= \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = 19,44 \text{ МПа}; \\ \sigma_{ak} &= \frac{\sigma_a * k_\sigma}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = 36,66 \text{ МПа}. \end{aligned} \quad (\text{A.64})$$

Так как $\sigma_{ak} / \sigma_m = 35,63 / 72,47 = 0,492 \leq (\beta_\sigma - \alpha_\sigma) / (1 - \beta_\sigma) = 3,97$, то запас прочности в сечении А-А определяется по пределу текучести:

$$n_{\tau\sigma} = \frac{\sigma_T}{(\sigma_{ak} + \sigma_m)} = 3,98 \quad (\text{A.65})$$

А.2.2 Расчет кривошипной головки шатуна

Максимальная сила инерции:

$$P_{jp} = -R * \omega_{x.x.max}^2 * [(m_n + m_{ш.н.}) * (1 + \lambda) + (m_{ш.к.} - m_{кр})] * 10^{-6} = -0,0135 \text{ МН}, \quad (\text{A.66})$$

где $m_{кр} = 0,25 * m_{ш} = 0,25 * 0,528 = 0,132$ кг.

Момент сопротивления расчетного сечения:

$$W_{из} = \frac{l_k * (0,5 * c_{\sigma} - r_1)^2}{6} = 0,454 * 10^{-7} \text{ м}^3, \quad (\text{A.67})$$

где $r_1 = 0,5 * (d_{ш.ш} + 2 * t_B) = 0,5 * (48 + 2 * 2) = 26 \text{ мм}$ - внутренний радиус кривошипной головки шатуна.

Моменты инерции вкладыша и крышки:

$$\begin{aligned} J_B &= l_k * t_B^3 = 155 * 10^{-12} \text{ м}^4; \\ J &= l_k * (0,5 * c_{\sigma} - r_1)^3 * 10^{-12} = 1256 * 10^{-12} \text{ м}^4; \end{aligned} \quad (\text{A.68})$$

Напряжение изгиба крышки и вкладыша:

$$\sigma_{из} = P_{ip} * \left[\frac{0,023 * c_{\sigma}}{(1 + J_B / J) * W_{из}} + \frac{0,4}{F_2} \right] = 344 \text{ МПа}, \quad (\text{A.69})$$

$$\text{где } F_2 = l_k * 0,5 * (c_{\sigma} - d_{ш.ш.}) = 0,000115 \text{ м}^2 \quad (\text{A.70})$$

A.2.3 Расчет стержня шатуна

Площадь и моменты инерции расчетного сечения В - В:

$$\begin{aligned} F_{cp} &= h_{ш} * b_{ш} - (b_{ш} - a_{ш}) * (h_{ш} - 2 * t_{ш}) = 200 \text{ мм}^2 = 200 * 10^{-6} \text{ м}^2; \\ J_x &= \frac{h_{ш}^3 * b_{ш} - (b_{ш} - a_{ш}) * (h_{ш} - 2 * t_{ш})^3}{12} = 13368 \text{ мм}^2 = 133,7 * 10^{-10} \text{ м}^4; \\ J_y &= \frac{h_{ш} * b_{ш}^3 - (b_{ш} - a_{ш}) * (h_{ш} - 2 * t_{ш})^3}{12} = 5409 \text{ мм}^2 = 541 * 10^{-11} \text{ м}^4. \end{aligned} \quad (\text{A.71})$$

Максимальное напряжение от сжимающей силы: в плоскости шатуна:

$$\sigma_{\max .x} = K_x * P_{cжс} / F_{cp} = 114 \text{ МПа}, \quad (\text{A.72})$$

где

$$K_x = 1 + \left(\sigma_e / \pi^2 E_{uu} \right) * \left(L_{uu}^2 F_{cp} / J_x \right) = 1,032. \quad (\text{A.73})$$

Плоскости, перпендикулярной плоскости качения шатуна:

$$\sigma_{\max .y} = K_y * P_{cжс} / F_{cp} = 1,0206 * 0,02626 / (210 * 10^{-6}) = 128 \text{ МПа},$$

где:

$$K_y = 1 + \left(\sigma_e / \pi^2 E_{uu} \right) * \left(L_1^2 F_{cp} / 4 * J_y \right) = 1,01; \quad (\text{A.74})$$

$$L_1 = L_{uu} - (d + d_1) / 2 = 81,9.$$

Минимальное напряжение от растягивающей силы:

$$\sigma_{\min} = P_p / F_{cp} = -35,7 \text{ МПа}. \quad (\text{A.75})$$

Средние напряжения и амплитуды цикла:

$$\begin{aligned} \sigma_{mx} &= (\sigma_{\max .x} + \sigma_{\min}) / 2 = 42 \text{ МПа}; \\ \sigma_{my} &= (\sigma_{\max .y} + \sigma_{\min}) / 2 = 40,05 \text{ МПа}; \\ \sigma_{ax} &= (\sigma_{\max .x} - \sigma_{\min}) / 2 = 85,9 \text{ МПа}; \\ \sigma_{ay} &= (\sigma_{\max .y} - \sigma_{\min}) / 2 = 83,2 \text{ МПа}; \end{aligned} \quad (\text{A.76})$$

$$\begin{aligned} \sigma_{akx} &= \frac{\sigma_{ax} * k_\sigma}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = 101,2 \text{ МПа}; \\ \sigma_{aky} &= \frac{\sigma_{ay} * k_\sigma}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = 95,5 \text{ МПа}, \end{aligned} \quad (\text{A.77})$$

где:

$$k_\sigma = 1,2 + 1,8 * 10^{-4} * (\sigma_B - 400) = 1,1 \quad (\text{A.78})$$

$$\varepsilon_M = 0,79$$

$\varepsilon_{II} = 1,3$ - определяется с учетом поверхностного упрочнения стержня шатуна обдувкой дробью.

Так как $\sigma_{akx} / \sigma_{mx} = 102,3 / 45,2 = 2,263 \geq (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = 0,73$ и $\sigma_{aky} / \sigma_{my} = 98,3 / 41,7 = 2,36 \geq (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = 0,72$, то запасы прочности в сечении В-В определяются по пределу усталости:

$$\begin{aligned} n_{\sigma x} &= \frac{\sigma_{-1}}{(\sigma_{akx} + \alpha_{\sigma} * \sigma_{mx})} = 1,85 \\ n_{\sigma y} &= \frac{\sigma_{-1}}{(\sigma_{aky} + \alpha_{\sigma} * \sigma_{my})} = 1,99 \end{aligned} \quad (A.79)$$

А.2.4 Расчет шатунных болтов

Сила предварительной затяжки:

$$P_{IP} = 2 * P_{jp} / i_{\sigma} = 0,0135 \text{ МН} \quad (A.82)$$

Суммарная сила, растягивающая болт:

$$P_{\sigma} = P_{IP} + \chi * P_{jp} / i_{\sigma} = 0,0155 \text{ МН}, \quad (A.83)$$

где $\chi = 0,2$.

Максимальные и минимальные напряжения, возникающие в болте:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= 4 * P_{\sigma} / (\pi * d_B^2) = 256 \text{ МПа}; \\ \sigma_{\min} &= 4 * P_{IP} / (\pi * d_B^2) = 250 \text{ МПа}; \end{aligned} \quad (A.84)$$

Среднее напряжение и амплитуды цикла:

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = 255 \text{ МПа} \\ \sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = 11 \text{ МПа} \\ \sigma_{ak} &= \frac{\sigma_a * k_\sigma}{\varepsilon_M * \varepsilon_n} = 34 \text{ МПа}\end{aligned}\tag{A.85}$$

где $k_\sigma = 1 + q * (\alpha k_\sigma - 1) = 3,2$; $\alpha k_\sigma = 3,5$; $q = 0,75$ при $\sigma_B = 950$ МПа; $\varepsilon_M = 0,85$ при $d = 10$ мм; $\varepsilon_n = 0,75$ (грубое обтачивание).

Так как $\sigma_{ak} / \sigma_m = 0,195 \leq (\beta_\sigma - \alpha_\sigma) / (1 - \beta_\sigma) = 0,295$, то запас прочности в сечении А-А определяется по пределу текучести:

$$n_{\tau\sigma} = \frac{\sigma_T}{(\sigma_{ak} + \sigma_m)} = 2,3\tag{A.86}$$

А.3 Расчет коленчатого вала

Напряжения при изгибе:

$$\beta_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_m} = 0,45$$

$$\frac{(\beta_\sigma - \alpha_\sigma)}{(1 - \beta_\sigma)} = 0,15$$

Напряжения при кручении:

$$\beta_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_m} = 0,709 ;$$

$$\frac{(\beta_\tau - \alpha_\tau)}{(1 - \beta_\tau)} = \frac{0,719 - 0,6}{1 - 0,719} = 0,40.$$

А.3.1 Удельное давление на поверхности шеек

Шатунных шеек:

$$\begin{aligned}k_{\text{ШШСР}} &= \frac{R_{\text{ШШСР}}}{d_{\text{ШШ}} * l'_{\text{ШШ}}} = 8,4 \text{ МПа}; \\k_{\text{ШШ max}} &= \frac{R_{\text{ШШ max}}}{d_{\text{ШШ}} * l'_{\text{ШШ}}} = 19 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{A.87}$$

где $l'_{\text{ШШ}} \approx l_{\text{ШШ}} - 2 * r_{\text{гал}} = 28 - 2 * 3 = 22 \text{ мм}$; - рабочая ширина шатунного вкладыша;
 $r_{\text{гал}}$ - радиус галтели принят равным 3 мм.

Коренных шеек:

$$\begin{aligned}k_{\text{КШСР}} &= \frac{R_{\text{КШСР}}}{d_{\text{КШ}} * l'_{\text{КШ}}} = 1,67 \text{ МПа}; \\k_{\text{КШ max}} &= \frac{R_{\text{КШ max}}}{d_{\text{КШ}} * l'_{\text{КШ}}} = 13,9 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{A.88}$$

где $l'_{\text{КШ}} \approx l_{\text{КШ}} - 2 * r_{\text{гал}} = 28 - 2 * 3 = 22 \text{ мм}$; - рабочая ширина коренного вкладыша.

А.3.2 Расчет коренной шейки

Момент сопротивления кручению коренной шейки:

$$W_{\text{кш}} = \frac{\pi}{16} * d_{\text{кш}}^3 = 23,5 * 10^{-6} \text{ м}^3\tag{A.89}$$

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла:

$$\begin{aligned}\tau_{\text{max}} &= \frac{M_{\text{КШ max}}}{W_{\text{кш}}} = 19,4 \text{ МПа}; \\ \tau_{\text{min}} &= \frac{M_{\text{КШ min}}}{W_{\text{кш}}} = -6,2 \text{ МПа}.\end{aligned}\tag{A.90}$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned}\tau_m &= \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = 5,1 \text{ МПа}; \\ \tau_a &= \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = 13,3 \text{ МПа}; \\ \tau_{ak} &= \frac{\tau_a * k_\tau}{\varepsilon_{M\tau} * \varepsilon_{n\tau}} = 17,2 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{A.91}$$

где $k_\sigma = 0,6 * [1 + q * (\alpha_{\kappa\tau} - 1)] = 1,1$ - коэффициент концентрации напряжений;

$\alpha_{\kappa\sigma} = 3,0$ - теоретический коэффициент концентрации напряжений;

$q = 0,4$ - коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений;

$\varepsilon_{M\tau} = 0,72$ - масштабный коэффициент;

$\varepsilon_{n\tau} = 1,2$ - коэффициент поверхностной чувствительности.

Так как $\tau_{ak} / \tau_m = 18,2 / 6,1 = 2,98 \geq (\beta_\tau - \alpha_\tau) / (1 - \beta_\tau) = 0,35$, то запас прочности коренной шейки определяется по пределу усталости:

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{ak} + \alpha_\tau * \tau_m} = 4,8\tag{A.92}$$

А.3.3 Расчёт шатунной шейки

Момент сопротивления кручению шатунной шейки:

$$W_{\text{шш}} = \frac{\pi}{16} * d_{\text{шш}}^3 = 20,7 * 10^{-6} \text{ м}^3\tag{A.93}$$

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла:

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \frac{M_{\text{III max}}}{W_{\text{III}}} = 24,3 \text{ МПа}; \\ \tau_{\min} &= \frac{M_{\text{III min}}}{W_{\text{III}}} = -5,9 \text{ МПа}.\end{aligned}\tag{A.94}$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned}\tau_m &= \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = 8,5 \text{ МПа}; \\ \tau_a &= \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = 15,2 \text{ МПа}; \\ \tau_{\text{ак}} &= \frac{\tau_a * k_\tau}{\varepsilon_{M\tau} * \varepsilon_{n\tau}} = 17,5 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{A.95}$$

где $k_\tau = 0,6 * [1 + q * (\alpha_{\kappa\tau} - 1)] = 1,1$ - коэффициент концентрации напряжений;

$\alpha_{\kappa\sigma} = 3,0$ - теоретический коэффициент концентрации напряжений;

$q = 0,4$ - коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений;

$\varepsilon_{M\tau} = 0,73$ - масштабный коэффициент;

$\varepsilon_{n\tau} = 1,2$ - коэффициент поверхностной чувствительности.

Так как $\tau_{\text{ак}} / \tau_m = 16,1 / 9,3 = 1,73 \geq (\beta_\tau - \alpha_\tau) / (1 - \beta_\tau) = 0,35$, то запас прочности в шатунной шейки определяется по пределу усталости:

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{\text{ак}} + \alpha_\tau * \tau_m} = 5\tag{A.96}$$

Максимальное и минимальное нормальные напряжения асимметричного цикла шатунной шейки:

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \frac{M_{\varphi_M \max}}{W_{\sigma III}} = 0,55 \text{ МПа}, \\ \sigma_{\min} &= \frac{M_{\varphi_M \min}}{W_{\sigma III}} = 21,5 \text{ МПа},\end{aligned}\tag{A.97}$$

где $W_{\sigma_{\text{шш}}} = 0,5 * W_{\text{шш}} = 9,65 * 10^{-6} \text{ м}^3$.

Среднее напряжение и амплитуда цикла:

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = -9,9 \text{ МПа} \\ \sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = 10,6 \text{ МПа} \\ \sigma_{\text{ак}} &= \frac{\sigma_a * k_\sigma}{\varepsilon_{M\sigma} * \varepsilon_{n\sigma}} = 21,5 \text{ МПа}\end{aligned}\tag{A.98}$$

где $k_\sigma = 1 + q * (\alpha k_\sigma - 1) = 1,5$ - коэффициент концентрации напряжений

$$\alpha k_\sigma = 3,0;$$

$$\varepsilon_{M\sigma} = 0,76 \text{ - масштабный коэффициент;}$$

$\varepsilon_{n\sigma} = 1,2$ - коэффициент поверхностной чувствительности, определен при расчете коренной шейки.

Запас прочности шатунной шейки от нормальных напряжений определяется по пределу усталости:

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\text{ак}} + \alpha_\tau * \sigma_m} = 7,55\tag{A.99}$$

Общий запас прочности шатунной шейки:

$$n_{\text{шш}} = \frac{n_\sigma * n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} = 4,1\tag{A.100}$$

А.3.4 Расчёт щеки

Максимальный и минимальный моменты, скручивающие щёку:

$$\begin{aligned}
M_{к.щ.маx} &= T_{маx} * 0,5 * (l_{к.щ.} + h) = 52,32H * M; \\
M_{к.щ.миn} &= T_{миn} * 0,5 * (l_{к.щ.} + h) = -85.66H * M;
\end{aligned}
\tag{A.101}$$

Максимальное и минимальное касательные напряжения знакопеременного цикла щеки:

$$\begin{aligned}
\tau_{маx} &= \frac{M_{к.щ.маx}}{W_{щ}} = 6,5МПа; \\
\tau_{миn} &= \frac{M_{к.щ.миn}}{W_{щ}} = -11МПа;
\end{aligned}
\tag{A.102}$$

где $W_{щ} = \mu * b * h^2 = 5,9 * 10^{-6} м^3$ - момент сопротивления щеки.

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\begin{aligned}
\tau_m &= \frac{\tau_{маx} + \tau_{миn}}{2} = -2,5МПа \\
\tau_a &= \frac{\tau_{маx} - \tau_{миn}}{2} = 9МПа \\
\tau_{ак} &= \frac{\tau_a * k_\tau}{\varepsilon_{M\tau} * \varepsilon_{n\tau}} = 12,3МПа
\end{aligned}
\tag{A.103}$$

где $k_\tau = 0,7$ - коэффициент концентрации напряжений;

$\varepsilon_{M\tau} = 0,64$ - масштабный коэффициент;

$\varepsilon_{n\tau} = 0,75$ - коэффициент поверхностной чувствительности

Запас прочности щеки от касательных напряжений определяем по пределу усталости:

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{ак} + \alpha_\tau * \tau_m} = 7,5
\tag{A.104}$$

Максимальное и минимальное нормальные напряжения щеки:

$$P_{u, \max} = \frac{K_{\max} + K_R}{2} = 4956 \text{ H},$$

$$P_{u, \min} = \frac{K_{\min} + K_R}{2} = -11126 \text{ H},$$
(A.105)

$$M_{u, \max} = 0,25 * (K_{\max} + K_R + 2 * (-P'_{\text{ПП}})) * l_{\text{ку}} = 175 \text{ Hм}$$

$$M_{u, \min} = 0,25 * (K_{\min} + K_R + 2 * (-P'_{\text{ПП}})) * l_{\text{ку}} = -75,8 \text{ Hм}$$
(A.106)

$$\sigma_{\Sigma \max} = \frac{M_{u, \max}}{W_{\sigma u}} + \frac{P_{u, \max}}{F_u} = 43,5 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\Sigma \min} = \frac{M_{u, \min}}{W_{\sigma u}} + \frac{P_{u, \min}}{F_u} = -22,25 \text{ МПа},$$
(A.107)

где $W_{\sigma u} = \frac{b * h^2}{6} = 4,21 * 10^{-6} \text{ м}^3$,

$$F_u = b * h = 1250 * 10^6 \text{ м}^2 .$$

Среднее напряжение и амплитуды напряжений:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = 9,58 \text{ МПа}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = 32,5 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{ак}} = \frac{\sigma_a * k_{\sigma}}{\varepsilon_{M\sigma} * \varepsilon_{n\sigma}} = 75,6 \text{ МПа}.$$
(A.108)

где $k_{\sigma} = 1 + q * (\alpha k_{\sigma} - 1) = 1,1$ - коэффициент концентрации напряжений:

$$\alpha k_{\sigma} = 1,4$$

$\varepsilon_{M\sigma} = 0,7$ - масштабный коэффициент;

$\varepsilon_{n\sigma} = 0,75$ - коэффициент поверхностной чувствительности, определен при расчете коренной шейки.

Так как $\sigma_{\text{ак}} / \sigma_m = 6,5 \geq (\beta_{\sigma} - \alpha_{\sigma}) / (1 - \beta_{\sigma}) = 0,15$, то запас прочности щеки от

нормальных напряжений определяется по пределу усталости:

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{ак} + \alpha_{\tau} * \sigma_m} = 1,6 \quad (\text{A.109})$$

Общий запас прочности шатунной шейки:

$$n_{шш} = \frac{n_{\sigma} * n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} = 1,76 \quad (\text{A.110})$$

А.4 Расчёт газораспределения двигателя

А.4.1 Основные размеры проходных сечений в горловине и в клапане

Площадь проходного сечения клапана при максимальном подъеме:

$$F_{кл} = V_{н.ср} F_n / (i_{кл} \omega_{вн}) = 3,25 \text{ см}^2 \quad (\text{A.111})$$

Диаметр горловины клапана:

$$d_{гор} = \sqrt{4F_{гор} / \pi} = 2,35 \text{ см}, \quad (\text{A.112})$$

где $F_{гор} = 1,12 F_{кл} = 4,2 \text{ см}^2$.

Из условия возможного размещения клапанов в головке при верхнем их расположении принимаем $d_{гор} = 25 \text{ мм}$;

Максимальная высота подъема клапана при угле фаски клапана $\alpha=45^{\circ}$:

$$h_{кл\max} = \sqrt{4,93d_{гор}^2 + 4,44F_{кл}} / 2,22 - d_{гор} = 5,3 \text{ мм}. \quad (\text{A.113})$$

А.4.2 Определение перемещения клапана

Зазор между клапаном и толкателем принимаем $\Delta s = 0,25$ мм

Протяженность участка сбega:

$$\Phi_0 = \frac{\pi^2 \Delta s}{2 \cdot 180 \cdot \omega'_{m0\kappa}} = 0,3425854 \text{ рад} \approx 19^{\circ} 43', \quad (\text{A.114})$$

где $\omega'_{m0\kappa} = 0,02 \text{ мм/}^0$ - скорость клапана в конце сбega, принята в пределах, рекомендованных для безударных кулачков

Протяженность других участков ускорения клапана $\Phi_1 = 23^{\circ} 30' = 0,410152$ рад; $\Phi_2 = 4^{\circ} = 0,069753$ рад; $\Phi_3 = 37^{\circ} = 0,645771$ рад удовлетворяет рекомендуемым соотношениям:

$$1) \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = \pi \varphi_{p0} / 180 \Rightarrow \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 - \pi \varphi_{p0} / 180 = 0;$$

где $\varphi_{p0} = (\varphi_{np} + 180^{\circ} + \varphi_{zn}) / 4 = 63,5^{\circ}$

$$0,410152 + 0,069753 + 0,645771 - 3,14 \cdot 64,5 / 180 = 0$$

$$2) \Phi_2 = (0,1 \dots 0,25) \Phi_3 \Rightarrow \Phi_2 / \Phi_3 = 0,1 \dots 0,25;$$

$$0,069753 / 0,645771 = 0,108;$$

$$3) \Phi_2 + \Phi_3 = (1,5 \dots 3,0) \Phi_1 \Rightarrow (\Phi_2 + \Phi_3) / \Phi_1 = 1,5 \dots 3,0;$$

$$(0,069753 + 0,645771) / 0,410152 = 1,65.$$

Вспомогательные величины и коэффициенты закона движения клапана:

$$\begin{aligned} k_1 &= 8Z \left(\frac{\Phi_2}{\pi} \right)^2 = 0,0025 \\ k_2 &= \frac{5+Z}{6} \Phi_3^2 = 0,33 \\ k_3 &= \frac{4+Z}{3} \Phi_3 = 1,01 \end{aligned} \quad (\text{A.115})$$

$$K_1 = k_1 + k_2 + k_3 \Phi_2 = 0,45 \quad (\text{A.116})$$

$$K_2 = k_3 + 4Z \frac{\Phi_2}{\pi} = 1,15 ,$$

где $Z = 5/8$ - принято по рекомендациям для кулачка Курца:

$$c_{11} = \frac{K_1 \omega''_{m0\kappa} + K_2 h_{m\max}}{2K_1 + K_2 \Phi_1} = 6,63 , \quad (\text{A.117})$$

где $\omega''_{m0\kappa} = \omega'_{m0\kappa} \cdot 180 / \pi = 1,5$;

$$c_{12} = (c_{11} - \omega''_{m0\kappa}) \frac{\Phi_1}{\pi} = 0,63 \quad (\text{A.118})$$

$$c_{32} = (2c_{11} - \omega''_{m0\kappa}) / K_2 = 9,5$$

$$c_{21} = c_{32} k_3 = 11,5$$

$$c_{22} = c_{32} k_1 = 0,01$$

$$c_{31} = c_{32} \frac{1-Z}{6\Phi_3^2} = 1,4$$

$$c_{33} = c_{32} k_2 = 4,02$$

Подъем (перемещение) клапана по углу поворота кулачка φ_{κ} (распределительного вала φ_p):

$$h_0 = \Delta s \left(1 - \cos \frac{\pi}{2\Phi_0} \varphi_{\kappa 0} \right); \quad \varphi_{\kappa 0} = 0^\circ - 19^\circ 38'; \quad (\text{A.119})$$

$$h_0 = 0,25 \left(1 - \cos \frac{3,14159}{2 \cdot 0,342694} \varphi_{\kappa 0} \right) = 0,25 (1 - \cos 4,583666 \varphi_{\kappa 0})$$

$$h_1 = \Delta s + c_{11} \varphi_{\kappa 1} - c_{12} \sin \frac{\pi}{\Phi_1} \varphi_{\kappa 1}; \quad \varphi_{\kappa 1} = 0^\circ - 25^\circ;$$

$$h_1 = 0,25 + 7,0069124 \varphi_{\kappa 1} - 0,765185 \sin \frac{3,14159}{0,410152} \varphi_{\kappa 1};$$

при $\varphi_{\kappa 1} = \varphi_{\kappa 1\kappa} = 23^\circ 30' = 0,410152$ рад

$$h_{1k} = 3,1238972 \text{ мм};$$

$$h_2 = h_{1k} + c_{21}\varphi_{k2} + c_{22} \sin \frac{\pi}{2\Phi_2} \varphi_{k2}; \varphi_{k2} = 0^0 - 8^0;$$

$$h_2 = 3,1238971 + 12,264968 \varphi_{k2} + 0,026796 \sin \frac{3,14159}{2 \cdot 0,069813} \varphi_{k2};$$

при $\varphi_{k2} = \varphi_{k2k} = 4^0 = 0,069813 \text{ рад}$

$$h_{2k} = 4,006948768 \text{ мм};$$

$$h_3 = h_{2k} + c_{31}(\Phi_3 - \varphi_{k3})^4 - c_{32}(\Phi_3 - \varphi_{k3})^2 + c_{33}; \varphi_{k3} = 0^0 - 37^0;$$

$$h_3 = 4,0069487 + 1,626570 \cdot (0,645771 - \varphi_{k3})^4 - 10,853003 \cdot (0,645771 - \varphi_{k3})^2 + 4,243047 ;$$

при $\varphi_{k3} = \varphi_{k3k} = 37^0 = 0,645771 \text{ рад}$

$$h_{3k} = 8,24995 = 8,25 \text{ мм} = h_{кл \text{ макс}} + \Delta s$$

Таблица 27- Перемещение клапана

φ_p°	Φ_i°	φ_k°	$h, \text{мм}$	φ_p°	Φ_i°	φ_k°	$h, \text{мм}$
331°22'	$\Phi_0=19^{\circ}38'$	0	0	61°30'	$\Phi_2=37^{\circ}$	30	8,1
336°22'		5	0,021	71°30'		20	7,5
34Г22'		10	0,0765	81°30'		10	6
346°22'		15	0,1387	85°30'		5	5,03
350		19°38'	0,254	90		2°30'	4,3
350	$\Phi_1=23^{\circ}30'$	0	0,15	90	2°30'	4,6	
355		5	0,487	91°30'	4	4,5	
366		9	0,667	93°30'	$\Phi_2=4^{\circ}$	2	4,01
7		15	1,390	95°30'		0	3,53
12		20	2,351	97°30'		23,5	3,2
14°30'		23,5	3,224	97°30'	$\Phi_1=23^{\circ}30'$	23°30"	3,21
14°30'	$\Phi_2=4^{\circ}$	0	3,524	100		20	2,33
16°30'		2	3,31	106		15	1,4
18°30'		4	4,05	111		9	0,66
18°30'	$\Phi_2=37^{\circ}$	0	4,5	115		5	0,33
23°30'		5	5,1	120	0	0,26	
28°30'		10	6	120	$\Phi_0=19^{\circ}38'$	19°38'	0,25
38°30'		20	7,1	124°38'		15	0,1934
48°30'		30	8,2	129°38'		10	0,074
55°30'	37	8,1	134°38'	5		0,06	
0		37	8,250	139°38'		0	0

А.4.3 Определение время-сечения клапана газодинамическим методом

Диаграмма подъема толкателя является диаграммой подъема клапана. Один градус поворота распределительного вала равен:

$$1_p^0 = 1/(6 \cdot n_p) = 5,1 \cdot 10^{-5} \text{ с.} \quad (\text{A.120})$$

Значит время-сечение клапана:

$$\int_{t_1}^{t_2} F_{\text{кл}} dt = F_{\text{кл}}(t_2) - F_{\text{кл}}(t_1) = 1,3 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}, \quad (\text{A.121})$$

где $F_{\text{кл}}(t_1)$ - время-сечение в момент начала такта впуска, а $F_{\text{кл}}(t_2)$ - в конце.

Средняя площадь проходного сечения клапана:

$$F_{\text{клср}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F_{\text{кл}} dt}{t_2 - t_1} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F_{\text{кл}} dt}{(\varphi_2 - \varphi_1) \cdot 1_p^0} = 3 \text{ см}^2 \quad (\text{A.122})$$

Средняя скорость потока смеси в седле клапана:

$$\omega'_{\text{сн}} = V_{\text{нсп}} F_n / (i_{\text{кл}} \cdot F_{\text{клср}}) = 125 \text{ м/с} \quad (\text{A.123})$$

Полное время-сечение клапана:

$$\begin{aligned} \int_{t_{\text{нр}}}^{t_x} F_{\text{кл}} dt &= \sum_{i=0}^x h_{\text{кли}} \cdot (\pi \cos \alpha \cdot d_{\text{зоп}}) \cdot 1/(6 \cdot n_p) = \sum_{i=0}^x h_{\text{кли}} \cdot (3,14159 \cdot \cos 45^0 \cdot 25) \cdot 1/(6 \cdot 2800) = \\ &= 4,340744 \cdot 10^{-3} \sum_{i=0}^x h_{\text{кли}} \text{ мм}^2 \cdot \text{с}, \end{aligned} \quad (\text{A.124})$$

где $t_{\text{нр}}$ - момент начала открытия впускного клапана, t_x - текущее значение времени подъема клапана.

А.4.4 Расчет пружины клапана

Максимальная сила упругости пружин:

$$P_{np\max} = KM_{кл} a \omega_{kr}^2 = 190 \text{ Н} , \quad (\text{A.125})$$

где $K = 1,4$ - коэффициент запаса;

$M_{кл} = m_{кл} + m_{np} / 3 + m_T = 130 \text{ г}$ – суммарная масса клапанного механизма.

Минимальная сила упругости пружины:

$$P_{np\min} = KM_{кл} (r_0 - r_2) \omega_k^2 = 109 \text{ Н} \quad (\text{A.126})$$

Жесткость пружины:

$$c = KM_{кл} \omega_{kr}^2 = 16,11 \text{ кН / м} \quad (\text{A.127})$$

Деформация пружины:

-предварительная

$$f_{\min} = r_0 - r_2 = 4,9 \text{ мм} \quad (\text{A.128})$$

- полная

$$f_{\max} = f_{\min} + h_{кл.\max} = 11,5 \text{ мм} \quad (\text{A.129})$$

Размеры пружин (приняты по конструктивным соображениям):

- диаметр проволоки $\delta_{np} = 3 \text{ мм}$;

- средний диаметр пружины $D_{np} = 22 \text{ мм}$;

Число рабочих витков пружины:

$$i_p = \frac{G \cdot \delta_{np}^4 \cdot f_{\max}}{8P_{np\max} \cdot D_{np}^3} = 4,9 , \quad (\text{A.130})$$

где $G = 8,3$ - модуль упругости второго рода, МН/см².

Максимальные и минимальные напряжения в пружине:

$$\tau_{\max} = k' \frac{8P_{np\max} D_{np}}{\pi \delta_{np}^3} = 499 \text{ МПа}; \quad (\text{A.131})$$

$$\tau_{\min} = k' \frac{8P_{np\min} D_{np}}{\pi \delta_{np}^3} = 256 \text{ МПа},$$

где $k' = 1,21$ определен при $D_{np}/\delta_{np} = 22/3 = 7,33$.

Средние напряжения и амплитуды напряжений:

$$\tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2} = 382 \text{ МПа}; \quad (\text{A.132})$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2} = 101 \text{ МПа}.$$

Так как концентрация напряжений на витках пружины учитывается коэффициентом k' , а $k_\tau/\varepsilon_m \varepsilon_n \approx 1$, то:

$$\tau_{ak} = \tau_a \frac{k_\tau}{\varepsilon_m \varepsilon_n} = 101 \text{ МПа}. \quad (\text{A.133})$$

Запас прочности пружины:

$$n_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_{ak} + \alpha_\tau \tau_m} = 1,55, \quad (\text{A.134})$$

где $\alpha_\tau = 0,2$.

А.4.5 Расчет распределительного вала

Максимальная сила от выпускного клапана, действующая на кулачек

$$P_{T \max} = \left[P_{np \min} + \frac{\pi d_6^2}{4} (p_2 - p_2') \right] + M_T \omega_k^2 (r_1 - r_0) = 753 \text{ Н} \quad (\text{A.135})$$

где:

$$d_6 = \left(\frac{1}{1.0 \div 1.2} \right) d_{6n} = \frac{30}{1.15} = 26 \text{ мм} - \text{диаметр тарелки выпускного клапана};$$

$$d_{6n} = (1.06 \div 1.12) d_{2op} = 1.12 \cdot 25 = 30 \text{ мм} - \text{диаметр тарелки впускного клапана};$$

$$M_T = m_{кв} + m_{np} / 3 + m_T = 95 + 60 / 3 + 30 = 132 \text{ г}$$

Стрела прогиба распределительного вала:

$$y = 0,8 \frac{P_{T \max} a^2 b^2}{El(d_p^4)} = 0,000357 \text{ мм}, \quad (\text{A.136})$$

где $E = 2.2 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости стали;

$l = a + b = 89$ мм - длина пролета распределительного вала, принята по конструктивным соображениям;

$d_p = 22$ мм - наружный диаметр вала.

Напряжение смятия:

$$\sigma_{см} = 0,418 \sqrt{\frac{P_{T \max} E}{b_k r_1}} = 435 \text{ МПа}, \quad (\text{A.137})$$

где $b_k = 14$ мм - ширина кулачка.

Допускаемые напряжения смятия $[\sigma_{см}] = 400 \div 1200$ МПа.

А.5 Системы двигателя

А.5.1 Расчет элементов системы смазки

А.5.1.1 Масляный насос

Общее количество тепла, выделяемого топливом в течение 1 с:

$$Q_0 = 219,398 \text{ кДж/с.}$$

Количество тепла, отводимого маслом от двигателя:

$$Q_M = 0,021 Q_0 = 0,021 * 220,338 = 4,64 \text{ кДж/с.}$$

Теплоемкость масла: $c_m = 2,094 \text{ кДж/(кг·К)}$.

Плотность масла: $\rho_m = 900 \text{ кг/м}^3$.

Температура нагрева масла в двигателе: $\Delta T_M = 8 \text{ К}$.

Циркуляционный расход масла:

$$V_{Ц} = Q_M / (c_m \rho_m \Delta T_M) = 4,64 / (900 * 2,094 * 10) = 0,000258 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Циркуляционный расход с учетом стабилизации давления масла в системе:

$$V' = 2V_{Ц} = 2 * 0,000258 = 0,0005145 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Объемный коэффициент подачи $\eta_n = 0,75$.

Расчетная производительность насоса:

$$V_p = V' / \eta_n = 0,0005145 / 0,75 = 0,000754 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Модуль зацепления зуба $m = 4,5 \text{ мм} = 0,0045 \text{ м}$.

Высота зуба $h = 2m = 2 \cdot 4,5 = 9,0 \text{ мм} = 0,009 \text{ м}$.

Число зубьев шестерен $z = 7$.

Диаметр начальной окружности шестерни:

$$D_0 = z \cdot m = 7 \cdot 4,5 = 31,5 \text{ мм} = 0,0315 \text{ м}.$$

Диаметр внешней окружности шестерни:

$$D = m \cdot (z + 2) = 4,5 \cdot (7 + 2) = 40,5 \text{ мм} = 0,0405 \text{ м}.$$

Окружная скорость на внешнем диаметре шестерни $u_n = 6,9 \text{ м/с}$.

Частота вращения шестерни (насоса):

$$n_n = u_n \cdot 60 / (\pi D) = 6,9 \cdot 60 / (3,14 \cdot 0,0405) = 3000 \text{ об/мин}.$$

Длина зуба шестерни:

$$b = 60 \cdot V_p / (2 \cdot \pi \cdot m^2 \cdot z \cdot n_n) = 60 \cdot 0,000734 / (2 \cdot 3,14 \cdot 0,0045^2 \cdot 7 \cdot 3000) = 0,017 \text{ м}.$$

Рабочее давление масла в системе $p = 40 \cdot 10^4 \text{ Па}$.

Механический к. п. д. масляного насоса: $\eta_{м.н.} = 0,87$.

Мощность, затрачиваемая на привод масляного насоса:

$$N_n = V_p \cdot p / (\eta_{м.н.} \cdot 10^3) = 0,000734 \cdot 40 \cdot 10^4 / (0,87 \cdot 10^3) = 0,349 \text{ кВт}.$$

А.5.1.2 Подшипники

Диаметральный зазор:

$$\Delta = 0,007 * (d_{\text{шш}})^{0,5} = 0,007 * (48)^{0,5} = 0,0466 \text{ мм} \quad (\text{A.5.1})$$

Относительный зазор:

$$\chi = \Delta / d_{\text{шш}} = 0,0466 / 48 = 0,001 \quad (\text{A.5.2})$$

Коэффициент, учитывающий геометрию шатунной шейки:

$$c = 1 + d_{\text{шш}} / l_{\text{шш}} = 1 + 48 / 22 = 3,15 \quad (\text{A.5.3})$$

Минимальная толщина масляного слоя:

$$h_{\text{min}} = 55 * 10^{-9} * \mu * n * d_{\text{шш}} / (k_{\text{шш.ср.}} * \chi * c) = 55 * 10^{-9} * 0,0136 * 5600 * 48 / (8,8 * 0,001 * 3,18) = 0,007 \text{ мм}, \quad (\text{A.5.4})$$

где $\mu = 0,0136 \text{ Н*с/м}^2$ - определяется для масла АК - 15 при $T = 373\text{К}$ (подшипник залит свинцовой бронзой).

Величина критического слоя масла:

$$h_{\text{кр}} = h_{\text{в}} + h_{\text{п}} = 0,002 \text{ мм}, \quad (\text{A.5.5})$$

где $h_{\text{в}} = 0,0007$ - величина неровностей поверхности шейки после чистового шлифования, мм;

$h_{\text{п}} = 0,0013$ - величина неровностей поверхности вкладыша после алмазного растачивания, мм.

Коэффициент запаса надежности подшипника:

$$K = h_{\text{min}} / h_{\text{кр}} = 3,5 \quad (\text{A.5.6})$$

А.5.2 Расчет элементов системы охлаждения

А.5.2.1 Водяной насос

Циркуляционный расход воды в системе охлаждения:

$$G_{Ж} = Q_d / (c_{жс} * \rho_{жс} * \Delta T_{жс}) = 0,00178 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (\text{А.5.7})$$

где $\Delta T_{жс} = 9,6 \text{ К}$ - температурный перепад воды при принудительной циркуляции.

Расчетная производительность насоса:

$$G_{Ж.Р} = G_{Ж} / \eta = 0,00178 / 0,82 = 0,00259 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (\text{А.5.8})$$

где $\eta = 0,82$ - коэффициент подачи насоса.

Радиус входного отверстия крыльчатки:

$$r_1 = (G_{Ж.Р} / (\pi c_1) + r_0^2)^{0,5} = (0,00259 / (3,14 * 1,8) + 0,01^2)^{0,5} = 0,0217 \text{ мм}, \quad (\text{А.5.9})$$

где $c_1 = 1,8 \text{ м/с}$ - скорость воды на входе в насос;

$r_0 = 0,01 \text{ м}$ - радиус ступицы крыльчатки.

Окружная скорость потока воды на выходе из колеса:

$$u_2 = (1 + \operatorname{tg} \alpha_2 \operatorname{ctg} \beta_2)^{0,5} * (p_{жс} / (\rho_{жс} * \eta_h))^{0,5} = (1 + \operatorname{tg} 10^\circ \operatorname{ctg} 45^\circ)^{0,5} * \\ * (120000 / (1000 * 0,65))^{0,5} = 14,7 \text{ м/с}, \quad (\text{А.5.10})$$

где угол $\alpha_2 = 10^\circ$, а угол $\beta_2 = 45^\circ$; $\eta_h = 0,65$ - гидравлический к. п. д. насоса.

Радиус крыльчатки колеса на выходе:

$$r_2 = 30 * u_2 / (\pi m_{Б.Н.}) = 0,0324 \text{ м} \quad (\text{А.5.11})$$

Окружная скорость входа потока:

$$u_1 = u_2 * r_1 / r_2 = 10,12 \text{ м/с.} \quad (\text{A.5.12})$$

Угол между скоростями c_1 и u_1 принимается $\alpha_1=90^\circ$, при этом $\text{tg}\beta_1 = c_1 / u_1 = 0,1717$, откуда $\beta_1 = 9,75^\circ$.

Ширина лопатки на входе:

$$b_1 = G_{ж.п.} / ((2 * \pi * r_1 - z\delta_1 / \sin \beta_1) * c_1) = 0,0175 \text{ м,} \quad (\text{A.5.13})$$

где $z=4$ - число лопаток на крыльчатке насоса; $\delta_1=0,003$ м - толщина лопаток у входа.

Радиальная скорость потока на выходе из колеса:

$$c_r = p_{жс} * \text{tg}\alpha_2 / (\rho_{жс} * \eta_h * u_2) = 120000 * \text{tg}10^\circ / (1000 * 0,65 * 14,7) = 2,2 \text{ м/с.} \quad (\text{A.5.14})$$

Ширина лопатки на выходе:

$$b_2 = G_{ж.п.} / ((2 * \pi * r_2 - z\delta_2 / \sin \beta_2) * c_2) = 0,0050 \text{ м,} \quad (\text{A.5.15})$$

где $\delta_2=0,003$ м - толщина лопаток на выходе.

Мощность, потребляемая насосом:

$$N_{D.H.} = G_{ж.п.} * p_{жс} / (1000 * \eta_m) = 0,306 \text{ кВт,} \quad (\text{A.5.16})$$

где $\eta_m=0,82$ - механический к. п. д. водяного насоса.

А.5.2.2 Водяной радиатор

Количество воздуха, проходящего через радиатор:

$$G'_{\text{возд}} = Q_{\text{возд}} / (c_{\text{возд}} * \Delta T_{\text{возд}}) = 69044 / (1000 * 24) = 2,7 \text{ кг/с}, \quad (\text{A.5.17})$$

где $\Delta T_{\text{возд}} = 24 \text{ К}$ - температурный перепад воздуха в решетке радиатора.

Массовый расход воды, проходящей через радиатор:

$$G'_{\text{жс}} = G_{\text{жс}} * \rho_{\text{жс}} = 0,00172 * 1000 = 1,6 \text{ кг/с}. \quad (\text{A.5.18})$$

Средняя температура охлаждающего воздуха, проходящего через радиатор:

$$T_{\text{ср.возд}} = T_{\text{воздвх}} + (T_{\text{воздвх}} - \Delta T_{\text{возд}}) / 2 = (313 + (313 - 24)) / 2 = 320 \text{ К}, \quad (\text{A.5.19})$$

где $T_{\text{воздвх}} = 313 \text{ К}$ - расчетная температура воздуха перед радиатором.

Средняя температура воды в радиаторе:

$$T_{\text{ср.вод}} = T_{\text{водвх}} + (T_{\text{водвх}} - \Delta T_{\text{вод}}) / 2 = 352 \text{ К}, \quad (\text{A.5.20})$$

где $T_{\text{водвх}} = 363 \text{ К}$ - температура воды перед радиатором; $\Delta T_{\text{вод}} = 9,6$ - температурный перепад воды в радиаторе.

Поверхность охлаждения радиатора:

$$F = Q_{\text{вод}} / (K(T_{\text{ср.вод}} * T_{\text{ср.возд}})) = 11 \text{ м}^2, \quad (\text{A.5.21})$$

где $K = 160 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{-К})$ - коэффициент теплопередачи для радиатора

A.5.2.3 Вентилятор

Плотность воздуха при средней его температуре в радиаторе:

$$\rho_{\text{возд}} = p_0 * 10^6 / (R_B * T_{\text{ср.возд}}) = 1,01 \text{ кг/м}^3. \quad (\text{A.5.22})$$

Производительность вентилятора:

$$G_{\text{возд}} = G'_{\text{возд}} / \rho_{\text{возд}} = 2,88 / 1,01 = 2,56 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{A.5.23})$$

Фронтальная поверхность радиатора:

$$F_{\text{фр.рад.}} = G_{\text{возд}} / \omega_{\text{возд}} = 2,56 / 20 = 0,125 \text{ м}^2, \quad (\text{A.5.24})$$

где $\omega_{\text{возд}} = 20 \text{ м/с}$ - скорость воздуха перед фронтом радиатора без учета скорости движения автомобиля.

Диаметр вентилятора:

$$D_{\text{вент}} = 2 * (F_{\text{фр.рад}} / \pi)^{0,5} = 2 * (0,125 / 3,14)^{0,5} = 0,464 \text{ м}. \quad (\text{A.5.25})$$

Окружная скорость вентилятора:

$$u = \psi_l * (\Delta p_{\text{тр}} / \rho_{\text{возд}})^{0,5} = 83,4 \text{ м/с}, \quad (\text{A.5.26})$$

где $\psi_l = 3,41$ - безразмерный коэффициент для плоских лопастей.

Частота вращения вентилятора:

$$n_{\text{вент}} = 60 * u / (\pi D_{\text{вент}}) = 4600 \text{ об/мин}. \quad (\text{A.5.27})$$

Мощность, затрачиваемая на привод осевого вентилятора:

$$N_{\text{вент}} = G_{\text{возд}} * \Delta p_{\text{тр}} / (1000 * \eta_e) = 4,38 \text{ кВт}, \quad (\text{A.5.28})$$

где $\eta_e = 0,4$ - к. п. д. вентилятора с плоскими лопастями.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б1 - Суммирование значений крутящих моментов всех цилиндров

φ°	Цилиндры								M _{кр.} , Нм
	1-й		2-й		3-й		4-й		
	φ° кривошипа	M _{кр. ц.} , Нм	φ° кривошипа	M _{кр. ц.} , Нм	φ° кривошипа	M _{кр. ц.} , Нм	φ° кривошипа	M _{кр. ц.} , Нм	
0	0	0	180	0,00	360	0,00	540	0,00	0
10	10	-56	190	160,38	370	-56,27	550	160,38	208,5
20	20	-101	200	313,27	380	-100,89	560	313,27	424,7
30	30	-125	210	287,37	390	-124,94	570	287,37	324,8
40	40	-124	220	246,96	400	-124,26	580	246,96	245,7
50	50	-100	230	214,38	410	-100,18	590	214,38	228,6
60	60	-59	240	200,55	420	-58,83	600	200,55	283,3
70	70	-9	250	201,77	430	-9,27	610	201,77	385,3
80	80	39	260	209,33	440	38,97	620	209,33	496,6
90	90	78	270	214,83	450	78,14	630	214,83	585,8
100	100	104	280	212,68	460	103,69	640	212,68	633,1
110	110	115	290	200,79	470	114,55	650	200,79	631,1
120	120	112	300	179,95	480	112,45	660	179,95	584,4
130	130	101	310	152,67	490	100,72	670	152,67	507,1
140	140	83	320	121,93	500	83,06	680	121,93	409,9
150	150	63	330	90,24	510	62,59	690	90,24	306,1
160	160	41	340	56,94	520	41,42	700	56,94	196,3
170	170	21	350	26,42	530	20,52	710	26,42	94,4
180	180	0	360	0,00	540	0,00	720	0,00	0

Таблица Б2 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя работающего на СПГ, при $n = 850 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
φ''	φ_2	α	ε	P_v	T_v	V_a	E_2	λ	m	φ_z							
28	45	1	9,8	1,43	768,5	1,187	39,4867	0,293	3,3	45							
Расчет процесса сгорания																	
φ_2	φ_1	φ''	$V_{сг}$	T_1, K	T_2, K	T_{1-2}	X_{1-2}	ΔX_{1-2}	k_{1-2}	K_{1-2}	$p_1, \text{МПа}$	$p_2, \text{МПа}$	$\sigma \cdot 10^{-2}$	$\psi(\varphi)$	μ	μ_{1-2}	X
1	0	-18	0,15	768,54	773,22	770,88	0,00	0,00	1,26	8,72	1,43	1,47	0,06	1,28	1,00	1,00	0,00
2	1	-17	0,15	773,22	777,80	775,51	0,00	0,00	1,26	8,72	1,47	1,51	0,06	1,25	1,00	1,00	0,00
3	2	-16	0,15	777,81	782,31	780,08	0,00	0,00	1,26	8,72	1,51	1,56	0,05	1,22	1,00	1,00	0,00
4	3	-15	0,14	782,35	786,87	784,67	0,00	0,00	1,26	8,72	1,56	1,60	0,04	1,19	1,00	1,00	0,00
5	4	-14	0,14	787,00	791,63	789,48	0,00	0,00	1,26	8,72	1,60	1,64	0,04	1,17	1,00	1,00	0,00
6	5	-13	0,14	791,96	796,82	794,76	0,00	0,00	1,26	8,72	1,64	1,68	0,03	1,15	1,00	1,00	0,00
7	6	-12	0,14	797,55	802,76	800,86	0,00	0,00	1,26	8,72	1,68	1,73	0,03	1,12	1,00	1,00	0,00
8	7	-11	0,13	804,17	809,82	808,25	0,00	0,00	1,26	8,72	1,73	1,77	0,02	1,10	1,00	1,00	0,00
9	8	-10	0,13	812,32	818,45	817,46	0,00	0,00	1,26	8,72	1,77	1,82	0,02	1,09	1,00	1,00	0,00
10	9	-9	0,13	822,60	829,19	829,16	0,00	0,00	1,26	8,72	1,82	1,87	0,02	1,07	1,00	1,00	0,01
11	10	-8	0,13	835,71	842,61	844,05	0,00	0,01	1,26	8,72	1,87	1,92	0,01	1,06	1,00	1,00	0,01
12	11	-7	0,13	852,40	859,38	862,97	0,00	0,01	1,26	8,72	1,92	1,99	0,01	1,04	1,00	1,00	0,02
13	12	-6	0,12	873,54	880,15	886,77	0,00	0,01	1,26	8,72	1,99	2,06	0,01	1,03	1,00	1,01	0,02
14	13	-5	0,12	900,00	905,63	916,34	0,01	0,01	1,26	8,72	2,06	2,14	0,00	1,02	1,01	1,01	0,03
15	14	-4	0,12	932,69	936,48	952,59	0,01	0,01	1,26	8,72	2,14	2,23	0,00	1,01	1,01	1,01	0,04
16	15	-3	0,12	972,49	973,31	996,35	0,01	0,02	1,26	8,72	2,23	2,33	0,00	1,01	1,01	1,01	0,06
17	16	-2	0,12	1020,20	1016,63	1048,35	0,01	0,02	1,26	8,72	2,33	2,45	0,00	1,00	1,02	1,02	0,08
18	17	-1	0,12	1076,50	1066,82	1109,18	0,01	0,03	1,26	8,72	2,45	2,59	0,00	1,00	1,02	1,02	0,10
19	18	0	0,12	1141,86	1124,03	1179,18	0,02	0,03	1,26	8,72	2,59	2,74	0,00	1,00	1,03	1,03	0,13
20	19	1	0,12	1216,50	1188,20	1258,42	0,02	0,03	1,26	8,72	2,74	2,91	0,00	1,00	1,03	1,03	0,16
21	20	2	0,12	1300,34	1258,97	1346,63	0,02	0,04	1,26	8,73	2,91	3,09	0,00	1,00	1,04	1,04	0,19
22	21	3	0,12	1392,92	1335,71	1443,16	0,02	0,04	1,26	8,73	3,09	3,28	0,00	1,01	1,05	1,05	0,23
23	22	4	0,12	1493,40	1417,45	1546,96	0,02	0,05	1,26	8,73	3,28	3,49	0,00	1,01	1,05	1,06	0,27
24	23	5	0,12	1600,53	1502,96	1656,62	0,03	0,05	1,26	8,73	3,49	3,70	0,00	1,02	1,06	1,07	0,32
25	24	6	0,12	1712,70	1590,76	1770,33	0,03	0,05	1,26	8,73	3,70	3,91	0,01	1,03	1,07	1,08	0,37
26	25	7	0,13	1827,97	1679,16	1886,05	0,03	0,06	1,26	8,74	3,91	4,12	0,01	1,04	1,08	1,09	0,42

27	26	8	0,13	1944,14	1766,40	2001,51	0,03	0,06	1,26	8,74	4,12	4,32	0,01	1,06	1,10	1,10	0,48
28	27	9	0,13	2058,88	1850,66	2114,36	0,03	0,06	1,26	8,74	4,32	4,50	0,02	1,07	1,11	1,11	0,54
29	28	10	0,13	2169,84	1930,24	2222,31	0,03	0,06	1,26	8,74	4,50	4,66	0,02	1,09	1,12	1,12	0,59
30	29	11	0,13	2274,78	2003,60	2323,22	0,03	0,05	1,26	8,74	4,66	4,80	0,02	1,10	1,13	1,13	0,65
31	30	12	0,14	2371,67	2069,44	2415,25	0,02	0,05	1,26	8,74	4,80	4,91	0,03	1,12	1,14	1,15	0,70
32	31	13	0,14	2458,83	2126,82	2496,92	0,02	0,05	1,26	8,74	4,91	4,99	0,03	1,15	1,15	1,15	0,75
33	32	14	0,14	2535,02	2175,15	2567,22	0,02	0,04	1,26	8,74	4,99	5,03	0,04	1,17	1,16	1,16	0,80
34	33	15	0,14	2599,43	2214,20	2625,62	0,02	0,04	1,26	8,73	5,03	5,05	0,04	1,19	1,17	1,17	0,84
35	34	16	0,15	2651,81	2244,15	2672,07	0,02	0,03	1,26	8,73	5,05	5,03	0,05	1,22	1,17	1,18	0,87
36	35	17	0,15	2692,34	2265,48	2707,00	0,01	0,02	1,26	8,73	5,03	4,98	0,06	1,25	1,18	1,18	0,90
37	36	18	0,15	2721,66	2278,96	2731,21	0,01	0,02	1,26	8,73	4,98	4,91	0,06	1,28	1,19	1,19	0,93
38	37	19	0,16	2740,76	2285,54	2745,82	0,01	0,02	1,26	8,73	4,91	4,82	0,07	1,31	1,19	1,19	0,95
39	38	20	0,16	2750,88	2286,29	2752,15	0,01	0,01	1,26	8,73	4,82	4,71	0,08	1,34	1,19	1,19	0,96
40	39	21	0,17	2753,41	2282,30	2751,59	0,00	0,01	1,26	8,73	4,71	4,59	0,09	1,38	1,19	1,20	0,98
41	40	22	0,17	2749,77	2274,62	2745,54	0,00	0,01	1,26	8,72	4,59	4,46	0,09	1,41	1,20	1,20	0,98
42	41	23	0,18	2741,31	2264,17	2735,28	0,00	0,00	1,26	8,72	4,46	4,33	0,10	1,45	1,20	1,20	0,99
43	42	24	0,18	2729,25	2251,75	2721,94	0,00	0,00	1,26	8,72	4,33	4,19	0,11	1,49	1,20	1,20	0,99
44	43	25	0,19	2714,63	2238,01	2706,45	0,00	0,00	1,26	8,72	4,19	4,06	0,12	1,53	1,20	1,20	1,00
45	44	26	0,19	2698,27	2223,42	2689,53	0,00	0,00	1,26	8,72	4,06	3,92	0,13	1,57	1,20	1,20	1,00

Таблица Б3 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя работающего на КГТ, при $n = 850 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
φ''	φ_2	α	ε	P_y	T_y	V_a	E_2	λ	m	φ_z							
15	40	1	9,8	1,57	788,9	1,57	39,793	0,293	3	40							
Расчет процесса сгорания																	
φ_2	φ_1	φ''	$V_{ст}$	T_1, K	T_2, K	T_{1-2}	X_{1-2}	ΔX_{1-2}	k_{1-2}	K_{1-2}	$p_1, \text{МПа}$	$p_2, \text{МПа}$	$\sigma \cdot 10^{-2}$	$\psi(\varphi)$	μ	μ_{1-2}	X
1	0	-15	0,145	793,205	797,521	795,318	0,000	0,000	1,259	8,722	1,570	1,612	0,044	1,193	1,000	1,000	0,000
2	1	-14	0,142	797,431	801,734	799,645	0,000	0,000	1,259	8,722	1,612	1,653	0,038	1,169	1,000	1,000	0,000
3	2	-13	0,139	801,860	806,030	804,407	0,000	0,000	1,259	8,722	1,653	1,693	0,033	1,145	1,000	1,000	0,000
4	3	-12	0,136	806,954	810,729	810,161	0,000	0,000	1,259	8,722	1,693	1,734	0,028	1,124	1,000	1,000	0,000
5	4	-11	0,134	813,367	816,286	817,653	0,000	0,001	1,259	8,722	1,734	1,775	0,024	1,104	1,000	1,000	0,001
6	5	-10	0,132	821,939	823,287	827,813	0,001	0,002	1,259	8,722	1,775	1,818	0,020	1,086	1,000	1,000	0,002
7	6	-9	0,130	833,686	832,440	841,737	0,001	0,003	1,259	8,721	1,818	1,864	0,016	1,070	1,000	1,001	0,003
8	7	-8	0,128	849,787	844,569	860,671	0,002	0,005	1,259	8,721	1,864	1,916	0,013	1,055	1,001	1,001	0,006
9	8	-7	0,126	871,556	860,593	885,979	0,003	0,007	1,259	8,721	1,916	1,975	0,010	1,042	1,002	1,002	0,011
10	9	-6	0,125	900,402	881,497	919,092	0,005	0,009	1,259	8,720	1,975	2,044	0,007	1,031	1,002	1,003	0,018
11	10	-5	0,124	937,782	908,299	961,453	0,006	0,012	1,259	8,720	2,044	2,125	0,005	1,022	1,004	1,005	0,027
12	11	-4	0,123	985,124	941,996	1014,434	0,008	0,016	1,259	8,721	2,125	2,222	0,003	1,014	1,005	1,006	0,039
13	12	-3	0,122	1043,745	983,506	1079,247	0,010	0,020	1,259	8,721	2,222	2,335	0,002	1,008	1,008	1,009	0,054
14	13	-2	0,122	1114,748	1033,598	1156,833	0,012	0,024	1,259	8,722	2,335	2,468	0,001	1,003	1,010	1,012	0,074
15	14	-1	0,121	1198,917	1092,812	1247,756	0,015	0,029	1,259	8,723	2,468	2,621	0,000	1,001	1,014	1,016	0,098
16	15	0	0,121	1296,596	1161,384	1352,096	0,017	0,034	1,259	8,725	2,621	2,795	0,000	1,000	1,018	1,020	0,128
17	16	1	0,121	1407,596	1239,173	1469,351	0,020	0,040	1,259	8,727	2,795	2,990	0,000	1,001	1,023	1,025	0,162
18	17	2	0,122	1531,106	1325,606	1598,381	0,022	0,045	1,259	8,730	2,990	3,203	0,001	1,003	1,028	1,031	0,202
19	18	3	0,122	1665,657	1419,652	1737,387	0,025	0,050	1,259	8,732	3,203	3,431	0,002	1,008	1,034	1,038	0,247
20	19	4	0,123	1809,117	1519,817	1883,936	0,027	0,054	1,259	8,735	3,431	3,671	0,003	1,014	1,041	1,045	0,296
21	20	5	0,124	1958,756	1624,194	2035,059	0,029	0,058	1,258	8,737	3,671	3,916	0,005	1,022	1,049	1,053	0,351
22	21	6	0,125	2111,362	1730,539	2187,385	0,030	0,060	1,258	8,740	3,916	4,159	0,007	1,031	1,057	1,061	0,408
23	22	7	0,126	2263,407	1836,389	2337,332	0,031	0,062	1,258	8,741	4,159	4,395	0,010	1,042	1,065	1,069	0,469
24	23	8	0,128	2411,257	1939,205	2481,329	0,031	0,061	1,258	8,742	4,395	4,614	0,013	1,055	1,074	1,078	0,530
25	24	9	0,130	2551,401	2036,535	2616,036	0,030	0,060	1,258	8,743	4,614	4,810	0,016	1,070	1,082	1,086	0,592
26	25	10	0,132	2680,672	2126,166	2738,564	0,029	0,057	1,258	8,743	4,810	4,976	0,020	1,086	1,091	1,095	0,651

27	26	11	0,134	2796,455	2206,269	2846,648	0,027	0,053	1,258	8,742	4,976	5,109	0,024	1,104	1,099	1,102	0,709
28	27	12	0,136	2896,841	2275,508	2938,780	0,024	0,048	1,258	8,740	5,109	5,204	0,028	1,124	1,106	1,109	0,762
29	28	13	0,139	2980,719	2333,107	3014,263	0,021	0,042	1,258	8,738	5,204	5,260	0,033	1,145	1,113	1,116	0,810
30	29	14	0,142	3047,806	2378,869	3073,202	0,018	0,036	1,259	8,736	5,260	5,277	0,038	1,169	1,118	1,121	0,852
31	30	15	0,145	3098,598	2413,147	3116,428	0,015	0,030	1,259	8,734	5,277	5,259	0,044	1,193	1,123	1,125	0,888
32	31	16	0,148	3134,258	2436,761	3145,359	0,012	0,024	1,259	8,731	5,259	5,208	0,050	1,220	1,128	1,129	0,917
33	32	17	0,151	3156,460	2450,890	3161,825	0,009	0,018	1,259	8,729	5,208	5,131	0,056	1,248	1,131	1,132	0,941
34	33	18	0,155	3167,191	2456,936	3167,876	0,007	0,014	1,259	8,727	5,131	5,031	0,063	1,277	1,133	1,134	0,959
35	34	19	0,159	3168,561	2456,386	3165,593	0,005	0,010	1,259	8,726	5,031	4,914	0,070	1,308	1,135	1,136	0,973
36	35	20	0,162	3162,624	2450,686	3156,932	0,003	0,007	1,259	8,725	4,914	4,785	0,078	1,341	1,137	1,137	0,983
37	36	21	0,167	3151,239	2441,147	3143,612	0,002	0,004	1,259	8,724	4,785	4,648	0,085	1,375	1,138	1,138	0,989
38	37	22	0,171	3135,984	2428,880	3127,049	0,001	0,003	1,259	8,723	4,648	4,507	0,093	1,411	1,138	1,138	0,994
39	38	23	0,176	3118,114	2414,771	3108,345	0,001	0,002	1,259	8,723	4,507	4,365	0,102	1,449	1,139	1,139	0,996
40	39	24	0,180	3098,576	2399,487	3088,308	0,000	0,001	1,259	8,722	4,365	4,223	0,111	1,488	1,139	1,139	0,998

Таблица Б4 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя работающего на СПГ, при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
φ''	φ_2	α	ε	P_v	T_v	V_a	E_2	λ	m	φ_z							
20	50	1	9,8	1,33	754,2	1,175	39,4867	0,293	3	50							
Расчет процесса сгорания																	
φ_2	φ_1	φ''	$V_{ст}$	T_1, K	T_2, K	T_{1-2}	X_{1-2}	ΔX_{1-2}	k_{1-2}	K_{1-2}	$p_1, \text{МПа}$	$p_2, \text{МПа}$	$\sigma \cdot 10^{-2}$	$\psi(\varphi)$	μ	μ_{1-2}	X
1	0	-20	0,162	754,226	759,074	756,650	0,000	0,000	1,259	8,722	1,335	1,378	0,078	1,341	1,000	1,000	0,000
2	1	-19	0,159	759,074	763,845	761,461	0,000	0,000	1,259	8,722	1,378	1,420	0,070	1,308	1,000	1,000	0,000
3	2	-18	0,155	763,847	768,561	766,212	0,000	0,000	1,259	8,722	1,420	1,463	0,063	1,277	1,000	1,000	0,000
4	3	-17	0,151	768,577	773,282	770,958	0,000	0,000	1,259	8,722	1,463	1,505	0,056	1,248	1,000	1,000	0,000
5	4	-16	0,148	773,338	778,105	775,796	0,000	0,000	1,259	8,722	1,505	1,548	0,050	1,220	1,000	1,000	0,000
6	5	-15	0,145	778,254	783,174	780,876	0,000	0,000	1,259	8,722	1,548	1,591	0,044	1,193	1,000	1,000	0,000
7	6	-14	0,142	783,499	788,676	786,403	0,000	0,001	1,259	8,722	1,591	1,635	0,038	1,169	1,000	1,000	0,001
8	7	-13	0,139	789,307	794,848	792,638	0,001	0,001	1,259	8,722	1,635	1,680	0,033	1,145	1,000	1,000	0,001
9	8	-12	0,136	795,969	801,976	799,903	0,001	0,002	1,259	8,722	1,680	1,725	0,028	1,124	1,001	1,001	0,003
10	9	-11	0,134	803,836	810,396	808,577	0,001	0,002	1,259	8,721	1,725	1,773	0,024	1,104	1,001	1,001	0,004
11	10	-10	0,132	813,318	820,487	819,099	0,002	0,003	1,259	8,721	1,773	1,824	0,020	1,086	1,001	1,002	0,007
12	11	-9	0,130	824,881	832,673	831,961	0,002	0,005	1,259	8,721	1,824	1,878	0,016	1,070	1,002	1,003	0,010
13	12	-8	0,128	839,042	847,413	847,702	0,003	0,006	1,259	8,721	1,878	1,937	0,013	1,055	1,003	1,004	0,015
14	13	-7	0,126	856,362	865,192	866,897	0,004	0,008	1,259	8,720	1,937	2,002	0,010	1,042	1,004	1,005	0,021
15	14	-6	0,125	877,433	886,505	890,146	0,005	0,010	1,259	8,720	2,002	2,074	0,007	1,031	1,006	1,007	0,029
16	15	-5	0,124	902,859	911,845	918,051	0,006	0,012	1,259	8,720	2,074	2,154	0,005	1,022	1,008	1,009	0,038
17	16	-4	0,123	933,243	941,679	951,198	0,007	0,014	1,259	8,720	2,154	2,244	0,003	1,014	1,010	1,011	0,050
18	17	-3	0,122	969,153	976,427	990,126	0,009	0,017	1,259	8,720	2,244	2,344	0,002	1,008	1,013	1,015	0,065
19	18	-2	0,122	1011,100	1016,431	1035,301	0,010	0,020	1,259	8,720	2,344	2,456	0,001	1,003	1,016	1,018	0,082
20	19	-1	0,121	1059,502	1061,931	1087,076	0,012	0,024	1,259	8,721	2,456	2,579	0,000	1,001	1,020	1,023	0,102
21	20	0	0,121	1114,651	1113,034	1145,665	0,013	0,027	1,259	8,722	2,579	2,714	0,000	1,000	1,025	1,028	0,126
22	21	1	0,121	1176,679	1169,692	1211,103	0,015	0,031	1,259	8,723	2,714	2,860	0,000	1,001	1,030	1,034	0,153
23	22	2	0,122	1245,527	1231,675	1283,222	0,017	0,034	1,259	8,724	2,860	3,018	0,001	1,003	1,037	1,040	0,183
24	23	3	0,122	1320,917	1298,561	1361,626	0,019	0,038	1,259	8,725	3,018	3,184	0,002	1,008	1,043	1,047	0,217
25	24	4	0,123	1402,335	1369,729	1445,682	0,020	0,041	1,259	8,727	3,184	3,358	0,003	1,014	1,051	1,055	0,255
26	25	5	0,124	1489,028	1444,362	1534,516	0,022	0,044	1,259	8,729	3,358	3,537	0,005	1,022	1,059	1,063	0,296

27	26	6	0,125	1580,003	1521,470	1627,030	0,023	0,047	1,259	8,730	3,537	3,717	0,007	1,031	1,068	1,072	0,340
28	27	7	0,126	1674,057	1599,914	1721,930	0,024	0,049	1,259	8,732	3,717	3,895	0,010	1,042	1,077	1,082	0,386
29	28	8	0,128	1769,803	1678,449	1817,767	0,025	0,050	1,259	8,733	3,895	4,067	0,013	1,055	1,087	1,092	0,435
30	29	9	0,130	1865,730	1755,772	1912,991	0,025	0,051	1,259	8,735	4,067	4,229	0,016	1,070	1,097	1,102	0,485
31	30	10	0,132	1960,252	1830,580	2006,018	0,025	0,051	1,259	8,735	4,229	4,377	0,020	1,086	1,107	1,112	0,536
32	31	11	0,134	2051,784	1901,623	2095,293	0,025	0,050	1,259	8,736	4,377	4,508	0,024	1,104	1,117	1,122	0,587
33	32	12	0,136	2138,803	1967,763	2179,364	0,024	0,048	1,259	8,736	4,508	4,617	0,028	1,124	1,127	1,132	0,637
34	33	13	0,139	2219,924	2028,023	2256,940	0,023	0,046	1,259	8,736	4,617	4,704	0,033	1,145	1,137	1,142	0,686
35	34	14	0,142	2293,955	2081,626	2326,952	0,021	0,043	1,259	8,735	4,704	4,765	0,038	1,169	1,146	1,150	0,732
36	35	15	0,145	2359,950	2128,029	2388,596	0,020	0,039	1,259	8,735	4,765	4,800	0,044	1,193	1,155	1,159	0,775
37	36	16	0,148	2417,242	2166,936	2441,356	0,018	0,035	1,259	8,734	4,800	4,809	0,050	1,220	1,163	1,166	0,814
38	37	17	0,151	2465,469	2198,302	2485,019	0,015	0,031	1,259	8,732	4,809	4,793	0,056	1,248	1,170	1,173	0,849
39	38	18	0,155	2504,570	2222,319	2519,671	0,013	0,027	1,259	8,731	4,793	4,753	0,063	1,277	1,176	1,178	0,880
40	39	19	0,159	2534,772	2239,388	2545,665	0,011	0,022	1,259	8,730	4,753	4,692	0,070	1,308	1,181	1,183	0,907
41	40	20	0,162	2556,559	2250,086	2563,593	0,009	0,018	1,259	8,728	4,692	4,612	0,078	1,341	1,186	1,187	0,929
42	41	21	0,167	2570,627	2255,116	2574,226	0,007	0,014	1,259	8,727	4,612	4,517	0,085	1,375	1,189	1,191	0,947
43	42	22	0,171	2577,825	2255,259	2578,461	0,006	0,011	1,259	8,726	4,517	4,410	0,093	1,411	1,192	1,193	0,962
44	43	23	0,176	2579,097	2251,321	2577,258	0,004	0,008	1,259	8,725	4,410	4,295	0,102	1,449	1,194	1,195	0,973
45	44	24	0,180	2575,420	2244,091	2571,584	0,003	0,006	1,259	8,724	4,295	4,173	0,111	1,488	1,196	1,197	0,981
46	45	25	0,185	2567,748	2234,300	2562,357	0,002	0,004	1,259	8,724	4,173	4,047	0,120	1,528	1,197	1,198	0,988
47	46	26	0,190	2556,967	2222,595	2550,412	0,001	0,003	1,259	8,723	4,047	3,920	0,130	1,570	1,198	1,198	0,992
48	47	27	0,195	2543,858	2209,521	2536,471	0,001	0,002	1,259	8,723	3,920	3,793	0,139	1,613	1,199	1,199	0,995
49	48	28	0,201	2529,084	2195,521	2521,132	0,001	0,001	1,259	8,722	3,793	3,668	0,150	1,658	1,199	1,199	0,997
50	49	29	0,206	2513,180	2180,937	2504,870	0,000	0,001	1,259	8,722	3,668	3,545	0,160	1,704	1,199	1,199	0,998

Таблица Б5 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя работающего на КГТ, при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
φ''	φ_2	α	ε	P_v	T_v	V_a	E_2	λ	m	φ_z							
18	45	1	9,8	1,43	768,5	1,166	39,793	0,293	3	45							
Расчет процесса сгорания																	
φ_2	φ_1	φ''	$V_{ст}$	T_1, K	T_2, K	T_{1-2}	X_{1-2}	ΔX_{1-2}	k_{1-2}	K_{1-2}	$p_1, \text{МПа}$	$p_2, \text{МПа}$	$\sigma \cdot 10^{-2}$	$\psi(\varphi)$	μ	μ_{1-2}	X
1	0	-18	0,155	768,544	773,226	770,885	0,000	0,000	1,259	8,722	1,429	1,472	0,063	1,277	1,000	1,000	0,000
2	1	-17	0,151	773,227	777,834	775,539	0,000	0,000	1,259	8,722	1,472	1,514	0,056	1,248	1,000	1,000	0,000
3	2	-16	0,148	777,851	782,477	780,206	0,000	0,000	1,259	8,722	1,514	1,557	0,050	1,220	1,000	1,000	0,000
4	3	-15	0,145	782,561	787,349	785,087	0,000	0,000	1,259	8,722	1,557	1,600	0,044	1,193	1,000	1,000	0,000
5	4	-14	0,142	787,614	792,724	790,493	0,000	0,001	1,259	8,722	1,600	1,643	0,038	1,169	1,000	1,000	0,000
6	5	-13	0,139	793,372	798,963	796,839	0,001	0,001	1,259	8,722	1,643	1,688	0,033	1,145	1,000	1,000	0,001
7	6	-12	0,136	800,305	806,503	804,647	0,001	0,002	1,259	8,721	1,688	1,735	0,028	1,124	1,000	1,000	0,002
8	7	-11	0,134	808,989	815,859	814,543	0,001	0,003	1,259	8,721	1,735	1,785	0,024	1,104	1,001	1,001	0,004
9	8	-10	0,132	820,096	827,615	827,242	0,002	0,004	1,259	8,721	1,785	1,839	0,020	1,086	1,001	1,001	0,007
10	9	-9	0,130	834,387	842,410	843,542	0,003	0,006	1,259	8,721	1,839	1,899	0,016	1,070	1,002	1,002	0,011
11	10	-8	0,128	852,698	860,927	864,309	0,004	0,008	1,259	8,720	1,899	1,967	0,013	1,055	1,002	1,003	0,017
12	11	-7	0,126	875,921	883,871	890,448	0,005	0,010	1,259	8,720	1,967	2,043	0,010	1,042	1,003	1,004	0,024
13	12	-6	0,125	904,975	911,944	922,876	0,006	0,013	1,259	8,720	2,043	2,131	0,007	1,031	1,005	1,006	0,034
14	13	-5	0,124	940,776	945,809	962,483	0,008	0,016	1,259	8,720	2,131	2,232	0,005	1,022	1,007	1,008	0,047
15	14	-4	0,123	984,191	986,058	1010,091	0,010	0,019	1,259	8,720	2,232	2,346	0,003	1,014	1,009	1,010	0,063
16	15	-3	0,122	1035,991	1033,165	1066,395	0,011	0,023	1,259	8,721	2,346	2,476	0,002	1,008	1,011	1,013	0,082
17	16	-2	0,122	1096,799	1087,449	1131,916	0,013	0,027	1,259	8,722	2,476	2,622	0,001	1,003	1,015	1,016	0,105
18	17	-1	0,121	1167,032	1149,024	1206,939	0,015	0,031	1,259	8,723	2,622	2,784	0,000	1,001	1,018	1,020	0,131
19	18	0	0,121	1246,845	1217,768	1291,463	0,018	0,035	1,259	8,724	2,784	2,961	0,000	1,000	1,023	1,025	0,162
20	19	1	0,121	1336,081	1293,287	1385,156	0,020	0,039	1,259	8,726	2,961	3,152	0,000	1,001	1,027	1,030	0,197
21	20	2	0,122	1434,231	1374,901	1487,322	0,022	0,043	1,259	8,728	3,152	3,355	0,001	1,003	1,033	1,036	0,236
22	21	3	0,122	1540,414	1461,643	1596,893	0,023	0,047	1,259	8,730	3,355	3,567	0,002	1,008	1,039	1,042	0,279
23	22	4	0,123	1653,372	1552,275	1712,434	0,025	0,050	1,259	8,732	3,567	3,784	0,003	1,014	1,045	1,049	0,326
24	23	5	0,124	1771,495	1645,324	1832,181	0,026	0,052	1,259	8,734	3,784	4,000	0,005	1,022	1,052	1,056	0,376
25	24	6	0,125	1892,867	1739,142	1954,104	0,027	0,054	1,259	8,736	4,000	4,212	0,007	1,031	1,060	1,063	0,428
26	25	7	0,126	2015,341	1831,974	2075,987	0,027	0,055	1,258	8,737	4,212	4,414	0,010	1,042	1,067	1,071	0,482

27	26	8	0,128	2136,633	1922,043	2195,530	0,027	0,055	1,258	8,738	4,414	4,600	0,013	1,055	1,075	1,078	0,537
28	27	9	0,130	2254,427	2007,638	2310,462	0,027	0,053	1,258	8,739	4,600	4,765	0,016	1,070	1,082	1,086	0,592
29	28	10	0,132	2366,497	2087,202	2418,655	0,026	0,051	1,258	8,739	4,765	4,906	0,020	1,086	1,090	1,093	0,645
30	29	11	0,134	2470,813	2159,410	2518,232	0,024	0,048	1,258	8,738	4,906	5,018	0,024	1,104	1,097	1,100	0,696
31	30	12	0,136	2565,651	2223,233	2607,659	0,022	0,044	1,258	8,737	5,018	5,100	0,028	1,124	1,104	1,107	0,745
32	31	13	0,139	2649,668	2277,982	2685,817	0,020	0,040	1,259	8,736	5,100	5,149	0,033	1,145	1,110	1,113	0,789
33	32	14	0,142	2721,966	2323,332	2752,041	0,018	0,035	1,259	8,735	5,149	5,167	0,038	1,169	1,115	1,118	0,829
34	33	15	0,145	2782,115	2359,311	2806,133	0,015	0,030	1,259	8,733	5,167	5,155	0,044	1,193	1,120	1,122	0,864
35	34	16	0,148	2830,150	2386,278	2848,340	0,013	0,025	1,259	8,731	5,155	5,115	0,050	1,220	1,124	1,126	0,895
36	35	17	0,151	2866,530	2404,873	2879,305	0,010	0,021	1,259	8,730	5,115	5,050	0,056	1,248	1,128	1,129	0,920
37	36	18	0,155	2892,080	2415,947	2899,989	0,008	0,016	1,259	8,728	5,050	4,963	0,063	1,277	1,131	1,132	0,941
38	37	19	0,159	2907,899	2420,491	2911,584	0,006	0,013	1,259	8,727	4,963	4,860	0,070	1,308	1,133	1,134	0,957
39	38	20	0,162	2915,269	2419,558	2915,409	0,005	0,010	1,259	8,726	4,860	4,743	0,078	1,341	1,135	1,136	0,970
40	39	21	0,167	2915,550	2414,191	2912,821	0,003	0,007	1,259	8,725	4,743	4,617	0,085	1,375	1,136	1,137	0,980
41	40	22	0,171	2910,092	2405,364	2905,124	0,002	0,005	1,259	8,724	4,617	4,485	0,093	1,411	1,137	1,138	0,987
42	41	23	0,176	2900,155	2393,942	2893,506	0,002	0,003	1,259	8,723	4,485	4,349	0,102	1,449	1,138	1,138	0,991
43	42	24	0,180	2886,857	2380,653	2878,999	0,001	0,002	1,259	8,723	4,349	4,212	0,111	1,488	1,138	1,138	0,995
44	43	25	0,185	2871,140	2366,082	2862,451	0,001	0,001	1,259	8,723	4,212	4,075	0,120	1,528	1,139	1,139	0,997
45	44	26	0,190	2853,761	2350,681	2844,531	0,000	0,001	1,259	8,722	4,075	3,940	0,130	1,570	1,139	1,139	0,998

Таблица Б6 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя работающего на СПГ, при $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
φ''	φ_2	α	ε	P_v	T_v	V_a	E_2	λ	m	φ_z							
24	55	1	9,8	1,166	724,7	1,16	39,4867	0,293	3,3	55							
Расчёт процесса сгорания																	
φ_2	φ_1	φ''	$V_{ст}$	T_1, K	T_2, K	T_{1-2}	X_{1-2}	ΔX_{1-2}	k_{1-2}	K_{1-2}	$p_1, \text{МПа}$	$p_2, \text{МПа}$	$\sigma \cdot 10^{-2}$	$\psi(\varphi)$	μ	μ_{1-2}	X
1	0	-24	0,180	724,713	729,708	727,211	0,000	0,000	1,259	8,722	1,157	1,196	0,111	1,488	1,000	1,000	0,000
2	1	-23	0,176	729,708	734,678	732,193	0,000	0,000	1,259	8,722	1,196	1,236	0,102	1,449	1,000	1,000	0,000
3	2	-22	0,171	734,678	739,638	737,159	0,000	0,000	1,259	8,722	1,236	1,277	0,093	1,411	1,000	1,000	0,000
4	3	-21	0,167	739,640	744,625	742,136	0,000	0,000	1,259	8,722	1,277	1,318	0,085	1,375	1,000	1,000	0,000
5	4	-20	0,162	744,632	749,701	747,176	0,000	0,000	1,259	8,722	1,318	1,361	0,078	1,341	1,000	1,000	0,000
6	5	-19	0,159	749,720	754,959	752,360	0,000	0,000	1,259	8,722	1,361	1,404	0,070	1,308	1,000	1,000	0,000
7	6	-18	0,155	755,000	760,521	757,801	0,000	0,000	1,259	8,722	1,404	1,448	0,063	1,277	1,000	1,000	0,001
8	7	-17	0,151	760,601	766,540	763,642	0,000	0,001	1,259	8,722	1,448	1,493	0,056	1,248	1,000	1,000	0,001
9	8	-16	0,148	766,683	773,206	770,062	0,001	0,001	1,259	8,722	1,493	1,539	0,050	1,220	1,000	1,000	0,002
10	9	-15	0,145	773,442	780,738	777,275	0,001	0,002	1,259	8,721	1,539	1,588	0,044	1,193	1,001	1,001	0,003
11	10	-14	0,142	781,109	789,389	785,529	0,001	0,002	1,259	8,721	1,588	1,638	0,038	1,169	1,001	1,001	0,005
12	11	-13	0,139	789,948	799,446	795,103	0,002	0,003	1,259	8,721	1,638	1,691	0,033	1,145	1,001	1,002	0,007
13	12	-12	0,136	800,257	811,222	806,310	0,002	0,004	1,259	8,721	1,691	1,748	0,028	1,124	1,002	1,002	0,010
14	13	-11	0,134	812,363	825,054	819,491	0,003	0,005	1,259	8,721	1,748	1,809	0,024	1,104	1,003	1,003	0,014
15	14	-10	0,132	826,619	841,300	835,007	0,003	0,006	1,259	8,720	1,809	1,875	0,020	1,086	1,004	1,004	0,019
16	15	-9	0,130	843,395	860,326	853,236	0,004	0,008	1,259	8,720	1,875	1,947	0,016	1,070	1,005	1,006	0,026
17	16	-8	0,128	863,077	882,503	874,562	0,005	0,010	1,259	8,720	1,947	2,026	0,013	1,055	1,007	1,008	0,034
18	17	-7	0,126	886,046	908,188	899,362	0,006	0,012	1,259	8,720	2,026	2,112	0,010	1,042	1,009	1,010	0,043
19	18	-6	0,125	912,678	937,714	927,998	0,007	0,014	1,259	8,720	2,112	2,206	0,007	1,031	1,011	1,012	0,055
20	19	-5	0,124	943,317	971,374	960,794	0,008	0,016	1,259	8,720	2,206	2,310	0,005	1,022	1,014	1,015	0,069
21	20	-4	0,123	978,270	1009,404	998,026	0,009	0,019	1,259	8,720	2,310	2,423	0,003	1,014	1,017	1,019	0,085
22	21	-3	0,122	1017,782	1051,964	1039,900	0,011	0,022	1,259	8,720	2,423	2,546	0,002	1,008	1,021	1,023	0,104
23	22	-2	0,122	1062,018	1099,123	1086,534	0,012	0,024	1,259	8,721	2,546	2,679	0,001	1,003	1,025	1,028	0,126
24	23	-1	0,121	1111,050	1150,839	1137,943	0,014	0,027	1,259	8,722	2,679	2,822	0,000	1,001	1,030	1,033	0,150
25	24	0	0,121	1164,835	1206,951	1194,020	0,015	0,030	1,259	8,722	2,822	2,973	0,000	1,000	1,035	1,038	0,177
26	25	1	0,121	1223,206	1267,165	1254,530	0,017	0,033	1,259	8,724	2,973	3,133	0,000	1,001	1,041	1,045	0,208

27	26	2	0,122	1285,855	1331,051	1319,095	0,018	0,036	1,259	8,725	3,133	3,298	0,001	1,003	1,048	1,052	0,241
28	27	3	0,122	1352,336	1398,043	1387,199	0,019	0,039	1,259	8,726	3,298	3,468	0,002	1,008	1,055	1,059	0,277
29	28	4	0,123	1422,063	1467,451	1458,189	0,020	0,041	1,259	8,727	3,468	3,639	0,003	1,014	1,063	1,067	0,315
30	29	5	0,124	1494,315	1538,471	1531,288	0,022	0,043	1,259	8,728	3,639	3,810	0,005	1,022	1,071	1,075	0,356
31	30	6	0,125	1568,260	1610,210	1605,614	0,022	0,045	1,259	8,730	3,810	3,977	0,007	1,031	1,080	1,084	0,399
32	31	7	0,126	1642,967	1681,712	1680,206	0,023	0,046	1,259	8,731	3,977	4,136	0,010	1,042	1,089	1,093	0,444
33	32	8	0,128	1717,444	1751,990	1754,054	0,023	0,046	1,259	8,732	4,136	4,286	0,013	1,055	1,098	1,102	0,490
34	33	9	0,130	1790,664	1820,063	1826,134	0,023	0,046	1,259	8,733	4,286	4,422	0,016	1,070	1,107	1,112	0,536
35	34	10	0,132	1861,604	1884,986	1895,443	0,023	0,046	1,259	8,733	4,422	4,542	0,020	1,086	1,116	1,121	0,582
36	35	11	0,134	1929,282	1945,891	1961,039	0,022	0,044	1,259	8,733	4,542	4,644	0,024	1,104	1,125	1,130	0,628
37	36	12	0,136	1992,795	2002,015	2022,072	0,021	0,043	1,259	8,733	4,644	4,725	0,028	1,124	1,134	1,139	0,673
38	37	13	0,139	2051,348	2052,730	2077,816	0,020	0,040	1,259	8,733	4,725	4,783	0,033	1,145	1,143	1,147	0,715
39	38	14	0,142	2104,284	2097,558	2127,695	0,019	0,037	1,259	8,733	4,783	4,819	0,038	1,169	1,151	1,155	0,756
40	39	15	0,145	2151,106	2136,191	2171,298	0,017	0,034	1,259	8,732	4,819	4,832	0,044	1,193	1,158	1,162	0,793
41	40	16	0,148	2191,490	2168,492	2208,392	0,015	0,031	1,259	8,731	4,832	4,822	0,050	1,220	1,165	1,168	0,827
42	41	17	0,151	2225,294	2194,496	2238,922	0,014	0,027	1,259	8,730	4,822	4,790	0,056	1,248	1,171	1,174	0,858
43	42	18	0,155	2252,551	2214,393	2263,004	0,012	0,024	1,259	8,729	4,790	4,739	0,063	1,277	1,177	1,179	0,885
44	43	19	0,159	2273,457	2228,516	2280,909	0,010	0,020	1,259	8,728	4,739	4,670	0,070	1,308	1,182	1,184	0,909
45	44	20	0,162	2288,360	2237,314	2293,041	0,008	0,017	1,259	8,727	4,670	4,585	0,078	1,341	1,186	1,187	0,929
46	45	21	0,167	2297,723	2241,323	2299,914	0,007	0,014	1,259	8,726	4,585	4,488	0,085	1,375	1,189	1,190	0,946
47	46	22	0,171	2302,104	2241,134	2302,111	0,005	0,011	1,259	8,725	4,488	4,381	0,093	1,411	1,192	1,193	0,959
48	47	23	0,176	2302,118	2237,364	2300,262	0,004	0,008	1,259	8,725	4,381	4,266	0,102	1,449	1,194	1,195	0,970
49	48	24	0,180	2298,406	2230,622	2295,003	0,003	0,006	1,259	8,724	4,266	4,146	0,111	1,488	1,195	1,196	0,979
50	49	25	0,185	2291,601	2221,488	2286,954	0,002	0,005	1,259	8,723	4,146	4,022	0,120	1,528	1,197	1,197	0,985
51	50	26	0,190	2282,306	2210,491	2276,689	0,002	0,003	1,259	8,723	4,022	3,898	0,130	1,570	1,198	1,198	0,990
52	51	27	0,195	2271,072	2198,095	2264,726	0,001	0,002	1,259	8,723	3,898	3,773	0,139	1,613	1,198	1,199	0,993
53	52	28	0,201	2258,381	2184,692	2251,511	0,001	0,002	1,259	8,723	3,773	3,649	0,150	1,658	1,199	1,199	0,996
54	53	29	0,206	2244,640	2170,603	2237,413	0,001	0,001	1,259	8,722	3,649	3,528	0,160	1,704	1,199	1,199	0,997
55	54	30	0,212	2230,185	2156,081	2222,731	0,000	0,001	1,259	8,722	3,528	3,410	0,171	1,752	1,199	1,199	0,998

Таблица Б7 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя работающего на КГТ, при $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
φ''	φ_2	α	ε	P_v	T_v	V_a	E_2	λ	m	φ_z							
20	50	1	9,8	1,34	754,2	1,143	39,79379	0,293	3	50							
Расчёт процесса сгорания																	
φ_2	φ_1	φ''	$V_{ст}$	T_1, K	T_2, K	T_{1-2}	X_{1-2}	ΔX_{1-2}	k_{1-2}	K_{1-2}	$p_1, \text{МПа}$	$p_2, \text{МПа}$	$\sigma \cdot 10^{-2}$	$\psi(\varphi)$	μ	μ_{1-2}	X
1	0	-20	0,162	754,226	759,076	756,651	0,000	0,000	1,259	8,722	1,335	1,378	0,078	1,341	1,000	1,000	0,000
2	1	-19	0,159	759,076	763,868	761,476	0,000	0,000	1,259	8,722	1,378	1,420	0,070	1,308	1,000	1,000	0,000
3	2	-18	0,155	763,876	768,670	766,292	0,000	0,000	1,259	8,722	1,420	1,463	0,063	1,277	1,000	1,000	0,000
4	3	-17	0,151	768,709	773,605	771,218	0,000	0,000	1,259	8,722	1,463	1,506	0,056	1,248	1,000	1,000	0,000
5	4	-16	0,148	773,727	778,848	776,437	0,000	0,000	1,259	8,722	1,506	1,550	0,050	1,220	1,000	1,000	0,000
6	5	-15	0,145	779,147	784,630	782,198	0,000	0,001	1,259	8,722	1,550	1,595	0,044	1,193	1,000	1,000	0,001
7	6	-14	0,142	785,249	791,234	788,816	0,001	0,001	1,259	8,722	1,595	1,641	0,038	1,169	1,000	1,000	0,001
8	7	-13	0,139	792,382	798,997	796,668	0,001	0,002	1,259	8,721	1,641	1,689	0,033	1,145	1,000	1,000	0,003
9	8	-12	0,136	800,954	808,301	806,194	0,001	0,003	1,259	8,721	1,689	1,739	0,028	1,124	1,001	1,001	0,005
10	9	-11	0,134	811,433	819,575	817,887	0,002	0,004	1,259	8,721	1,739	1,794	0,024	1,104	1,001	1,001	0,007
11	10	-10	0,132	824,340	833,282	832,290	0,003	0,005	1,259	8,721	1,794	1,853	0,020	1,086	1,002	1,002	0,011
12	11	-9	0,130	840,239	849,915	849,985	0,003	0,007	1,259	8,720	1,853	1,917	0,016	1,070	1,002	1,003	0,016
13	12	-8	0,128	859,730	869,982	871,580	0,004	0,008	1,259	8,720	1,917	1,989	0,013	1,055	1,003	1,004	0,023
14	13	-7	0,126	883,430	893,991	897,693	0,005	0,010	1,259	8,720	1,989	2,069	0,010	1,042	1,004	1,005	0,031
15	14	-6	0,125	911,957	922,433	928,933	0,006	0,013	1,259	8,720	2,069	2,158	0,007	1,031	1,006	1,007	0,042
16	15	-5	0,124	945,909	955,761	965,872	0,008	0,015	1,259	8,720	2,158	2,258	0,005	1,022	1,008	1,009	0,054
17	16	-4	0,123	985,836	994,366	1009,025	0,009	0,018	1,259	8,720	2,258	2,368	0,003	1,014	1,010	1,011	0,070
18	17	-3	0,122	1032,213	1038,550	1058,811	0,011	0,021	1,259	8,721	2,368	2,491	0,002	1,008	1,012	1,014	0,088
19	18	-2	0,122	1085,409	1088,504	1115,532	0,012	0,025	1,259	8,721	2,491	2,626	0,001	1,003	1,015	1,017	0,110
20	19	-1	0,121	1145,655	1144,279	1179,336	0,014	0,028	1,259	8,722	2,626	2,773	0,000	1,001	1,019	1,021	0,134
21	20	0	0,121	1213,016	1205,768	1250,190	0,016	0,031	1,259	8,723	2,773	2,931	0,000	1,000	1,023	1,025	0,162
22	21	1	0,121	1287,363	1272,685	1327,857	0,017	0,035	1,259	8,725	2,931	3,100	0,000	1,001	1,027	1,029	0,193
23	22	2	0,122	1368,351	1344,558	1411,880	0,019	0,038	1,259	8,726	3,100	3,277	0,001	1,003	1,032	1,034	0,228
24	23	3	0,122	1455,409	1420,726	1501,573	0,020	0,041	1,259	8,728	3,277	3,460	0,002	1,008	1,037	1,040	0,266
25	24	4	0,123	1547,737	1500,346	1596,025	0,022	0,044	1,259	8,729	3,460	3,646	0,003	1,014	1,043	1,046	0,307
26	25	5	0,124	1644,313	1582,412	1694,116	0,023	0,046	1,259	8,731	3,646	3,833	0,005	1,022	1,049	1,052	0,351

27	26	6	0,125	1743,920	1665,781	1794,547	0,024	0,048	1,259	8,733	3,833	4,016	0,007	1,031	1,055	1,058	0,397
28	27	7	0,126	1845,174	1749,217	1895,875	0,024	0,049	1,259	8,734	4,016	4,192	0,010	1,042	1,062	1,065	0,444
29	28	8	0,128	1946,577	1831,430	1996,571	0,025	0,049	1,259	8,735	4,192	4,357	0,013	1,055	1,069	1,072	0,493
30	29	9	0,130	2046,566	1911,130	2095,072	0,025	0,049	1,259	8,736	4,357	4,506	0,016	1,070	1,075	1,079	0,542
31	30	10	0,132	2143,577	1987,080	2189,844	0,024	0,048	1,259	8,736	4,506	4,638	0,020	1,086	1,082	1,086	0,592
32	31	11	0,134	2236,110	2058,143	2279,449	0,023	0,047	1,259	8,736	4,638	4,748	0,024	1,104	1,089	1,092	0,640
33	32	12	0,136	2322,788	2123,335	2362,602	0,022	0,044	1,259	8,736	4,748	4,835	0,028	1,124	1,095	1,098	0,686
34	33	13	0,139	2402,415	2181,859	2438,220	0,021	0,041	1,259	8,736	4,835	4,896	0,033	1,145	1,102	1,104	0,730
35	34	14	0,142	2474,024	2233,135	2505,466	0,019	0,038	1,259	8,735	4,896	4,932	0,038	1,169	1,107	1,110	0,772
36	35	15	0,145	2536,909	2276,820	2563,780	0,017	0,034	1,259	8,734	4,932	4,942	0,044	1,193	1,113	1,115	0,810
37	36	16	0,148	2590,651	2312,807	2612,884	0,015	0,030	1,259	8,733	4,942	4,927	0,050	1,220	1,117	1,119	0,844
38	37	17	0,151	2635,117	2341,221	2652,786	0,013	0,026	1,259	8,731	4,927	4,890	0,056	1,248	1,122	1,123	0,874
39	38	18	0,155	2670,454	2362,393	2683,755	0,011	0,022	1,259	8,730	4,890	4,831	0,063	1,277	1,125	1,127	0,900
40	39	19	0,159	2697,057	2376,829	2706,296	0,009	0,018	1,259	8,729	4,831	4,753	0,070	1,308	1,128	1,130	0,922
41	40	20	0,162	2715,535	2385,172	2721,098	0,008	0,015	1,259	8,727	4,753	4,661	0,078	1,341	1,131	1,132	0,941
42	41	21	0,167	2726,662	2388,152	2728,989	0,006	0,012	1,259	8,726	4,661	4,555	0,085	1,375	1,133	1,134	0,956
43	42	22	0,171	2731,317	2386,547	2730,878	0,005	0,009	1,259	8,725	4,555	4,441	0,093	1,411	1,135	1,135	0,968
44	43	23	0,176	2730,438	2381,136	2727,701	0,003	0,007	1,259	8,725	4,441	4,319	0,102	1,449	1,136	1,136	0,977
45	44	24	0,180	2724,963	2372,660	2720,375	0,003	0,005	1,259	8,724	4,319	4,193	0,111	1,488	1,137	1,137	0,984
46	45	25	0,185	2715,786	2361,798	2709,755	0,002	0,004	1,259	8,723	4,193	4,064	0,120	1,528	1,138	1,138	0,989
47	46	26	0,190	2703,725	2349,143	2696,610	0,001	0,003	1,259	8,723	4,064	3,935	0,130	1,570	1,138	1,138	0,993
48	47	27	0,195	2689,496	2335,197	2681,599	0,001	0,002	1,259	8,723	3,935	3,807	0,139	1,613	1,138	1,139	0,995
49	48	28	0,201	2673,702	2320,364	2665,267	0,001	0,001	1,259	8,722	3,807	3,681	0,150	1,658	1,139	1,139	0,997
50	49	29	0,206	2656,832	2304,964	2648,051	0,000	0,001	1,259	8,722	3,681	3,558	0,160	1,704	1,139	1,139	0,998

Таблица Б8 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя работающего на СПГ, при $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																		
φ''	φ_2	α	ε	P_v	T_v	V_a	E_2	λ	m	φ_z								
25	60	1	9,8	1,11	717,2	1,15	39,4866	0,293	3,3	60								
Расчёт процесса сгорания																		
φ_2	φ_1	φ''	$V_{ст}$	T_1, K	T_2, K	T_{1-2}	X_{1-2}	ΔX_{1-2}	k_{1-2}	K_{1-2}	$p_1, \text{МПа}$	$p_2, \text{МПа}$	$\sigma \cdot 10^{-2}$	$\psi(\varphi)$	μ	μ_{1-2}	X	
1	0	-25	0,185	717,274	722,272	719,773	0,000	0,000	1,259	8,722	1,115	1,153	0,120	1,528	1,000	1,000	0,000	
2	1	-24	0,180	722,272	727,255	724,763	0,000	0,000	1,259	8,722	1,153	1,192	0,111	1,488	1,000	1,000	0,000	
3	2	-23	0,176	727,255	732,230	729,742	0,000	0,000	1,259	8,722	1,192	1,232	0,102	1,449	1,000	1,000	0,000	
4	3	-22	0,171	732,230	737,219	734,724	0,000	0,000	1,259	8,722	1,232	1,273	0,093	1,411	1,000	1,000	0,000	
5	4	-21	0,167	737,219	742,261	739,740	0,000	0,000	1,259	8,722	1,273	1,314	0,085	1,375	1,000	1,000	0,000	
6	5	-20	0,162	742,261	747,416	744,839	0,000	0,000	1,259	8,722	1,314	1,356	0,078	1,341	1,000	1,000	0,000	
7	6	-19	0,159	747,416	752,765	750,091	0,000	0,000	1,259	8,722	1,356	1,400	0,070	1,308	1,000	1,000	0,000	
8	7	-18	0,155	752,765	758,409	755,587	0,000	0,001	1,259	8,722	1,400	1,444	0,063	1,277	1,000	1,000	0,001	
9	8	-17	0,151	758,409	764,473	761,440	0,000	0,001	1,259	8,722	1,444	1,489	0,056	1,248	1,000	1,000	0,001	
10	9	-16	0,148	764,472	771,105	767,788	0,001	0,001	1,259	8,722	1,489	1,535	0,050	1,220	1,000	1,001	0,002	
11	10	-15	0,145	771,105	778,477	774,790	0,001	0,002	1,259	8,722	1,535	1,583	0,044	1,193	1,001	1,001	0,003	
12	11	-14	0,142	778,476	786,783	782,629	0,001	0,002	1,259	8,721	1,583	1,633	0,038	1,169	1,001	1,001	0,005	
13	12	-13	0,139	786,782	796,239	791,510	0,001	0,003	1,259	8,721	1,633	1,685	0,033	1,145	1,001	1,002	0,007	
14	13	-12	0,136	796,238	807,082	801,660	0,002	0,004	1,259	8,721	1,685	1,739	0,028	1,124	1,002	1,002	0,010	
15	14	-11	0,134	807,081	819,566	813,322	0,002	0,004	1,259	8,721	1,739	1,797	0,024	1,104	1,003	1,003	0,013	
16	15	-10	0,132	819,563	833,957	826,758	0,003	0,006	1,259	8,721	1,797	1,858	0,020	1,086	1,004	1,004	0,018	
17	16	-9	0,130	833,953	850,532	842,240	0,003	0,007	1,259	8,720	1,858	1,924	0,016	1,070	1,005	1,005	0,023	
18	17	-8	0,128	850,526	869,572	860,044	0,004	0,008	1,259	8,720	1,924	1,994	0,013	1,055	1,006	1,007	0,030	
19	18	-7	0,126	869,563	891,351	880,450	0,005	0,010	1,259	8,720	1,994	2,070	0,010	1,042	1,008	1,009	0,038	
20	19	-6	0,125	891,337	916,132	903,724	0,006	0,011	1,259	8,720	2,070	2,152	0,007	1,031	1,010	1,011	0,048	
21	20	-5	0,124	916,111	944,158	930,119	0,007	0,013	1,259	8,720	2,152	2,240	0,005	1,022	1,012	1,013	0,059	
22	21	-4	0,123	944,127	975,636	959,859	0,008	0,015	1,259	8,720	2,240	2,336	0,003	1,014	1,015	1,016	0,073	
23	22	-3	0,122	975,592	1010,731	993,131	0,009	0,018	1,259	8,720	2,336	2,438	0,002	1,008	1,018	1,019	0,088	
24	23	-2	0,122	1010,670	1049,555	1030,071	0,010	0,020	1,259	8,720	2,438	2,547	0,001	1,003	1,021	1,023	0,106	
25	24	-1	0,121	1049,471	1092,150	1070,755	0,011	0,022	1,259	8,721	2,547	2,664	0,000	1,001	1,025	1,027	0,126	
26	25	0	0,121	1092,039	1138,486	1115,190	0,012	0,025	1,259	8,721	2,664	2,787	0,000	1,000	1,030	1,032	0,148	

27	26	1	0,121	1138,341	1188,445	1163,301	0,014	0,027	1,259	8,722	2,787	2,917	0,000	1,001	1,034	1,037	0,173
28	27	2	0,122	1188,261	1241,820	1214,926	0,015	0,030	1,259	8,723	2,917	3,051	0,001	1,003	1,040	1,043	0,200
29	28	3	0,122	1241,592	1298,308	1269,811	0,016	0,032	1,259	8,724	3,051	3,189	0,002	1,008	1,046	1,049	0,229
30	29	4	0,123	1298,031	1357,513	1327,607	0,017	0,034	1,259	8,725	3,189	3,330	0,003	1,014	1,052	1,056	0,261
31	30	5	0,124	1357,182	1418,946	1387,871	0,018	0,036	1,259	8,726	3,330	3,472	0,005	1,022	1,059	1,063	0,296
32	31	6	0,125	1418,560	1482,035	1450,076	0,019	0,038	1,259	8,727	3,472	3,613	0,007	1,031	1,066	1,070	0,332
33	32	7	0,126	1481,593	1546,139	1513,616	0,020	0,040	1,259	8,728	3,613	3,750	0,010	1,042	1,074	1,078	0,371
34	33	8	0,128	1545,640	1610,558	1577,822	0,021	0,041	1,259	8,729	3,750	3,881	0,013	1,055	1,082	1,086	0,410
35	34	9	0,130	1610,005	1674,556	1641,979	0,021	0,042	1,259	8,730	3,881	4,005	0,016	1,070	1,090	1,094	0,452
36	35	10	0,132	1673,952	1737,381	1705,342	0,021	0,042	1,259	8,730	4,005	4,119	0,020	1,086	1,099	1,103	0,494
37	36	11	0,134	1736,732	1798,287	1767,164	0,021	0,042	1,259	8,731	4,119	4,221	0,024	1,104	1,107	1,111	0,536
38	37	12	0,136	1797,596	1856,555	1826,713	0,021	0,042	1,259	8,732	4,221	4,309	0,028	1,124	1,116	1,120	0,579
39	38	13	0,139	1855,830	1911,519	1883,299	0,021	0,041	1,259	8,732	4,309	4,381	0,033	1,145	1,124	1,128	0,621
40	39	14	0,142	1910,767	1962,585	1936,289	0,020	0,040	1,259	8,732	4,381	4,437	0,038	1,169	1,132	1,136	0,662
41	40	15	0,145	1961,812	2009,248	1985,135	0,019	0,038	1,259	8,732	4,437	4,474	0,044	1,193	1,140	1,144	0,701
42	41	16	0,148	2008,458	2051,105	2029,382	0,018	0,036	1,259	8,732	4,474	4,494	0,050	1,220	1,148	1,151	0,739
43	42	17	0,151	2050,305	2087,869	2068,685	0,017	0,033	1,259	8,731	4,494	4,495	0,056	1,248	1,155	1,158	0,775
44	43	18	0,155	2087,064	2119,375	2102,816	0,015	0,030	1,259	8,730	4,495	4,478	0,063	1,277	1,161	1,164	0,808
45	44	19	0,159	2118,568	2145,575	2131,668	0,014	0,027	1,259	8,730	4,478	4,445	0,070	1,308	1,167	1,170	0,838
46	45	20	0,162	2144,768	2166,540	2155,252	0,012	0,024	1,259	8,729	4,445	4,395	0,078	1,341	1,173	1,175	0,865
47	46	21	0,167	2165,737	2182,450	2173,694	0,011	0,021	1,259	8,728	4,395	4,332	0,085	1,375	1,178	1,180	0,890
48	47	22	0,171	2181,651	2193,581	2187,219	0,009	0,018	1,259	8,727	4,332	4,256	0,093	1,411	1,182	1,184	0,911
49	48	23	0,176	2192,787	2200,287	2196,143	0,008	0,015	1,259	8,727	4,256	4,169	0,102	1,449	1,186	1,187	0,929
50	49	24	0,180	2199,499	2202,984	2200,851	0,006	0,013	1,259	8,726	4,169	4,073	0,111	1,488	1,189	1,190	0,945
51	50	25	0,185	2202,203	2202,129	2201,778	0,005	0,010	1,259	8,725	4,073	3,971	0,120	1,528	1,191	1,192	0,957
52	51	26	0,190	2201,354	2198,199	2199,392	0,004	0,008	1,259	8,724	3,971	3,863	0,130	1,570	1,193	1,194	0,968
53	52	27	0,195	2197,430	2191,670	2194,169	0,003	0,007	1,259	8,724	3,863	3,752	0,139	1,613	1,195	1,196	0,976
54	53	28	0,201	2190,907	2183,003	2186,577	0,003	0,005	1,259	8,723	3,752	3,640	0,150	1,658	1,196	1,197	0,983
55	54	29	0,206	2182,246	2172,626	2177,061	0,002	0,004	1,259	8,723	3,640	3,527	0,160	1,704	1,197	1,198	0,988
56	55	30	0,212	2171,875	2160,927	2166,028	0,001	0,003	1,259	8,723	3,527	3,414	0,171	1,752	1,198	1,198	0,991
57	56	31	0,218	2160,181	2148,242	2153,842	0,001	0,002	1,259	8,723	3,414	3,303	0,182	1,801	1,199	1,199	0,994
58	57	32	0,224	2147,502	2134,859	2140,813	0,001	0,001	1,259	8,722	3,303	3,194	0,193	1,851	1,199	1,199	0,996
59	58	33	0,231	2134,125	2121,012	2127,204	0,000	0,001	1,259	8,722	3,194	3,089	0,205	1,903	1,199	1,199	0,997

60	59	34	0,237	2120,283	2106,888	2113,224	0,000	0,001	1,259	8,722	3,089	2,986	0,217	1,955	1,199	1,199	0,998
----	----	----	-------	----------	----------	----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Таблица Б9 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя работающего на КГТ, при $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																					
φ''	φ_2	α	ε	P_v	T_v	V_a	E_2	λ	m	φ_z											
24	55	1	9,8	1,16	724,7	1,11	39,7939	0,293	3	55	Расчёт процесса сгорания										
φ_2	φ_1	φ''	$V_{ст}$	T_1, K	T_2, K	T_{1-2}	X_{1-2}	ΔX_{1-2}	k_{1-2}	K_{1-2}	$p_1, \text{МПа}$	$p_2, \text{МПа}$	$\sigma \cdot 10^{-2}$	$\psi(\varphi)$	μ	μ_{1-2}	X				
1	0	-24	0,180	724,713	729,709	727,211	0,000	0,000	1,259	8,722	1,157	1,196	0,111	1,488	1,000	1,000	0,000				
2	1	-23	0,176	729,709	734,694	732,202	0,000	0,000	1,259	8,722	1,196	1,236	0,102	1,449	1,000	1,000	0,000				
3	2	-22	0,171	734,695	739,715	737,208	0,000	0,000	1,259	8,722	1,236	1,277	0,093	1,411	1,000	1,000	0,000				
4	3	-21	0,167	739,720	744,851	742,294	0,000	0,000	1,259	8,722	1,277	1,319	0,085	1,375	1,000	1,000	0,000				
5	4	-20	0,162	744,867	750,223	747,565	0,000	0,000	1,259	8,722	1,319	1,362	0,078	1,341	1,000	1,000	0,000				
6	5	-19	0,159	750,262	755,986	753,165	0,000	0,001	1,259	8,722	1,362	1,406	0,070	1,308	1,000	1,000	0,000				
7	6	-18	0,155	756,067	762,331	759,274	0,000	0,001	1,259	8,722	1,406	1,451	0,063	1,277	1,000	1,000	0,001				
8	7	-17	0,151	762,481	769,487	766,112	0,001	0,001	1,259	8,722	1,451	1,499	0,056	1,248	1,000	1,000	0,002				
9	8	-16	0,148	769,743	777,716	773,935	0,001	0,002	1,259	8,721	1,499	1,548	0,050	1,220	1,000	1,001	0,003				
10	9	-15	0,145	778,126	787,313	783,031	0,001	0,003	1,259	8,721	1,548	1,601	0,044	1,193	1,001	1,001	0,005				
11	10	-14	0,142	787,936	798,600	793,724	0,002	0,003	1,259	8,721	1,601	1,657	0,038	1,169	1,001	1,001	0,008				
12	11	-13	0,139	799,511	811,925	806,362	0,002	0,005	1,259	8,721	1,657	1,718	0,033	1,145	1,002	1,002	0,011				
13	12	-12	0,136	813,214	827,656	821,319	0,003	0,006	1,259	8,720	1,718	1,784	0,028	1,124	1,002	1,003	0,016				
14	13	-11	0,134	829,425	846,170	838,982	0,004	0,007	1,259	8,720	1,784	1,856	0,024	1,104	1,003	1,003	0,021				
15	14	-10	0,132	848,540	867,848	859,747	0,004	0,009	1,259	8,720	1,856	1,935	0,020	1,086	1,004	1,005	0,029				
16	15	-9	0,130	870,954	893,062	884,004	0,005	0,011	1,259	8,720	1,935	2,021	0,016	1,070	1,005	1,006	0,037				
17	16	-8	0,128	897,054	922,160	912,130	0,006	0,013	1,259	8,720	2,021	2,116	0,013	1,055	1,007	1,008	0,048				
18	17	-7	0,126	927,206	955,459	944,471	0,008	0,015	1,259	8,720	2,116	2,221	0,010	1,042	1,008	1,010	0,061				
19	18	-6	0,125	961,737	993,221	981,329	0,009	0,018	1,259	8,720	2,221	2,336	0,007	1,031	1,011	1,012	0,076				
20	19	-5	0,124	1000,921	1035,644	1022,943	0,010	0,020	1,259	8,720	2,336	2,460	0,005	1,022	1,013	1,014	0,094				
21	20	-4	0,123	1044,965	1082,840	1069,475	0,011	0,023	1,259	8,721	2,460	2,596	0,003	1,014	1,016	1,017	0,114				
22	21	-3	0,122	1093,985	1134,824	1120,992	0,013	0,026	1,259	8,721	2,596	2,741	0,002	1,008	1,019	1,021	0,137				
23	22	-2	0,122	1147,999	1191,501	1177,453	0,014	0,028	1,259	8,722	2,741	2,896	0,001	1,003	1,023	1,025	0,162				

24	23	-1	0,121	1206,906	1252,651	1238,693	0,016	0,031	1,259	8,723	2,896	3,059	0,000	1,001	1,026	1,029	0,190
25	24	0	0,121	1270,480	1317,928	1304,420	0,017	0,034	1,259	8,724	3,059	3,230	0,000	1,000	1,031	1,033	0,222
26	25	1	0,121	1338,359	1386,854	1374,204	0,018	0,036	1,259	8,725	3,230	3,406	0,000	1,001	1,036	1,038	0,255
27	26	2	0,122	1410,048	1458,825	1447,483	0,019	0,039	1,259	8,727	3,406	3,586	0,001	1,003	1,041	1,043	0,292
28	27	3	0,122	1484,918	1533,121	1523,568	0,020	0,041	1,259	8,728	3,586	3,766	0,002	1,008	1,046	1,049	0,330
29	28	4	0,123	1562,219	1608,918	1601,657	0,021	0,042	1,259	8,729	3,766	3,943	0,003	1,014	1,052	1,055	0,371
30	29	5	0,124	1641,095	1685,314	1680,852	0,022	0,044	1,259	8,730	3,943	4,116	0,005	1,022	1,058	1,061	0,414
31	30	6	0,125	1720,608	1761,353	1760,186	0,022	0,045	1,259	8,731	4,116	4,280	0,007	1,031	1,064	1,067	0,457
32	31	7	0,126	1799,763	1836,053	1838,651	0,022	0,045	1,259	8,732	4,280	4,432	0,010	1,042	1,070	1,073	0,502
33	32	8	0,128	1877,539	1908,442	1915,231	0,022	0,045	1,259	8,733	4,432	4,570	0,013	1,055	1,076	1,079	0,547
34	33	9	0,130	1952,923	1977,589	1988,935	0,022	0,044	1,259	8,733	4,570	4,691	0,016	1,070	1,082	1,085	0,592
35	34	10	0,132	2024,947	2042,633	2058,831	0,021	0,043	1,259	8,734	4,691	4,793	0,020	1,086	1,088	1,091	0,635
36	35	11	0,134	2092,716	2102,818	2124,079	0,020	0,041	1,259	8,734	4,793	4,873	0,024	1,104	1,094	1,097	0,678
37	36	12	0,136	2155,442	2157,515	2183,955	0,019	0,038	1,259	8,733	4,873	4,931	0,028	1,124	1,100	1,103	0,719
38	37	13	0,139	2212,469	2206,239	2237,882	0,018	0,036	1,259	8,733	4,931	4,966	0,033	1,145	1,105	1,108	0,757
39	38	14	0,142	2263,294	2248,666	2285,437	0,016	0,033	1,259	8,732	4,966	4,978	0,038	1,169	1,110	1,113	0,793
40	39	15	0,145	2307,579	2284,637	2326,368	0,015	0,030	1,259	8,731	4,978	4,968	0,044	1,193	1,115	1,117	0,826
41	40	16	0,148	2345,156	2314,154	2360,593	0,013	0,026	1,259	8,730	4,968	4,936	0,050	1,220	1,119	1,121	0,855
42	41	17	0,151	2376,029	2337,373	2388,194	0,011	0,023	1,259	8,729	4,936	4,885	0,056	1,248	1,123	1,124	0,882
43	42	18	0,155	2400,359	2354,590	2409,404	0,010	0,020	1,259	8,728	4,885	4,817	0,063	1,277	1,126	1,127	0,905
44	43	19	0,159	2418,449	2366,211	2424,588	0,008	0,017	1,259	8,727	4,817	4,733	0,070	1,308	1,129	1,130	0,924
45	44	20	0,162	2430,726	2372,736	2434,217	0,007	0,014	1,259	8,727	4,733	4,636	0,078	1,341	1,131	1,132	0,941
46	45	21	0,167	2437,707	2374,726	2438,840	0,006	0,011	1,259	8,726	4,636	4,529	0,085	1,375	1,133	1,134	0,955
47	46	22	0,171	2439,974	2372,774	2439,058	0,004	0,009	1,259	8,725	4,529	4,414	0,093	1,411	1,134	1,135	0,966
48	47	23	0,176	2438,143	2367,478	2435,490	0,003	0,007	1,259	8,724	4,414	4,293	0,102	1,449	1,136	1,136	0,975
49	48	24	0,180	2432,836	2359,418	2428,746	0,003	0,005	1,259	8,724	4,293	4,168	0,111	1,488	1,137	1,137	0,982
50	49	25	0,185	2424,657	2349,136	2419,411	0,002	0,004	1,259	8,723	4,168	4,042	0,120	1,528	1,137	1,138	0,987
51	50	26	0,190	2414,166	2337,119	2408,019	0,001	0,003	1,259	8,723	4,042	3,915	0,130	1,570	1,138	1,138	0,991
52	51	27	0,195	2401,872	2323,794	2395,045	0,001	0,002	1,259	8,723	3,915	3,788	0,139	1,613	1,138	1,138	0,994
53	52	28	0,201	2388,218	2309,521	2380,897	0,001	0,001	1,259	8,722	3,788	3,664	0,150	1,658	1,139	1,139	0,996
54	53	29	0,206	2373,576	2294,595	2365,915	0,000	0,001	1,259	8,722	3,664	3,542	0,160	1,704	1,139	1,139	0,997
55	54	30	0,212	2358,255	2279,252	2350,376	0,000	0,001	1,259	8,722	3,542	3,423	0,171	1,752	1,139	1,139	0,998

Таблица Б10 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя работающего на СПГ, при $n = 5200 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
φ''	φ_2	α	ε	P_y	T_y	V_a	E_2	λ	m	φ_z							
30	65	1	9,8	0,92	680,5	1,121	39,4867	0,293	3	65							
Расчёт процесса сгорания																	
φ_2	φ_1	φ''	$V_{ст}$	T_1, K	T_2, K	T_{1-2}	X_{1-2}	ΔX_{1-2}	k_{1-2}	K_{1-2}	$p_1, \text{МПа}$	$p_2, \text{МПа}$	$\sigma^* 10^{-2}$	$\psi(\varphi)$	μ	μ_{1-2}	X
1	0	-30	0,212	680,514	685,386	682,950	0,000	0,000	1,259	8,722	0,922	0,955	0,171	1,752	1,000	1,000	0,000
2	1	-29	0,206	685,386	690,294	687,840	0,000	0,000	1,259	8,722	0,955	0,989	0,160	1,704	1,000	1,000	0,000
3	2	-28	0,201	690,294	695,259	692,776	0,000	0,000	1,259	8,722	0,989	1,023	0,150	1,658	1,000	1,000	0,000
4	3	-27	0,195	695,259	700,321	697,790	0,000	0,000	1,259	8,722	1,023	1,059	0,139	1,613	1,000	1,000	0,000
5	4	-26	0,190	700,321	705,538	702,929	0,000	0,000	1,259	8,722	1,059	1,096	0,130	1,570	1,000	1,000	0,000
6	5	-25	0,185	705,538	710,986	708,262	0,000	0,000	1,259	8,722	1,096	1,135	0,120	1,528	1,000	1,000	0,000
7	6	-24	0,180	710,986	716,760	713,873	0,000	0,000	1,259	8,722	1,135	1,175	0,111	1,488	1,000	1,000	0,001
8	7	-23	0,176	716,760	722,971	719,865	0,000	0,001	1,259	8,722	1,175	1,217	0,102	1,449	1,000	1,000	0,001
9	8	-22	0,171	722,971	729,749	726,360	0,000	0,001	1,259	8,722	1,217	1,260	0,093	1,411	1,000	1,000	0,002
10	9	-21	0,167	729,749	737,240	733,495	0,001	0,001	1,259	8,722	1,260	1,306	0,085	1,375	1,001	1,001	0,003
11	10	-20	0,162	737,240	745,607	741,424	0,001	0,002	1,259	8,721	1,306	1,354	0,078	1,341	1,001	1,001	0,004
12	11	-19	0,159	745,607	755,026	750,316	0,001	0,002	1,259	8,721	1,354	1,406	0,070	1,308	1,001	1,001	0,006
13	12	-18	0,155	755,026	765,687	760,357	0,001	0,003	1,259	8,721	1,406	1,460	0,063	1,277	1,002	1,002	0,008
14	13	-17	0,151	765,687	777,792	771,740	0,002	0,004	1,259	8,721	1,460	1,518	0,056	1,248	1,002	1,003	0,011
15	14	-16	0,148	777,792	791,548	784,670	0,002	0,005	1,259	8,721	1,518	1,580	0,050	1,220	1,003	1,003	0,015
16	15	-15	0,145	791,548	807,170	799,359	0,003	0,006	1,259	8,720	1,580	1,647	0,044	1,193	1,004	1,004	0,019
17	16	-14	0,142	807,170	824,871	816,021	0,003	0,007	1,259	8,720	1,647	1,719	0,038	1,169	1,005	1,006	0,025
18	17	-13	0,139	824,871	844,862	834,867	0,004	0,008	1,259	8,720	1,719	1,797	0,033	1,145	1,006	1,007	0,032
19	18	-12	0,136	844,862	867,344	856,103	0,005	0,009	1,259	8,720	1,797	1,881	0,028	1,124	1,008	1,009	0,040
20	19	-11	0,134	867,344	892,501	879,922	0,005	0,011	1,259	8,720	1,881	1,972	0,024	1,104	1,010	1,011	0,049
21	20	-10	0,132	892,501	920,499	906,500	0,006	0,012	1,259	8,720	1,972	2,070	0,020	1,086	1,012	1,013	0,060
22	21	-9	0,130	920,499	951,471	935,985	0,007	0,014	1,259	8,720	2,070	2,175	0,016	1,070	1,014	1,016	0,072
23	22	-8	0,128	951,471	985,520	968,496	0,008	0,016	1,259	8,720	2,175	2,287	0,013	1,055	1,017	1,019	0,087
24	23	-7	0,126	985,520	1022,703	1004,112	0,009	0,018	1,259	8,720	2,287	2,407	0,010	1,042	1,020	1,022	0,103
25	24	-6	0,125	1022,703	1063,031	1042,867	0,010	0,020	1,259	8,721	2,407	2,535	0,007	1,031	1,024	1,026	0,120
26	25	-5	0,124	1063,031	1106,459	1084,745	0,011	0,022	1,259	8,721	2,535	2,669	0,005	1,022	1,028	1,030	0,140

27	26	-4	0,123	1106,459	1152,885	1129,672	0,012	0,024	1,259	8,722	2,669	2,810	0,003	1,014	1,032	1,035	0,162
28	27	-3	0,122	1152,885	1202,146	1177,515	0,013	0,026	1,259	8,722	2,810	2,957	0,002	1,008	1,037	1,040	0,186
29	28	-2	0,122	1202,146	1254,014	1228,080	0,014	0,028	1,259	8,723	2,957	3,109	0,001	1,003	1,042	1,045	0,212
30	29	-1	0,121	1254,014	1308,199	1281,106	0,015	0,030	1,259	8,724	3,109	3,264	0,000	1,001	1,048	1,051	0,239
31	30	0	0,121	1308,199	1364,351	1336,275	0,016	0,031	1,259	8,725	3,264	3,421	0,000	1,000	1,054	1,057	0,269
32	31	1	0,121	1364,351	1422,065	1393,208	0,017	0,033	1,259	8,725	3,421	3,578	0,000	1,001	1,060	1,063	0,301
33	32	2	0,122	1422,065	1480,885	1451,475	0,017	0,034	1,259	8,726	3,578	3,733	0,001	1,003	1,067	1,070	0,334
34	33	3	0,122	1480,885	1540,316	1510,601	0,018	0,036	1,259	8,727	3,733	3,885	0,002	1,008	1,073	1,077	0,368
35	34	4	0,123	1540,316	1599,833	1570,074	0,018	0,037	1,259	8,728	3,885	4,031	0,003	1,014	1,081	1,084	0,404
36	35	5	0,124	1599,833	1658,891	1629,362	0,019	0,037	1,259	8,729	4,031	4,170	0,005	1,022	1,088	1,092	0,441
37	36	6	0,125	1658,891	1716,940	1687,915	0,019	0,038	1,259	8,729	4,170	4,299	0,007	1,031	1,095	1,099	0,478
38	37	7	0,126	1716,940	1773,437	1745,188	0,019	0,038	1,259	8,730	4,299	4,416	0,010	1,042	1,103	1,107	0,516
39	38	8	0,128	1773,437	1827,859	1800,648	0,019	0,038	1,259	8,730	4,416	4,520	0,013	1,055	1,111	1,114	0,554
40	39	9	0,130	1827,859	1879,716	1853,787	0,019	0,037	1,259	8,731	4,520	4,609	0,016	1,070	1,118	1,122	0,592
41	40	10	0,132	1879,716	1928,560	1904,138	0,018	0,036	1,259	8,731	4,609	4,682	0,020	1,086	1,126	1,129	0,629
42	41	11	0,134	1928,560	1974,000	1951,280	0,018	0,035	1,259	8,731	4,682	4,738	0,024	1,104	1,133	1,136	0,665
43	42	12	0,136	1973,999	2015,704	1994,851	0,017	0,034	1,259	8,731	4,738	4,776	0,028	1,124	1,140	1,143	0,700
44	43	13	0,139	2015,704	2053,412	2034,558	0,016	0,032	1,259	8,731	4,776	4,797	0,033	1,145	1,146	1,150	0,734
45	44	14	0,142	2053,412	2086,936	2070,173	0,015	0,030	1,259	8,730	4,797	4,800	0,038	1,169	1,153	1,156	0,766
46	45	15	0,145	2086,935	2116,162	2101,549	0,014	0,028	1,259	8,730	4,800	4,786	0,044	1,193	1,159	1,162	0,795
47	46	16	0,148	2116,162	2141,055	2128,609	0,013	0,025	1,259	8,729	4,786	4,755	0,050	1,220	1,164	1,167	0,823
48	47	17	0,151	2141,055	2161,649	2151,352	0,012	0,023	1,259	8,729	4,755	4,709	0,056	1,248	1,169	1,172	0,849
49	48	18	0,155	2161,649	2178,049	2169,849	0,010	0,021	1,259	8,728	4,709	4,649	0,063	1,277	1,174	1,176	0,872
50	49	19	0,159	2178,049	2190,419	2184,234	0,009	0,018	1,259	8,727	4,649	4,576	0,070	1,308	1,178	1,180	0,893
51	50	20	0,162	2190,419	2198,981	2194,700	0,008	0,016	1,259	8,727	4,576	4,493	0,078	1,341	1,182	1,184	0,911
52	51	21	0,167	2198,980	2203,997	2201,488	0,007	0,014	1,259	8,726	4,493	4,400	0,085	1,375	1,185	1,187	0,927
53	52	22	0,171	2203,997	2205,767	2204,882	0,006	0,012	1,259	8,726	4,400	4,299	0,093	1,411	1,188	1,189	0,941
54	53	23	0,176	2205,766	2204,612	2205,189	0,005	0,010	1,259	8,725	4,299	4,192	0,102	1,449	1,190	1,191	0,953
55	54	24	0,180	2204,612	2200,869	2202,740	0,004	0,008	1,259	8,724	4,192	4,080	0,111	1,488	1,192	1,193	0,963
56	55	25	0,185	2200,869	2194,874	2197,871	0,003	0,007	1,259	8,724	4,080	3,965	0,120	1,528	1,194	1,195	0,971
57	56	26	0,190	2194,874	2186,958	2190,916	0,003	0,005	1,259	8,724	3,965	3,849	0,130	1,570	1,195	1,196	0,978
58	57	27	0,195	2186,958	2177,438	2182,198	0,002	0,004	1,259	8,723	3,849	3,732	0,139	1,613	1,196	1,197	0,983
59	58	28	0,201	2177,438	2166,608	2172,023	0,002	0,003	1,259	8,723	3,732	3,615	0,150	1,658	1,197	1,198	0,987

60	59	29	0,206	2166,608	2154,736	2160,672	0,001	0,003	1,259	8,723	3,615	3,499	0,160	1,704	1,198	1,198	0,991
61	60	30	0,212	2154,736	2142,060	2148,398	0,001	0,002	1,259	8,723	3,499	3,385	0,171	1,752	1,198	1,199	0,993
62	61	31	0,218	2142,060	2128,789	2135,424	0,001	0,001	1,259	8,722	3,385	3,274	0,182	1,801	1,199	1,199	0,995
63	62	32	0,224	2128,789	2115,099	2121,944	0,001	0,001	1,259	8,722	3,274	3,165	0,193	1,851	1,199	1,199	0,997
64	63	33	0,231	2115,098	2101,136	2108,117	0,000	0,001	1,259	8,722	3,165	3,060	0,205	1,903	1,199	1,199	0,998
65	64	34	0,237	2101,136	2087,022	2094,079	0,000	0,001	1,259	8,722	3,060	2,958	0,217	1,955	1,199	1,199	0,998

Таблица Б11 - Результаты теплового расчета проектируемого двигателя работающего на КГТ, при $n = 5200 \text{ мин}^{-1}$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ																	
φ''	φ_2	α	ε	P_v	T_v	V_a	E_2	λ	m	φ_z							
25	60	1	9,8	1,12	717,3	1,01	42,4467	0,293	2,7	60							
Расчёт процесса сгорания																	
φ_2	φ_1	φ''	$V_{ст}$	T_1, K	T_2, K	T_{1-2}	X_{1-2}	ΔX_{1-2}	k_{1-2}	K_{1-2}	$p_1, \text{МПа}$	$p_2, \text{МПа}$	$\sigma \cdot 10^{-2}$	$\psi(\varphi)$	μ	μ_{1-2}	X
1	0	-25	0,185	717,274	722,277	719,776	0,000	0,000	1,259	8,722	1,115	1,153	0,120	1,528	1,000	1,000	0,000
2	1	-24	0,180	722,277	727,323	724,800	0,000	0,000	1,259	8,722	1,153	1,192	0,111	1,488	1,000	1,000	0,000
3	2	-23	0,176	727,323	732,525	729,924	0,000	0,000	1,259	8,722	1,192	1,232	0,102	1,449	1,000	1,000	0,000
4	3	-22	0,171	732,525	738,052	735,289	0,000	0,000	1,259	8,722	1,232	1,274	0,093	1,411	1,000	1,000	0,000
5	4	-21	0,167	738,052	744,121	741,087	0,000	0,001	1,259	8,722	1,274	1,318	0,085	1,375	1,000	1,000	0,000
6	5	-20	0,162	744,121	750,991	747,556	0,000	0,001	1,259	8,722	1,318	1,363	0,078	1,341	1,000	1,000	0,001
7	6	-19	0,159	750,991	758,958	754,974	0,001	0,001	1,259	8,722	1,363	1,412	0,070	1,308	1,000	1,000	0,002
8	7	-18	0,155	758,958	768,355	763,657	0,001	0,002	1,259	8,721	1,412	1,463	0,063	1,277	1,000	1,001	0,003
9	8	-17	0,151	768,355	779,545	773,950	0,001	0,003	1,259	8,721	1,463	1,519	0,056	1,248	1,001	1,001	0,005
10	9	-16	0,148	779,545	792,910	786,227	0,002	0,004	1,259	8,721	1,519	1,580	0,050	1,220	1,001	1,001	0,008
11	10	-15	0,145	792,910	808,855	800,883	0,003	0,005	1,259	8,721	1,580	1,647	0,044	1,193	1,002	1,002	0,013
12	11	-14	0,142	808,855	827,788	818,321	0,003	0,007	1,259	8,720	1,647	1,721	0,038	1,169	1,002	1,003	0,018
13	12	-13	0,139	827,788	850,116	838,952	0,004	0,008	1,259	8,720	1,721	1,803	0,033	1,145	1,003	1,004	0,024
14	13	-12	0,136	850,116	876,235	863,176	0,005	0,010	1,259	8,720	1,803	1,894	0,028	1,124	1,005	1,005	0,033
15	14	-11	0,134	876,235	906,512	891,373	0,006	0,012	1,259	8,720	1,894	1,995	0,024	1,104	1,006	1,007	0,043
16	15	-10	0,132	906,512	941,271	923,891	0,007	0,014	1,259	8,720	1,995	2,107	0,020	1,086	1,008	1,009	0,055
17	16	-9	0,130	941,271	980,783	961,027	0,008	0,017	1,259	8,720	2,107	2,230	0,016	1,070	1,010	1,011	0,069
18	17	-8	0,128	980,783	1025,246	1003,015	0,010	0,019	1,259	8,720	2,230	2,366	0,013	1,055	1,012	1,013	0,086

19	18	-7	0,126	1025,246	1074,770	1050,008	0,011	0,022	1,259	8,721	2,366	2,515	0,010	1,042	1,015	1,016	0,105
20	19	-6	0,125	1074,770	1129,363	1102,066	0,012	0,024	1,259	8,721	2,515	2,675	0,007	1,031	1,018	1,019	0,127
21	20	-5	0,124	1129,363	1188,923	1159,143	0,014	0,027	1,259	8,722	2,675	2,848	0,005	1,022	1,021	1,023	0,151
22	21	-4	0,123	1188,923	1253,224	1221,073	0,015	0,030	1,259	8,723	2,848	3,032	0,003	1,014	1,025	1,027	0,178
23	22	-3	0,122	1253,224	1321,913	1287,568	0,016	0,032	1,259	8,724	3,032	3,225	0,002	1,008	1,029	1,031	0,208
24	23	-2	0,122	1321,913	1394,513	1358,213	0,017	0,035	1,259	8,725	3,225	3,427	0,001	1,003	1,033	1,036	0,240
25	24	-1	0,121	1394,512	1470,420	1432,466	0,019	0,037	1,259	8,726	3,427	3,634	0,000	1,001	1,038	1,041	0,275
26	25	0	0,121	1470,420	1548,920	1509,670	0,020	0,039	1,259	8,728	3,634	3,844	0,000	1,000	1,043	1,046	0,312
27	26	1	0,121	1548,920	1629,204	1589,062	0,020	0,041	1,259	8,729	3,844	4,054	0,000	1,001	1,049	1,052	0,351
28	27	2	0,122	1629,204	1710,382	1669,793	0,021	0,042	1,259	8,730	4,054	4,261	0,001	1,003	1,054	1,057	0,391
29	28	3	0,122	1710,382	1791,514	1750,948	0,021	0,043	1,259	8,731	4,261	4,461	0,002	1,008	1,060	1,063	0,433
30	29	4	0,123	1791,514	1871,635	1831,574	0,022	0,043	1,259	8,732	4,461	4,651	0,003	1,014	1,066	1,069	0,476
31	30	5	0,124	1871,634	1949,782	1910,708	0,022	0,043	1,259	8,733	4,651	4,828	0,005	1,022	1,072	1,075	0,520
32	31	6	0,125	1949,781	2025,027	1987,404	0,021	0,043	1,259	8,733	4,828	4,987	0,007	1,031	1,078	1,081	0,563
33	32	7	0,126	2025,027	2096,505	2060,766	0,021	0,042	1,259	8,733	4,987	5,128	0,010	1,042	1,084	1,087	0,606
34	33	8	0,128	2096,505	2163,438	2129,971	0,020	0,040	1,259	8,733	5,128	5,247	0,013	1,055	1,090	1,093	0,648
35	34	9	0,130	2163,437	2225,159	2194,298	0,019	0,039	1,259	8,733	5,247	5,342	0,016	1,070	1,096	1,098	0,688
36	35	10	0,132	2225,158	2281,131	2253,144	0,018	0,036	1,259	8,733	5,342	5,412	0,020	1,086	1,101	1,104	0,727
37	36	11	0,134	2281,130	2330,958	2306,044	0,017	0,034	1,259	8,732	5,412	5,458	0,024	1,104	1,106	1,108	0,763
38	37	12	0,136	2330,958	2374,395	2352,676	0,015	0,031	1,259	8,732	5,458	5,478	0,028	1,124	1,111	1,113	0,797
39	38	13	0,139	2374,394	2411,342	2392,868	0,014	0,028	1,259	8,731	5,478	5,473	0,033	1,145	1,115	1,117	0,828
40	39	14	0,142	2411,341	2441,846	2426,594	0,012	0,025	1,259	8,730	5,473	5,445	0,038	1,169	1,119	1,121	0,856
41	40	15	0,145	2441,846	2466,088	2453,967	0,011	0,022	1,259	8,729	5,445	5,396	0,044	1,193	1,122	1,124	0,881
42	41	16	0,148	2466,088	2484,364	2475,225	0,010	0,019	1,259	8,728	5,396	5,328	0,050	1,220	1,126	1,127	0,903
43	42	17	0,151	2484,363	2497,069	2490,716	0,008	0,016	1,259	8,727	5,328	5,243	0,056	1,248	1,128	1,129	0,922
44	43	18	0,155	2497,068	2504,674	2500,871	0,007	0,014	1,259	8,727	5,243	5,143	0,063	1,277	1,130	1,131	0,938
45	44	19	0,159	2504,674	2507,703	2506,188	0,006	0,011	1,259	8,726	5,143	5,031	0,070	1,308	1,132	1,133	0,951
46	45	20	0,162	2507,702	2506,707	2507,204	0,005	0,009	1,259	8,725	5,031	4,909	0,078	1,341	1,134	1,135	0,963
47	46	21	0,167	2506,706	2502,245	2504,475	0,004	0,007	1,259	8,724	4,909	4,781	0,085	1,375	1,135	1,136	0,972
48	47	22	0,171	2502,244	2494,861	2498,552	0,003	0,006	1,259	8,724	4,781	4,647	0,093	1,411	1,136	1,137	0,979
49	48	23	0,176	2494,860	2485,069	2489,964	0,002	0,004	1,259	8,723	4,647	4,511	0,102	1,449	1,137	1,137	0,985
50	49	24	0,180	2485,069	2473,342	2479,205	0,002	0,003	1,259	8,723	4,511	4,373	0,111	1,488	1,138	1,138	0,989
51	50	25	0,185	2473,342	2460,100	2466,721	0,001	0,002	1,259	8,723	4,373	4,235	0,120	1,528	1,138	1,138	0,992

52	51	26	0,190	2460,100	2445,707	2452,903	0,001	0,002	1,259	8,723	4,235	4,098	0,130	1,570	1,138	1,138	0,995
53	52	27	0,195	2445,707	2430,472	2438,089	0,001	0,001	1,259	8,722	4,098	3,963	0,139	1,613	1,139	1,139	0,996
54	53	28	0,201	2430,472	2414,649	2422,560	0,000	0,001	1,259	8,722	3,963	3,831	0,150	1,658	1,139	1,139	0,998
55	54	29	0,206	2414,649	2398,442	2406,545	0,000	0,001	1,259	8,722	3,831	3,702	0,160	1,704	1,139	1,139	0,998
56	55	30	0,212	2398,442	2382,012	2390,227	0,000	0,000	1,259	8,722	3,702	3,577	0,171	1,752	1,139	1,139	0,999
57	56	31	0,218	2382,012	2365,483	2373,747	0,000	0,000	1,259	8,722	3,577	3,456	0,182	1,801	1,139	1,139	0,999
58	57	32	0,224	2365,483	2348,949	2357,216	0,000	0,000	1,259	8,722	3,456	3,339	0,193	1,851	1,139	1,139	1,000
59	58	33	0,231	2348,948	2332,478	2340,713	0,000	0,000	1,259	8,722	3,339	3,226	0,205	1,903	1,139	1,139	1,000
60	59	34	0,237	2332,477	2316,121	2324,299	0,000	0,000	1,259	8,722	3,226	3,117	0,217	1,955	1,139	1,139	1,000