

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт энергетики и электротехники
(наименование института полностью)
Кафедра «Энергетические машины и системы управления»
(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой ЭМиСУ
_____ Д.А. Павлов
(подпись) (И.О. Фамилия)
« ___ » _____ 2017г

ЗАДАНИЕ
на выполнение бакалаврской работы

Студент Панкратов Максим Михайлович

1. Тема Модернизация форсунки в двигателе с непосредственным впрыском на базе 11194

2. Срок сдачи студентом законченной бакалаврской работы 24 июня согласно утвержденному графику защиты ВКР на 2016 – 2017 учебный год

3. Исходные данные к бакалаврской работе Двигатель на базе ВАЗ – 11194 с системой непосредственного впрыска, рабочий объем 1,4 л. Степень сжатия $\epsilon = 10,8$. Форсунка на базе BOSCH VAG 06H906036H

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов, разделов) Тепловой расчет двигателя; Расчет кинематики и динамики двигателя; Расчет основных деталей двигателя; Обзор состояния вопроса. Модернизация форсунки. Расчет форсунки.

5. Ориентировочный перечень графического и иллюстративного материала Продольный поперечный разрез двигателя – 2 листа формата А1

Диаграмма теплового расчет – 1 лист формата А1

Диаграмма кинематического и динамического расчетов – 2 листа формата А1

Конструкторский чертеж форсунки – 1 лист формата А1

6. Консультанты по разделам

М.И. Фесин

А.Г. Егоров

О.Н. Брега

А.М. Дзюбан

7. Дата выдачи задания « ___ » _____ 2017 г.

Руководитель бакалаврской работы

(подпись)

А.М. Дзюбан

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

(подпись)

М.М. Панкратов

(И.О. Фамилия)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»
Институт энергетики и электротехники
(наименование института полностью)
Кафедра «Энергетические машины и системы управления»
(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой ЭМиСУ
_____ Д.А. Павлов
(подпись) (И.О. Фамилия)
« ____ » _____ 2017г

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
выполнения бакалаврской работы

Студента Панкратова Максима Михайловича
по теме Модернизация форсунки двигателя с непосредственным впрыском на базе ВАЗ
- 11194

| Наименование раздела работы | Плановый срок выполнения раздела | Фактический срок выполнения раздела | Отметка о выполнении | Подпись руководителя |
|-----------------------------|--|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
| <u>1</u> | Тепловой расчет двигателя <i>Чертеж диаграмм теплового расчета; ВСХ</i> | 30 апреля 2017г. | | |
| <u>2</u> | Расчет кинематики и динамики двигателя <i>Чертеж диаграмм кинематического и динамического расчетов</i> | 5 мая 2017 г. | | |
| <u>3</u> | Расчет основных деталей двигателя | 11 мая 2017 г. | | |
| <u>4</u> | Расчет механизмов и систем двигателя | 15 мая 2017 г. | | |
| <u>5</u> | Описание конструкции спроектированной установки | 20 мая 2017 г. | | |
| <u>6</u> | Оформление и доработка пояснительной записки и листов графической части с учетом замечаний, полученных во время предварительной защиты | 8 июня 2016 г. | | |

Руководитель бакалаврской работы

_____ (подпись)

А.М Дзюбан

_____ (И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

_____ (подпись)

М.М. Панкратов

_____ (И.О. Фамилия)

ABSTRACT

The topic of the bachelor's work is «Modernization of the direct injection injector based of the engine VAZ-11194».

Its goal is to analyze the problem of the occurrence of carbon deposits on the nozzle walls.

The bachelor's work includes of an explanatory note and a graphic part. Explanatory note consists of thermal calculation at its values, calculation of kinematics and dynamics, as well as the calculation of details for strength, a special part that includes the calculation of the injector, analysis and solution of the problem.

In the graphic there are drawings of the longitudinal and transverse section of the base engine, as well as graphs of calculations of the basic calculations, construction of the VCS and a special part. Results can be used to design a car engine.

АННОТАЦИЯ

ПРЯМОЙ ВПРЫСК, КОКСОВАНИЕ, НАГАР, СКОРОСТЬ, УСКОРЕНИЕ, ПЕРЕМЕЩЕНИЕ, ДАВЛЕНИЕ ГАЗОВ, ФОРСУНКА ПРЯМОГО ВПРЫСКА.

Тема бакалаврской работы «Модернизация форсунки непосредственного впрыска на базе ВАЗ-11194».

Целью выпускной квалификационной работы является анализ проблемы появления нагара на стенках носика форсунки.

Бакалаврская работа состоит из пояснительной записки и графической части. Пояснительная записка состоит из теплового расчета при своих значениях, расчет кинематики и динамики, так же расчет деталей на прочность, специальной части, которая включает в себя расчет форсунки, анализ и решение задачи. В графической присутствуют чертежи продольного и поперечного разреза базового двигателя, так же графики расчетов основных расчетов, построение ВСХ и специальной части. Результаты можно использовать для проектировки двигателя легкового автомобиля.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение | 8 |
| 1 Тепловой расчет двигателя ВАЗ-11194 | 9 |
| 1.1 Топливо | 9 |
| 1.2 Параметры рабочего тела | 9 |
| 1.3 Параметры окружающей среды и остаточные газы | 11 |
| 1.4 Процесс впуска | 12 |
| 1.5 Процесс сжатия | 13 |
| 1.6 Процесс сгорания | 14 |
| 1.7 Процесс расширения и выпуска | 16 |
| 1.8 Индикаторные параметры рабочего цикла | 17 |
| 1.9 Эффективные показатели двигателя | 18 |
| 1.10 Основные параметры цилиндра двигателя | 19 |
| 1.11 Тепловой баланс | 20 |
| 2. Кинематика | 21 |
| 3. Динамика кривошипно-шатунного механизма | 22 |
| 3.1 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма | 22 |
| 3.2 Силы инерции | 23 |
| 3.3 Удельные суммарные силы | 24 |
| 3.4 Крутящие моменты | 24 |
| 3.5 Силы действующих на шатунную шейку коленчатого вала | 25 |
| 3.6 Силы, действующие на колено вала | 26 |
| 3.7 Силы, действующие на коренные шейки | 26 |
| 3.8 Равномерность крутящего момента и равномерность хода двигателя | 27 |
| 4. Расчет основных деталей двигателей | 27 |
| 4.1 Расчет поршневой группы | 27 |
| 4.1.1 Расчет поршня | 27 |
| 4.1.2 Расчет поршневого кольца | 29 |

| | |
|--|----|
| 4.1.3 Расчет поршневого пальца | 30 |
| 5. Обзор состояния вопроса | 32 |
| 5.1 Основные понятия | 32 |
| 5.1.1 Окисление | 32 |
| 5.1.2 Влияние температуры на окисление | 33 |
| 5.1.3 Продукты окисления | 33 |
| 5.1.4 Отложения в камере сгорания | 34 |
| 5.2 Устройство и принцип работы электромагнитной форсунки | 35 |
| 5.3 Расчет электромагнитной форсунки | 36 |
| 5.4 Проблема закоксовывания форсунки | 37 |
| 5.5 Способы решения проблемы закоксовывания | 38 |
| 5.6 Решение поставленной задачи | 40 |
| 6 Безопасность проекта | 42 |
| 6.1 Регламент о «Безопасности колесных транспортных средствах | 42 |
| 6.2 Регламент о внешнем шуме в эксплуатации автомобиля | 43 |
| 6.3 Регламент о выбросах загрязняющих веществах с отработанными газами. | 44 |
| 6.4 Оценка безопасности двигателя | 47 |
| 6.5 Выбор нейтрализатора | 47 |
| Заключение | 50 |
| Список использованных источников | 51 |

ВВЕДЕНИЕ

В современном автомобилестроении двигатель с прямым впрыском является одной из перспективных направлений. Главные задачи ведутся в повышении удельных показателей, таких как мощность, расход топлива и т.д. Так же в увеличении показателей надежности и работоспособности, и снижении токсичных выхлопов в атмосферу Земли. Улучшение этих показателей содействует к конкуренции на автомобильном рынке, так как обыватель будет покупать автомобиль с большей надежностью и мощностью при тех же аналогах. Понижение токсичных выхлопов одна из главных проблем городов с большим населением автовладельцев и главная из ее пунктов – это вред здоровью, как человека, так и среде его обитания. Двигателестроение имеет уже столетнюю историю и развивается, по сей день. Система прямого впрыска на сегодняшний день не новая, но в бензиновом двигателестроении она зародилась и начала усовершенствоваться относительно недавно.

Основной из проблем таких систем, это повышение долговечности и надежности систем топливоподачи, в частности форсунок. Из-за работ их непрерывно камере сгорания, они подвергаются влиянию высоких температур. В процессе этого материал теряет свои свойства, а так же из за свойств работы топлив, в сопле образуется нагар. В дизелестроении такая задача давно изучена, проведены ряды испытаний и выявлены комплексы решений по данному вопросу. Таким образом, опираясь на богатую историю дизелей, можно провести анализ комплекса решений и выявить подходящие решения к выбранному прототипу.

1 Тепловой расчет двигателя с прямым впрыском на базе ВАЗ-11194

Провести расчет двигателя по прототипу ВАЗ – 11194, который используется на легковых автомобилях, с рабочим объемом 1,4 литра. В двигателе четыре цилиндра расположенные в ряд.

Для расчета берутся такие основные показатели как степень сжатия, которая равна 11, мощность равная 73,8 кВт.

Расчет ведется на нескольких режимах при разных частотах коленчатого вала, для расчета были выбраны такие частоты: 980, 3400, 6000, 6400 мин⁻¹.

1.1 Расчет параметров топлива

По принятой степени сжатия, на основе устоявшимся данным в двигателестроении и выбранного типа камеры сгорания, можем принять такую марку бензина, как АИ-95.

Для двигателей использующий бензин выбирается средний элементарный состав и молекулярная масса, равные:

$$C = 0,855; H = 0,145 \text{ и } m_T = 115,1 \text{ кг/моль,}$$

«Низшая теплота сгорания топлива» [6]

$$Hu = 33,91C + 125,6H - 10,89(O - S) - 2,51(9H - W) = 43929,5 \text{ КДж/кг, (1.1)}$$

1.2 Параметры рабочего тела.

«Теоретически необходимая величина воздуха для сгорания одного килограмма жидкого топлива» [6]

$$L_0 = \frac{1}{0,208} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) = 0,52 \text{ кмоль возд./кг топл., (1.2)}$$

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} C + 8H - O \right) = 14,96 \text{ кмоль возд/ кг топл.}, \quad (1.3)$$

Для получения достаточно экономичного и низкотоксичного двигателя, выбираем из этих соображений показатель избытка воздуха на минимальной частоте равный 0,98, а на остальных режимах 1.

«Количество горючей смеси» [6]

$$M_1 = \alpha L_0 + \frac{1}{m_t}, \quad (1.4)$$

«Количество отдельных компонентов продукта сгорания при $K = 0,5$ » [6]

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12} + 2 \frac{1 - \alpha}{1 + K} 0,208 L_0, \quad (1.5)$$

$$M_{CO} = 2 \frac{1 - \alpha}{1 + K} 0,208 L_0, \quad (1.6)$$

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2} - 2K \frac{1 - \alpha}{1 + K} 0,208 L_0, \quad (1.7)$$

$$M_{H_2} = 2K \frac{1 - \alpha}{1 + K} 0,208 L_0, \quad (1.8)$$

$$M_{N_2} = 0,792 \alpha L_0, \quad (1.9)$$

«Общая масса продуктов сгорания жидкого топлива (кмоль пр. ст./кг топл.)» [6]

$$M_2 = M_{CO_2} + M_{CO} + M_{H_2O} + M_{H_2} + M_{N_2}, \quad (1.10)$$

Все расчеты в данном разделе приводятся в виде таблицы 1.

Таблица 1 – Результаты расчета параметра рабочего тела

| | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| $n, \text{мин}^{-1}$ | 980 | 3400 | 6000 | 6400 |
| α | 0,98 | 1 | 1 | 1 |
| $M_1, \text{кмоль гор.см/кг топл.}$ | 0,515 | 0,526 | 0,526 | 0,526 |
| $M_{\text{CO}_2}, \text{кмоль CO}_2/\text{кг топл.}$ | 0,074 | 0,071 | 0,071 | 0,071 |
| $M_{\text{CO}}, \text{кмоль CO/кг топл.}$ | 0,003 | 0 | 0 | 0 |
| $M_{\text{H}_2\text{O}}, \text{кмоль H}_2\text{O/кг топл.}$ | 0,071 | 0,073 | 0,073 | 0,073 |
| $M_{\text{H}_2}, \text{кмоль H}_2/\text{кг топл.}$ | 0,004 | 0 | 0 | 0 |
| $M_{\text{N}_2}, \text{кмоль N}_2/\text{кг топл.}$ | 0,401 | 0,409 | 0,409 | 0,409 |
| $M_2, \text{кмоль пр.сг/кг топл.}$ | 0,54 | 0,55 | 0,55 | 0,55 |

1.3 Параметры окружающей среды и остаточные газы

«Температура и давление окружающей среды для двигателя не использующий надув, можно принять следующие значения $T_0=294 \text{ К}$ и $P_0=0,1013 \text{ МПа}$ » [6]

«При стабильном числе степени сжатия, температура остаточных газов возрастает по линейному закону с повышением режима и при постоянном значении избытка воздуха, но падает при обогащении ТВС. При этих условиях принимаем следующие значения» [6]

$$n=980, 3400, 6000, 6400 \text{ мин}^{-1};$$

$$T_r=900, 950, 1000, 990 \text{ К.}$$

«Давление остаточных газов» [6]

$$p_{rN}=1,15p_0=0,115\text{МПа.} \quad (1.11)$$

«Давление остаточных газов уменьшается с понижением частоты вращения коленчатого вала. На разных режимах, давление рассчитывается по приближительной формуле» [6]

$$p_r = p_0(1,035 + A_p * 10^{-8} * n^2), \quad (1.12)$$

$$\text{где } A_p = \frac{(p_{rN} - p_0 * 1,035) * 10^8}{n_N * p_0} = 0,3194 \quad (1.13)$$

1.4 Процесс впуска

При наполнении, температура свежего заряда, увеличивается от температуры подогретых деталей. Число подогрева зависит устройства и положения патрубка впуска, охлаждающей системы, имеется ли механизм для подогрева, быстроходности и наличие надува.

Для бензина эта величина базируется в пределах от 0 до 20 °С

На номинальном режиме, для более хорошего наполнения, принимаем $\Delta T_N = 8$ °С.

«Она изменяется в зависимости от режима и находится приблизительно по формуле» [6]

$$\Delta T = A_t (110 - 0,0125n) , \quad (1.14)$$

$$\text{где } A_t = \frac{\Delta T_N}{(110 - 0,0125n_N)} = 0,23 \quad (1.15)$$

«Плотность заряда на впуске» [6]

$$\rho_0 = \frac{p_0 * 10^6}{R_b T_0} = 1,19 \text{ кг} / \text{м}^3 , \quad (1.16)$$

«Давление в конце впуска» [6]

$$P_a = P_0 - \Delta P_a , \quad (1.17)$$

«Потеря давления на впуске» [6]

$$A_n = \omega_{en} / n_N = 70 / 6000 = 0,0117, \quad (1.18)$$

$$\Delta P_a = \frac{(\beta^2 + \xi_{вп.}) * A_n^2 * n^2 * \rho_0 * 10^{-6}}{2} , \quad (1.19)$$

По устоявшимся значениям в настоящее время, в двигателе на номинальном режиме значения $(\beta^2 + \xi_{вп.}) = 2,8$; $\omega_{en} = 70 \text{ м} / \text{с}$

«Значение остаточных газов» [6]

$$\gamma_r = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} * \frac{\varphi_{оч} p_r}{\varepsilon \varphi_{доз} P_a - \varphi_{оч} p_r}, \quad (1.20)$$

«Температура в конце впуска» [6]

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_r T_0}{1 + \gamma_r}, \quad (1.21)$$

«Коэффициент наполнения» [6]

$$\eta_v = \frac{T_0}{T_0 + \Delta T} * \frac{1}{\varepsilon - 1} * \frac{1}{p_0}, \quad (1.22)$$

Все расчеты приводятся в виде таблицы 2

Таблица 2 – Результаты расчета процесса впуска

| | | | | |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| N, мин ⁻¹ | 980 | 3400 | 6000 | 6400 |
| p _r , МПа | 0,1038 | 0,1074 | 0,1150 | 0,1167 |
| ΔT, °C | 22,34 | 15,14 | 8 | 6,86 |
| ΔP _a , МПа | 0,0002 | 0,0028 | 0,0082 | 0,0093 |
| P _a , МПа | 0,1006 | 0,0988 | 0,0923 | 0,0875 |
| Φ _{доз} | 0,95 | 0,10 | 1,10 | 1,11 |
| γ _r | 0,0408 | 0,0381 | 0,0366 | 0,0375 |
| T _a , К | 338,3 | 332,2 | 326,3 | 325,1 |
| η _v | 0,8721 | 0,9142 | 0,9694 | 0,9681 |

1.5 Процесс сжатия

«Средний показатель адиабаты сжатия k₁ определяется по графику, а средний показатель политропы сжатия n₁ принимается несколько меньше k₁» [6]

«Давление и температура рабочей смеси в конце сжатия» [6]

$$P_c = P_a * \varepsilon^{n_1}, \quad (1.22)$$

$$T_c = T_a * \varepsilon^{n_1 - 1}, \quad (1.23)$$

«Средняя молярная теплоемкость в конце сжатия» [6]

а) «свежей смеси (воздуха)» [10]

$$(mc_v)_{t_0}^{t_c} = 20,6 + 2,638 * 10^{-3} * t_c, \quad (1.24)$$

б) «остаточных газов» [6]

$(mc_v^n)_{t_0}^{t_c}$ определяется методом экстраполяции:

в) «рабочей смеси» [6]

$$(mc'_v)_{t_0}^{t_c} = \frac{1}{1 + \gamma_r} [(mc_v)_{t_0}^{t_c} + \gamma_r * (mc'_c)_{t_0}^{t_c}], \quad (1.25)$$

Все расчеты приведены в виде таблицы 3

Таблица 3 – Результаты расчета процесса сжатия

| | | | | |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| n, мин ⁻¹ | 980 | 3400 | 6000 | 6400 |
| n1 | 1,375 | 1,376 | 1,376 | 1,377 |
| P _c , МПа | 2,531 | 2,474 | 2,332 | 2,313 |
| T _c , К | 817,1 | 803,3 | 788,2 | 788,1 |
| t _c , °С | 544 | 530 | 515 | 515 |
| $(mc_v)_{t_0}^{t_c}$ | 22,036 | 21,999 | 21,950 | 21,949 |
| $(mc_v^n)_{t_0}^{t_c}$ | 24,134 | 24,163 | 24,194 | 24,195 |
| $(mc'_v)_{t_0}^{t_c}$ | 22,130 | 22,081 | 22,043 | 22,052 |

1.6 Процесс сгорания

«Коэффициент молекулярного изменения горючей смеси и рабочей смеси» [6]

$$\mu_0 = \frac{M_2}{M_1}, \quad (1.26)$$

$$\mu = \frac{\mu_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r}, \quad (1.27)$$

«Количество теплоты потерянное, потерянное вследствие химической неполноты сгорания топлива» [6]

$$\Delta H_u = 119950(1 - \alpha)L_0, \quad (1.28)$$

«Теплота сгорания рабочей смеси» [6]

$$H_{\text{раб.см}} = \frac{H_u - \Delta H_u}{M_1(1 + \gamma_r)}, \quad (1.29)$$

«Средняя мольная теплоёмкость продуктов сгорания» [6]

Находится по эмпирическим зависимостям.

$$(mc''_v)_{t_0}^{t_z} = \frac{1}{M_2} [(M_{CO_2}(mc''_{vCO_2})_{t_0}^{t_z} + M_{CO}(mc''_{vCO})_{t_0}^{t_z} + M_{H_2O}(mc''_{vH_2O})_{t_0}^{t_z} + M_{H_2}(mc''_{vH_2})_{t_0}^{t_z} + M_{N_2}(mc''_{vN_2})_{t_0}^{t_z}], \quad (1.30)$$

«Величина коэффициента использования теплоты принимается на основе экспериментальных данных в зависимости от конструкции двигателя, режима его работы, системы охлаждения, формы камеры сгорания, способа смесеобразования, коэффициента избытка воздуха и частоты вращения коленчатого вала и для бензина изменяется в пределах от 0,80 до 0,95» [6].

«Температура в конце видимого процесса сгорания» [6]

$$\xi_z H_{\text{раб.см}} + (mc'_v)_{t_0}^{t_c} t_c = \mu (mc''_v)_{t_0}^{t_z} t_z, \quad (1.31)$$

Отсюда находим значения t_z и T_z .

«Максимальное давление сгорания теоретическое» [6]

$$p_z = \frac{p_c * \mu * T_z}{T_c}, \quad (1.32)$$

«Максимальное давление сгорания действительное» [6]

$$p_{zd} = 0.85p_z, \quad (1.33)$$

«Степень повышения давления» [6]

$$\lambda = \frac{p_z}{p_c}, \quad (1.34)$$

Все расчеты приведены в виде таблицы 4.

Таблица 4 – Результаты расчета процесса сгорания

| | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|
| $n, \text{мин}^{-1}$ | 980 | 3400 | 6000 | 6400 |
| μ_0 | 1,061 | 1,052 | 1,052 | 1,052 |
| μ | 1,061 | 1,053 | 1,054 | 1,054 |
| $\Delta H_u, \text{кДж/кг}$ | 1240 | 0 | 0 | 0 |
| $N_{\text{раб.см}}, \text{кДж/кмоль раб.см.}$ | 79615 | 80521 | 80651 | 80578 |
| $(mc_v)_{t_0}^{t_z}$ | 29,287 | 30,444 | 30,387 | 30,113 |
| ξ_z | 0,80 | 0,94 | 0,92 | 0,87 |
| $t_z, ^\circ\text{C}$ | 2192 | 2708 | 2680 | 28549 |
| T_z, K | 2465 | 2981 | 2953 | 2823 |
| $P_z, \text{МПа}$ | 8,0592 | 9,6453 | 9,1861 | 9,6942 |
| $P_{zd}, \text{МПа}$ | 7,2611 | 8,6823 | 8,2712 | 7,8334 |
| λ | 3,1923 | 3,9142 | 3,9411 | 3,7724 |

1.7 Процесс расширения и выпуска

«Средний показатель адиабаты расширения k_2 определяется по графику, а средний показатель политропы расширения n_2 принимается несколько меньше k_2 » [1]

«Давление и температура в конце процесса расширения» [6]

$$p_b = \frac{p_z}{\varepsilon^{n_2}}, \quad (1.35)$$

$$T_b = \frac{T_z}{\varepsilon^{n_2-1}}, \quad (1.36)$$

«Проверка ранее принятой температуры остаточных газов» [6]

$$T_r' = \frac{T_b}{\sqrt[2]{\frac{p_b}{p_r}}}, \quad (1.37)$$

$$\Delta T_r = \frac{100(T_r' - T_r)}{T_r}, \quad (1.38)$$

Температура остаточных газов выбрана достаточно верно на всех режимах, так как не выходит за 5%.

Все расчеты по разделу сводятся в таблицу 5.

Таблица 5 – Результаты Расчета процесса расширения и впуска

| | | | | |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|
| $n, \text{мин}^{-1}$ | 980 | 3400 | 6000 | 6400 |
| k_2 | 1,2546 | 1,2541 | 1,2532 | 1,2501 |
| n_2 | 1,254 | 1,254 | 1,250 | 1,250 |
| $P_b, \text{МПа}$ | 0,423 | 0,514 | 0,491 | 0,462 |
| $T_b, \text{К}$ | 1358 | 1640 | 1640 | 1567 |
| $T_r', \text{К}$ | 850 | 979 | 1015 | 992 |
| $\Delta, \%$ | -4,58 | +3,06 | +1,46 | +0,22 |

1.8 Индикаторные параметры рабочего цикла

«Теоретическое среднее индикаторное давление» [6]

$$p_i' = \frac{p_c}{\varepsilon - 1} \left[\frac{\lambda}{n_2 - 1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2 - 1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1 - 1}} \right) \right], \quad (1.39)$$

«Среднее индикаторное давление» [6]

$$p_i = \varphi_u * p_i', \quad (1.40)$$

где $\varphi_u = 0,95$

«Индикаторный к. п. д. и индикаторный удельный расход топлива» [6]

$$\eta_i = \frac{p_i * l_0 * \alpha}{H_u * \rho_0 * \eta_v}, \quad (1.41)$$

$$g_i = \frac{3600}{H_u * \eta_i}, \quad (1.42)$$

1.9 Эффективные показатели двигателя

«Среднее давление механических потерь» [6]

$$p_m = 0,034 + 0,0113v_{п.ср.}, \quad (1.43)$$

«Средняя скорость поршня» [6]

$$v_{п.ср.} = \frac{s * n}{10^4 * 3}, \quad (1.44)$$

«Среднее эффективное давление и механический к. п. д.» [6]

$$p_e = p_i - p_m, \quad (1.45)$$

$$\eta_m = \frac{p_e}{p_i}, \quad (1.46)$$

«Эффективный к. п. д. и эффективный удельный расход топлива» [6]

$$\eta_e = \eta_i * \eta_m, \quad (1.47)$$

$$g_e = \frac{3600}{H_u * \eta_e}, \quad (1.48)$$

Все расчеты приведены в виде таблицы 6.

Таблица 6 – Расчеты индикаторных параметров рабочего тела и эффективных показателей двигателя

| | | | | |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
| n | 980 | 3400 | 6000 | 6400 |
| P _i ,МПа | 1,091 | 1,394 | 1,342 | 1,254 |
| P _i ,МПа | 1,034 | 1,321 | 1,273 | 1,191 |
| η _i | 0,392 | 0,424 | 0,371 | 0,362 |
| g _i г/кВт*ч | 247 | 198 | 219 | 234 |
| V _{п.ср.} ,м/с | 2,47 | 8,82 | 15,12 | 16,13 |
| P _м ,МПа | 0,063 | 0,134 | 0,201 | 0,223 |
| P _е ,МПа | 0,972 | 1,193 | 1,062 | 0,974 |
| η _м | 0,943 | 0,911 | 0,842 | 0,823 |
| η _е | 0,312 | 0,374 | 0,314 | 0,291 |
| g _е ,г/кВт*ч | 263 | 220 | 261 | 286 |

1.10 Основные параметры цилиндра и двигателя

«Литраж двигателя» [6]

$$V_{л} = \frac{30 * \tau * N_e}{p_e * n} = 1,39 \text{ л}, \quad (1.49)$$

«Рабочий объем одного цилиндра» [6]

$$V_h = \frac{V_{л}}{i} = 0.35 \text{ л}, \quad (1.50)$$

«Диаметр цилиндра» [6]

$$D = 2 * 10^3 \sqrt{\frac{V_h}{\pi * S}} = 76,5 \text{ мм}, \quad (1.51)$$

Окончательно принимаем:

- Рабочий объем, л: 1,39
- Диаметр цилиндра, мм: 76,5

- Ход поршня, мм: 75,6

Основные параметры и показатели двигателя определяются по окончательно принятым значениям D и S:

«Литраж двигателя» [6]

$$V_{л} = \frac{\pi * D^2 * S * i}{4 * 10^6} = 1,39 \text{ л}, \quad (1.52)$$

«Крутящий момент» [6]

$$M_e = \frac{3 * 10^4}{\pi} * \frac{N_e}{n}, \quad (1.53)$$

«Мощность двигателя» [6]

$$N_e = \frac{p_e * V_{л} * n}{30 * \tau}, \quad (1.54)$$

«Часовой расход топлива» [6]

$$G_t = N_e * g_e * 10^{-3}, \quad (1.55)$$

Все расчеты приведены в виде таблицы 7

Таблица 7 – Результаты расчета основных параметров двигателя

| n | 980 | 3400 | 6000 | 6400 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|
| N_e , кВт | 11,03 | 48,09 | 73,8 | 71,84 |
| M_e , Н*м | 107,23 | 131,22 | 117,67 | 107,19 |
| G_t , кг/ч | 2,89 | 10,61 | 19,28 | 20,53 |

1.11 Тепловой баланс

«Общее количество теплоты, введенной в двигатель с топливом» [6]

$$Q_0 = Q_e + Q_{г} + Q_{в} + Q_{н.с.} + Q_{ост.} = \frac{H_u * G_t}{3,6}, \quad (1.56)$$

«Теплота эквивалентная эффективной работе за 1 с» [6]

$$Q_e = 1000 * N_e , \quad (1.57)$$

«Теплота, передаваемая охлаждающей среде» [10]

$$Q_B = c * i * D^{1+2m} * n^m \frac{H_u - \Delta H_u}{\alpha * H_u} , \quad (1.58)$$

«где c – коэффициент пропорциональности для четырехтактных двигателей; m – показатель степени для четырехтактных двигателей» [6]

«Теплота, унесенная с обработанными газами» [6]

$$Q_r = \frac{G_t}{3,6} [M_2 [(mc_v'')_{t_r}^{t_r} + 8,315] t_r - M_1 [(mc_v)_{t_0}^{t_0} + 8,315] t_0] , \quad (1.60)$$

где $(mc_v)_{t_0}^{t_0}$ - теплоемкость остаточных газов определена методом интерполяции

«Теплота, потерянная из-за химической неполноты сгорания топлива» [6]

$$Q_{н.с.} = \frac{\Delta H_u * G_t}{3,6} , \quad (1.61)$$

«Неучтенные потери теплоты» [10]

$$Q_{ост.} = Q_0 - (Q_B + Q_r + Q_e + Q_{н.с.}) , \quad (1.62)$$

Все результаты расчета представлены в виде таблицы 8.

Таблица 8 – Результаты расчета теплового баланса

| Составляющие | Частота вращения, мин ⁻¹ | | | | | | | |
|-------------------|-------------------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | 980 | | 3400 | | 6000 | | 6400 | |
| | Дж/с | q, % | Дж/с | q, % | Дж/с | q, % | Дж/с | q, % |
| Q _e | 11004 | 31,19 | 48094 | 37,15 | 73934 | 31,43 | 71836 | 28,67 |
| Q _B | 6284 | 17,81 | 33952 | 26,23 | 47680 | 20,27 | 49659 | 19,82 |
| Q _r | 8791 | 24,92 | 36273 | 28,02 | 70458 | 29,95 | 74677 | 29,57 |
| Q _{н.с.} | 996 | 2,82 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Q _{ост.} | 8202 | 23,25 | 111139 | 8,6 | 43116 | 18,35 | 54962 | 21,94 |
| Q ₀ | 35276 | 100 | 129458 | 100 | 235237 | 100 | 250534 | 100 |

2 Кинематика

«Перемещение поршня» [6]

$$s_x = R[(1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi)] , \quad (2.1)$$

«Угловая скорость вращения коленчатого вала» [6]

$$W = (n \cdot \pi) / 30 = 628,32 \text{ рад/сек.}, \quad (2.2)$$

«Скорость поршня» [6]

$$v_{\text{п}} = \omega R (\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi) , \quad (2.3)$$

«Ускорение поршня» [6]

$$j = \omega^2 R (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi) , \quad (2.4)$$

Расчёты хода, скорости и ускорения производится аналитически через каждые 30° угла поворота коленчатого вала. Эти значения заносим в таблицу.

3 Динамика кривошипно-шатунного механизма

3.1 Приведение масс частей кривошипно-шатунного механизма

«С учетом диаметра цилиндра, отношения S/D, рядного расположения цилиндров и достаточно высокого значения rz устанавливаются» [6]

«Масса поршневой группы (для поршня из алюминиевого сплава $m_{\text{п}}=70$ кг/м²)» [6]

$$m_{\text{п}} = m_{\text{п}}' \cdot F_{\text{п}} = 0,32 \text{ кг} , \quad (3.1)$$

«Масса шатуна (для стального ковального шатуна $m_{\text{ш}}=120$ кг/м²)» [6]

$$m_{\text{ш}} = m_{\text{ш}}' \cdot F_{\text{ш}} = 0,55 \text{ кг} , \quad (3.2)$$

«Масса неуравновешенных частей одного колена вала без противовесов (стальной кованный вал со сплошными шейками $m_{\text{к}}' = 140$ кг/м²)» [6]

$$m_{\text{к}} = m_{\text{к}}' \cdot F_{\text{к}} = 0,64 \text{ кг} , \quad (3.3)$$

«Масса шатуна, сосредоточенная на оси поршневого пальца» [6]

$$m_{ш-н} = 0,275 \cdot m_{ш} = 0,15кг, \quad (3.4)$$

«Масса шатуна, сосредоточенная на оси кривошипа» [6]

$$m_{ш-к} = 0,725 \cdot m_{ш} = 0,4кг, \quad (3.5)$$

«Массы, совершающие возвратно-поступательное движение» [6]

$$m_j = m_n + m_{ш-н} = 0,47кг, \quad (3.6)$$

«Массы, совершающие вращательное движение» [6]

$$m_R = m_k + m_{ш-к} = 1,04кг, \quad (3.7)$$

3.2 Сила инерции

«Определяем значения удельной силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс» [6]

$$p_j = \frac{-w_n \cdot m_j}{F_n}, \quad (3.8)$$

«Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна одного цилиндра» [6]

$$K_R = -m_R \cdot R \omega^2 = -15,57кН, \quad (3.9)$$

«Центробежная сила инерции вращающихся масс шатуна одного цилиндра» [6]

$$K_{R-ш} = -m_{ш-к} \cdot R \omega^2 = -5,97кН, \quad (3.10)$$

«Центробежная сила инерции вращающихся масс кривошипа» [6]

$$K_{R-к} = -9,6кН, \quad (3.11)$$

3.3 Удельные суммарные силы

«Суммарные силы» [6]

$$P = P_r + P_j, \quad (3.12)$$

«Нормальная сила» [6]

$$p_n = p \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (3.13)$$

«Сила (кН), действующая вдоль шатуна» [6]

$$p_s = p(1 / \cos \beta), \quad (3.14)$$

«Сила (кН), действующая по радиусу кривошипа» [6]

$$p_x = p \cos(\varphi + \beta) / \cos \beta, \quad (3.15)$$

«Удельная и полная тангенциальные силы (МПа и кН)» [6]

$$p_T = p \sin(\varphi + \beta) / \cos \beta, \quad (3.16)$$

$$T = p_T F_n, \quad (3.17)$$

Все результаты динамического расчета графически представлены на плакате.

3.4 Крутящие моменты

«Крутящий момент одного цилиндра» [6]

$$M_{кр.ц} = TR = T \cdot 0,0378 \cdot 10^3, \quad (3.18)$$

«Период изменения крутящего момента четырехтактного двигателя с равными интервалами между вспышками» [6]

$$\theta = 720 / i = 720 / 4 = 180^\circ, \quad (3.19)$$

«Средний крутящий момент двигателя» [6]

- по данным теплового расчета

$$M_{кр.ср} = M_i = M_e / \eta_m, \quad (3.20)$$

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

$$M_{кр.ср} = \frac{F_1 - F_2}{OA} M_m = 129,92 \text{ Н*м}, \quad (3.21)$$

$$\text{ошибка } \Delta = \frac{(140,33 - 129,92)}{140,33} = 7,41\%, \quad (3.22)$$

«Максимальный и минимальный крутящие моменты» [6]

$$M_{кр.max} = 547,17 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (3.21)$$

$$M_{кр.min} = -177,06 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (3.22)$$

3.5 Силы, действующие на шатунную шейку коленчатого вала

«Суммарная сила, действующая на шатунную шейку по радиусу кривошипа» [6]

$$P_k = K + K_{R_{ш}}, \quad (3.23)$$

Значения $R_{ш.ш}$ для разных φ заносят в таблицу и по ним строят диаграмму $R_{ш.ш}$ в прямоугольных координатах.

«По полярной диаграмме строят диаграмму износа шатунной шейки» [6]

3.6 Силы, действующие на колено вала

«Суммарная сила, действующая на колено вала по радиусу кривошипа» [6]

$$K_{Pk} = P_k + K_{Rk}, \quad (3.24)$$

«Результирующая сила, действующая на колено вала» [6]

$$\overline{R}_k = \overline{R}_{ш.ш} + \overline{K}_{Pk}, \quad (3.25)$$

3.7 Силы, действующие на коренные шейки

«Сила, действующая на первую коренную шейку» [6]

$$R_{к.ш.1} = -0,5R_{к1}, \quad (3.26)$$

«Сила, действующая на вторую коренную шейку» [6]

$$R_{к.ш.2} = \sqrt{T_{к2}^2 + K_{к2}^2}, \quad (3.27)$$

где

$$T_{к2} = -0,5(T_1 + T_2 \cos \gamma_{к(1-2)} - K_{рк2} \sin \gamma_{к(1-2)}) = -0,5(T_1 - T_2 \cos 180 - K_{рк2} \sin 180) = -0,5(T_1 - T_2); \quad (3.28)$$

$$K_{к2} = -0,5(K_{рк1} + T_2 \sin \gamma_{к(1-2)} + K_{рк2} \cos \gamma_{к(1-2)}) = -0,5(K_{рк1} + T_2 \sin 180 + K_{рк2} \cos 180) = -0,5(K_{рк1} - K_{рк2}). \quad (3.29)$$

«Сила, действующая на третью коренную шейку» [6]

$$R_{к.ш.3} = \sqrt{T_{к3}^2 + K_{к3}^2}, \quad (3.30)$$

$$T_{к3} = -0,5(T_2 + T_3 \cos \gamma_{к(2-3)} - K_{рк3} \sin \gamma_{к(2-3)}) \cos \gamma_{к(1-2)} = -0,5(T_2 - T_3 \cos 0 - K_{рк3} \sin 0) \cos 180 = 0,5(T_2 + T_3); \quad (3.31)$$

$$K_{к3} = -0,5(K_{рк2} + T_3 \sin \gamma_{к(2-3)} + K_{рк3} \cos \gamma_{к(2-3)}) \cos \gamma_{к(1-2)} = -0,5(K_{рк2} + T_3 \sin 0 + K_{рк3} \cos 0) \cos 180 = 0,5(K_{рк2} + K_{рк3}). \quad (3.32)$$

Диаграммы $R_{к.ш.1}$, $R_{к.ш.2}$, $R_{к.ш.3}$, перестроены в прямоугольные координаты.

По этим диаграммам определяют:

- для 1(5)-ой коренной шейки

$$R_{к.ш.кр} = F_1 M_R / OB = 9,27 \text{ кН}, \quad (3.33)$$

3.8 Равномерность крутящего момента и равномерность хода двигателя

«Равномерность крутящего момента» [6]

$$\mu = (M_{кр \max} - M_{кр \min}) / M_{кр \text{ ср}} = 2,937, \quad (3.34)$$

4 Расчет основных деталей двигателей

4.1 Расчет поршневой группы

4.1.1 Расчет поршня

«Напряжение изгиба в днище поршня» [6]

$$\delta_{из} = p_{zd} (r_i / \delta)^2 = 30,4 \text{ МПа}, \quad (4.1)$$

где $r_i = D / 2 - (s + t + \Delta t) = 0,012 \text{ м}, \quad (4.2)$

«Напряжение сжатия в сечении х-х» [6]

$$\delta_{сж} = P_{zл} / F_{х-х} = 11,8 \text{ МПа}, \quad (4.3)$$

где

$$P_{zл} = p_{zл} \cdot F_n = 0,0384 \text{ мН}, \quad (4.4)$$

$$F_{х-х} = (\pi / 4)(d_k^2 - d_i^2) - n'_m F' = 0,0033 \text{ м}^2, \quad (4.5)$$

$$d_k = D - 2(t + \Delta t) = 69 \text{ мм}^2, \quad (4.6)$$

$$F' = (d_k - d_i) d_m / 2 = 24,3 \text{ мм}^2, \quad (4.7)$$

«Напряжение разрыва в сечении х-х: максимальная угловая скорость холостого хода» [6]

$$\omega_{х-х \max} = \pi n_{х-х \max} / 30 = 670,2 \text{ рад/с}, \quad (4.8)$$

«Максимальная разрывающая сила» [6]

$$P_j = m_{x-x} R \omega_{x-x \max}^2 (1 + \lambda) = 0,0035 \text{ МН}, \quad (4.9)$$

«Напряжение разрыва» [6]

$$\delta_p = P_j / F_{x-x} = 2,7 \text{ МПа}, \quad (4.10)$$

«Напряжение в верхней кольцевой перемычке» [6]

- среза

$$\tau = 0.0314 p_{z,r} (D / h_n)^2 = 5,2 \text{ МПа}, \quad (4.11)$$

-изгиба

$$\delta_{из} = 0,0045 p_{z,r} (D / h_n) = 14,3 \text{ МПа}, \quad (4.12)$$

-сложное

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{из}^2 + 4\tau^2} = 17,7 \text{ МПа}, \quad (4.13)$$

«Удельное давление поршня на стенку цилиндра» [6]

$$q_1 = N_{\max} / (h_{ю} D) = 2,88 \text{ МПа}, \quad (4.14)$$

$$q_2 = N_{\max} / (HD) = 1,31 \text{ МПа}, \quad (4.15)$$

«Диаметры головки и юбки поршня» [6]

$$D_r = D - \Delta_r = 75,96, \quad (4.16)$$

$$D_{ю} = D - \Delta_{ю} = 76,35, \quad (4.17)$$

где $\Delta_r = 0,006D$; $\Delta_{ю} = 0,0015D$.

«Диаметральные зазоры в горячем состоянии» [6]

где - $T_{ц}=383\text{К}$, $T_0=273\text{К}$, $T_r=593\text{К}$, $T_{ю}=413\text{К}$, приняты с учетом жидкостного охлаждения.

$$\Delta' r = D[1 + \alpha_{ц}(T_{ц} - T_0)] - D_r[1 + \alpha_r(T_r - T_0)] = 0,11 \text{ м}, \quad (4.18)$$

$$\Delta' ю = D[1 + \alpha_{ю}(T_{ю} - T_0)] - D_{ю}[1 + \alpha_{ю}(T_{ю} - T_0)] = 0,05 \text{ м}, \quad (4.19)$$

4.1.2 Расчет поршневого кольца

«Среднее давление кольца на стенку цилиндра» [6]

$$p_{cp} = 0,152 E \frac{A_o / t}{(D / t - 1)^3 \cdot (D / t)} = 0,23 \text{ МПа}, \quad (4.20)$$

где $A_o = 3t = 0,012 \text{ м}$. (4.21)

«Давление (МПа) кольца на стенку цилиндра в различных точках окружности определяются по формуле» [6]

$$p = p_{cp} \mu_k, \quad (4.22)$$

Таблица 9 – Коэффициент μ_k для различных ψ

| Угол ψ , определяющий положение текущего давления кольца, град | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 |
|---|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| Коэффициент μ_k | 1,05 | 1,04 | 1,02 | 1,0 | 1,02 | 1,27 | 1,5 |
| Давление p в соответствующей точке | 0,29 | 0,287 | 0,281 | 0,276 | 0,281 | 0,35 | 0,414 |

«Напряжение изгиба кольца в рабочем состоянии» [6]

$$\delta_{из1} = 2.61 p_{cp} (D / t - 1)^2 = 261,08 \text{ МПа}, \quad (4.23)$$

«Напряжение изгиба при надевании кольца на поршень» [6]

$$\delta_{из2} = \frac{4E(1 - 0,114 A_o / t)}{m(D / t - 1.4)(D / t)} = 374,94 \text{ МПа}, \quad (4.24)$$

«Монтажный зазор в замке поршневого кольца» [6]

$$\Delta_k = \Delta'_k + \pi D [\alpha_k (T_k - T_o) - \alpha_y (T_y - T_o)] = 0,4 \text{ мм}, \quad (4.25)$$

где $\Delta'_k = 0,4 \text{ мм}$, $T_y = 386 \text{ К}$, $T_k = 500 \text{ К}$, $T_o = 273 \text{ К}$.

4.1.3 Расчет поршневого пальца

«Расчетная сила, действующая на поршневой палец» [6]

- Газовая

$$P_{z \max} = p_{z \max} F_n = 0,04 \text{ МН}, \quad (4.26)$$

- инерционная

$$P_j = -m_n \omega_u^2 R(1 + \lambda) \cdot 10^{-6} = -0,00017 \text{ МН}, \quad (4.27)$$

где $\omega_u = \pi n_M / 30 = 102,6 \text{ рад/с}$. (4.28)

расчетная

$$P = P_{z \max} + 0,82 P_j = 0,0397 \text{ МН}, \quad (4.29)$$

«Удельное давление пальца на втулку поршневой головки шатуна» [6]

$$q_{ш} = \frac{P}{d_n l_{ш}} = 122,6 \text{ МПа}, \quad (4.30)$$

- Удельное давление пальца на бобышки

$$q_b = \frac{P}{d_n (l_n - b)} = 68,97 \text{ МПа}, \quad (4.31)$$

- Напряжение изгиба в среднем сечении пальца

$$\delta_{из} = \frac{P(l_n + 2b - 1,5l_{ш})}{1,2(1 - \alpha^4)d_n^3} = 407,8 \text{ МПа}, \quad (4.32)$$

где $\alpha = d_b / d_n = 0,5$ (4.33)

«Касательные напряжения среза в сечениях между бобышками и головкой шатуна» [6]

$$\tau = \frac{0,85 P(1 + \alpha + \alpha^2)}{(1 - \alpha^4)d_n^2} = 214,72 \text{ МПа}, \quad (4.34)$$

«Наибольшее увеличение горизонтального диаметра пальца при оваллизации» [6]

$$\Delta d_{n\text{max}} = \frac{1,35 P}{El_n} \left(\frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right)^3 [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = 0,0172 \text{ мм}, \quad (4.35)$$

Напряжения оваллизации на внешней поверхности пальца:

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

$$\delta_{\alpha 0^\circ} = \frac{15 P}{l_n d_n} \left[0,19 \frac{(2 + \alpha)(1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} - \frac{1}{1 - \alpha} \right] [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = 96,42 \text{ МПа}, \quad (4.36)$$

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

$$\delta_{\alpha 90^\circ} = -\frac{15 P}{l_n d_n} \left[0,174 \frac{(2 + \alpha)(1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2} + \frac{0,636}{1 - \alpha} \right] [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = -126,86 \text{ МПа}, \quad (4.37)$$

Напряжения оваллизации на внутренней поверхности пальца:

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

$$\delta_{\alpha 0^\circ} = -\frac{15 P}{l_n d_n} \left[0,19 \frac{(1 + 2\alpha)(1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2 \alpha} + \frac{1}{1 - \alpha} \right] [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = -210,48 \text{ МПа}, \quad (4.38)$$

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

$$\delta_{\alpha 90^\circ} = \frac{15 P}{l_n d_n} \left[0,174 \frac{(1 + 2\alpha)(1 + \alpha)}{(1 - \alpha)^2 \alpha} - \frac{0,636}{1 - \alpha} \right] [0,1 - (\alpha - 0,4)^3] = 231,32 \text{ МПа}, \quad (4.39)$$

5 Состояние вопроса

Форсунка высокого давления предназначена для распыления и распределения топлива по камере сгорания. Она располагается прямо в камере сгорания и работает в среде повышенных температур, что вызывает проблему возникновения нагара на сопле форсунки. Эту проблему автомобильные производители частично решают, призывая владельцев автомобилями проходить промывку на специальных стендах у дилеров через каждые 20000-30000км, что увеличивает затраты на владение автомобилем и со стороны потребителей это выгладит не выгодно и привлекательно. Для решения поставленной проблемы проведем анализ возникновения коксов, нагаров и лаков на стенках сопла и решим ее. Выявить, что может послужить причиной их возникновения и на примере различных конструктивных решений, подобрать наиболее подходящие решения, как в экономическом, так и в конструкционном плане. Рассмотрим, из каких элементов состоит форсунка, и по какому принципу она работает. Но для начала рассмотрим основные понятия.

5.1 Основные понятия

5.1.1 Окисление

Масло постоянно находится в движении и циркулирует по двигателю, так же масло попадает в топливо, где из-за этого все характерные для масла отложения образуются в топливной системе. Оно контактирует с воздухом и продуктами сгорания. Кислород, который находится в воздухе, способствует быстрому окислению масла, этот процесс протекает быстрее в тех маслах, которые склоны к пенообразованию. В роли катализаторов в двигателе выступают металлические поверхности, с которыми контактирует масло, оно нагревается, соприкасаясь с нагретыми деталями, что существенно приближает

процессы окисления. В результате этого появляются твердые продукты окисления, называемые отложениями.

На изменение его структуры так же влияют продукты сгорания, а не только химические превращения.

5.1.2 Влияние температуры на окисление

При работе двигателя можно выделить два вида температурного режима:

- Работа на прогревом двигателе,
- Работа на холодном двигателе.

При работе на прогревом двигателе имеется высокотемпературный режим изменения свойств топлива. Следовательно, при работе на холодном двигателе, наблюдается низкотемпературный режим.

5.1.3 Продукты окисления

На поверхностях, которые подвергнуты высоким температурам, образуются различные углеродистые отложения. Их состав и структура зависят от температуры поверхности. Можно выделить три вида таких отложений:

- Нагары,
- Лаки,
- Шлам.

Так же можно выделить, что их образование накапливание на деталях зависит не только от недостатка окислительной и термической стабильности, но и от малой моющей способности двигателя.

Нагар – это продукты термической деструкции и полимеризации. Нагар появляется на поверхностях подвергнутых высоким температурам. Имеет типичный черный цвет, но так же иногда бывает коричневого, белого и других цветов. Отложения, в частности толщина слоя, изменяются, когда отложений становится много, тогда процесс отвода тепла становится хуже, что

способствует повышению температуры на верхних слоях отложений и их сгорания. Не большое количество отложений формируются в разогретом двигателе под нагрузкой. Можно выделить три вида нагара от их структуры, это: монолитные, плотные и рыхлые.

Лак – это тонкий слой клейкого или твердого вещества. Образуется на средне нагретых поверхностях, вследствие полимеризации топлива в наличии кислорода. Он существенно уменьшает отвод тепла, так же снижает прочность.

Шлам – это суспензия и эмульсия из нерастворимых твердых и смолистых веществ. Процессы образования шлама различаются, в зависимости от температуры и масла. Можно различить на низкотемпературный и высокотемпературный.

Низкотемпературный шлам формируется от взаимодействия в картере прорывных газов, которые имеют в себе остатки топлива, воды, масла. В «холодном» двигателе топливо и вода испаряются не так быстро, из чего следует образование эмульсии, которая в дальнейшем преобразуется в шлам.

Высокотемпературный шлам формируется из-за соединения окислительных молекул под воздействием повышенных температур.

5.1.4 Отложения в камере сгорания

Они образуются из частичек углерода, в процессе неполного сгорания и солей металлов, вследствие термического разложения части масла, которая проникает в камеру сгорания. Такие отложения копятся и могут способствовать эффекту преждевременного возгорания, который называется калильное зажигание. Калильное зажигание формирует детонацию, вследствие чего увеличивается износ деталей, в частности подшипники коленчатого вала, так же идет перегрев различных деталей, замечается увеличения расхода топлива и снижении мощности.

5.2 Устройство и принцип работы электромагнитной форсунки

Основными элементами форсунки являются: насадка распылителя 1, корпуса распылителя 2, соединяющей шайбой 3, которая соединяет распылитель и основной корпус, корпус форсунки 4, игла распылителя 5, якорь электромагнита 6, изолятор 7, держатель колодки с штекерами, выполненный из пластмассы 8, корпус сетчатого фильтра 9, фильтрующий элемент 10, уплотнительное кольцо 11, обмотка электромагнита 12, нажимная пружина 13, уплотнения 14, тифлоновое уплотнительное кольцо 15, зажимная шайба фильтра 16. Все эти элементы представлены на рисунке 1.

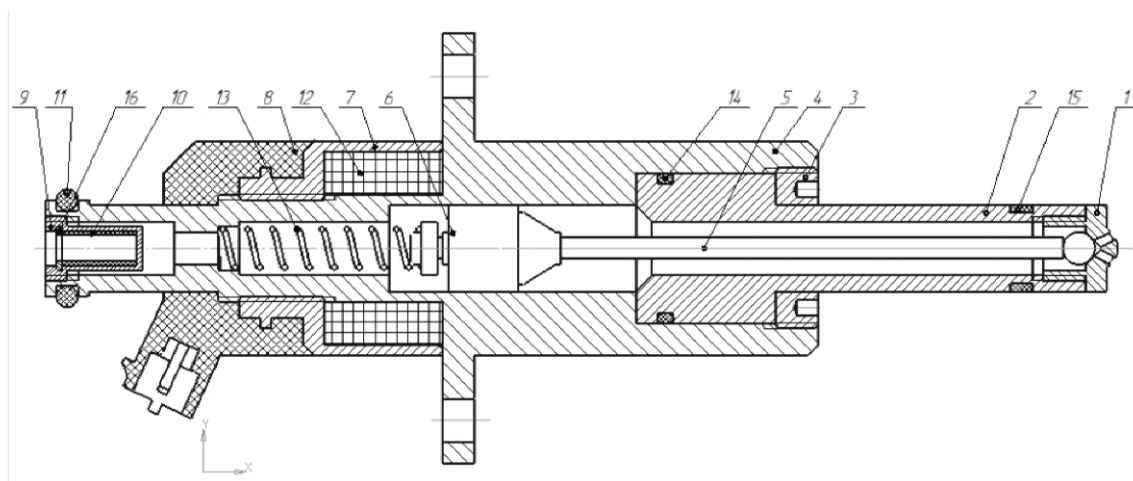


Рисунок 1 – Элементы форсунки

У электромагнитной форсунки очень простой принцип работы, он осуществляется таким образом. Исходя из заданного алгоритма подачи топлива, который заложен в блоке управления двигателя, в определенный момент обеспечивается подача напряжения на обмотку 12, в которой создается электромагнитное поле. Оно натягивает пружину, втягивает якорь электромагнита 6 и иглу распылителя 5, открывая сопло распылителя, через которое подается топливо прямо в камеру сгорания. С прекращением напряжения, пружина вместе с якорем электромагнита и иглой распылителя возвращается на исходную позицию и перекрывает сопло распылителя,

прекращая подачу топлива. Поняв принцип работы, произведем расчет электромагнитной форсунки.

5.3 Расчет электромагнитной форсунки

«Объем топлива ($\text{м}^3/\text{цикл}$), впрыскиваемого форсункой топлива за один рабочий ход четырехтактного двигателя (цикловая подача)» [6]

$$V_{\text{ц}} = \frac{g_{\text{в}} * N_{\text{в}} * 10^3}{30 * n * i * \rho_{\text{т}}} = 0,0352 \text{ м}^3/\text{цикл}, \quad (5.1)$$

«Время истечения топлива» [6]

$$\Delta t = \frac{\Delta \varphi}{n * 6} = 0.000417 \text{ с}, \quad (5.2)$$

«где Δt – угол поворота коленчатого вала, град» [6]

«Средняя скорость истечения топлива (м/с) через сопловое отверстие распылителя определяется по формуле» [6]

$$W_{\text{ф}} = \sqrt{\left(\frac{2}{\rho_{\text{т}}}\right) * \left(\frac{\rho_{\text{ф}}}{\rho_{\text{ц}}}\right)} = 277 \text{ м/с}, \quad (5.3)$$

«где $\rho_{\text{ф}}$ - среднее давление впрыска топлива, Па; $\rho_{\text{ц}}$ - среднее давление газа в цилиндре в период впрыска, Па» [6]

«Суммарная площадь сопловых отверстий форсунки находится из выражения» [6]

$$f_{\text{с}} = \frac{V_{\text{ц}}}{\mu_{\text{ф}} * w_{\text{ф}} * \Delta t * 10^3} = 0,436 \text{ мм}^2, \quad (5.4)$$

где $\mu_{\text{ф}}$ – коэффициент расхода топлива, равный 0,65 – 0,85. [6]

«Диаметр соплового отверстия форсунки» [6]

$$d_c = \sqrt{\frac{4f_c}{\pi * m}} = 0,333 \text{ мм}, \quad (5.5)$$

«где m – число сопловых отверстий» [6]

5.4 Проблема закоксовывания форсунки

Одной из главных проблем форсунок - это закоксовывание каналов распылителей, отложение на стенках нагара топлива, слоя лаков и шламов. При закоксовывании увеличивается неравномерность подачи топлива по каналам распылителя, изменяется характеристика впрыска.

Закоксовывание форсунок является следствием сложных физико-химических процессов топлива на стенках рабочей поверхности под воздействием высоких температур и окисления воздухом.

Полость сопла распылителя наполняется высокотемпературными газами из камеры сгорания. Под действием высоких температур топливо частично превращается в пар. Сначала испаряются легкие фракции, а тяжелые (смолистые) фракции задерживаются. Высокотемпературные газы, поступающие в полость сопла, содержат продукты полного и неполного сгорания топлива и масла: перекиси, гидроперекиси, свободные радикалы, альдегиды, азот, кислород, атомарные водород и кислород, гидроксильные группы и др.

Под воздействием высоких температур и газов в камере сгорания пленка топлива на поверхности распылителя нагревается, в ней совершаются процессы окисления и полимеризации молекул с выделением на рабочей поверхности лакового слоя.

Ненасыщенные соединения определяются низкой стабильностью. Из-за высоких температур и каталитического воздействия металлов ненасыщенные соединения стремительно окисляются и полимеризуются. В итоге образуются смолистые вещества.

Из богатого опыта автомобилестроения (в частности дизелестроения), где данная проблема является одной из главных, установлено, что с повышением температуры отложения слоя смол увеличивается. «Отложение смол при температуре до 190 - 220°C вызывается наличием в топливе маркаптанов, особенно ароматических и адсорбированных смол. При температурах выше 190 - 220°C отложения могут образовывать углеводороды, составляющие топливо».[21]

Гидроочистка повышает термическую и химическую стабильность топлива. В процессе гидроочистки непредельные соединения гидрируются до предельных, и затем легко удаляются из топлив промывкой.

Максимально допустимая температура распылителей в зоне сопла, организующая работу без закоксовывания каналов сопла, не соответствует у разных двигателей и зависит от количества топлива после впрыска, остающегося на рабочей поверхности распылителя, характеристик топлива и условий его окисления. «Чем хуже протекание конечной фазы подачи, тем выше интенсивность прорыва газов в распылитель, хуже термическая и химическая стабильность топлива, тем ниже температура распылителя, при которой начинается процесс закоксования проходных сечений. Поэтому рекомендуемые допустимые значения температуры распылителей для разных двигателей лежат в довольно широких пределах от 140 до 270°C».[21]

Легкие топлива и бензины обладают низкой термической стабильностью, это является следствием того, что они выделяют смолы при более низких температурах.

5.5 Способы решения проблемы закоксовывания

Как было сказано выше: во время работы двигателя распылитель омывается газами, имеющими высокую температуру, и нагревается. С увеличением температуры превышающую допустимую снижается твердость поверхностей распылителя и иглы, а также увеличивается износ. Вследствие

тепловых деформаций вероятно зависание иглы, закоксовывание сопла и ухудшение работы двигателя. Работоспособность форсунки зависит от ее тепловой напряженности, диагностику которой производят по температуре распылителя.

«Основное количество теплоты подводится к распылителю со стороны камеры сгорания вследствие непосредственного контакта с раскаленными газами и радиационного излучения, а отводится с впрыскиваемым топливом. На температуру распылителя влияют: 1) площадь поверхности, соприкасающейся с газами в камере сгорания, и особенно площадь торцевой поверхности распылителя; 2) радиальный зазор между форсункой и крышкой цилиндра; зазор должен быть минимальным, но при этом крышка и распылитель не должны касаться друг друга; 3) средняя температура и частота рабочих циклов; температура охлаждающей воды и впрыскиваемого топлива».

[15]

Чтобы уменьшить закоксовывание и тепловую напряженность распылителей используют такие методы как экранирование, охлаждение их и увеличение длины дифференциальной части иглы. Эти методы представлены на рисунке 2.

«Корпус распылителя иглу изготавливают из высоколегированных сталей. Термическая обработка должна обеспечивать получение стабильной структуры, исключающей в дальнейшем возможность каких-либо изменений размеров деталей. Поверхности пар должны быть тщательно обработаны, так как это повышает эксплуатационные качества, износостойкость и коррозионную стойкость. Частота поверхности должна соответствовать 12-му классу (по ГОСТу 2789 -58)». [15]

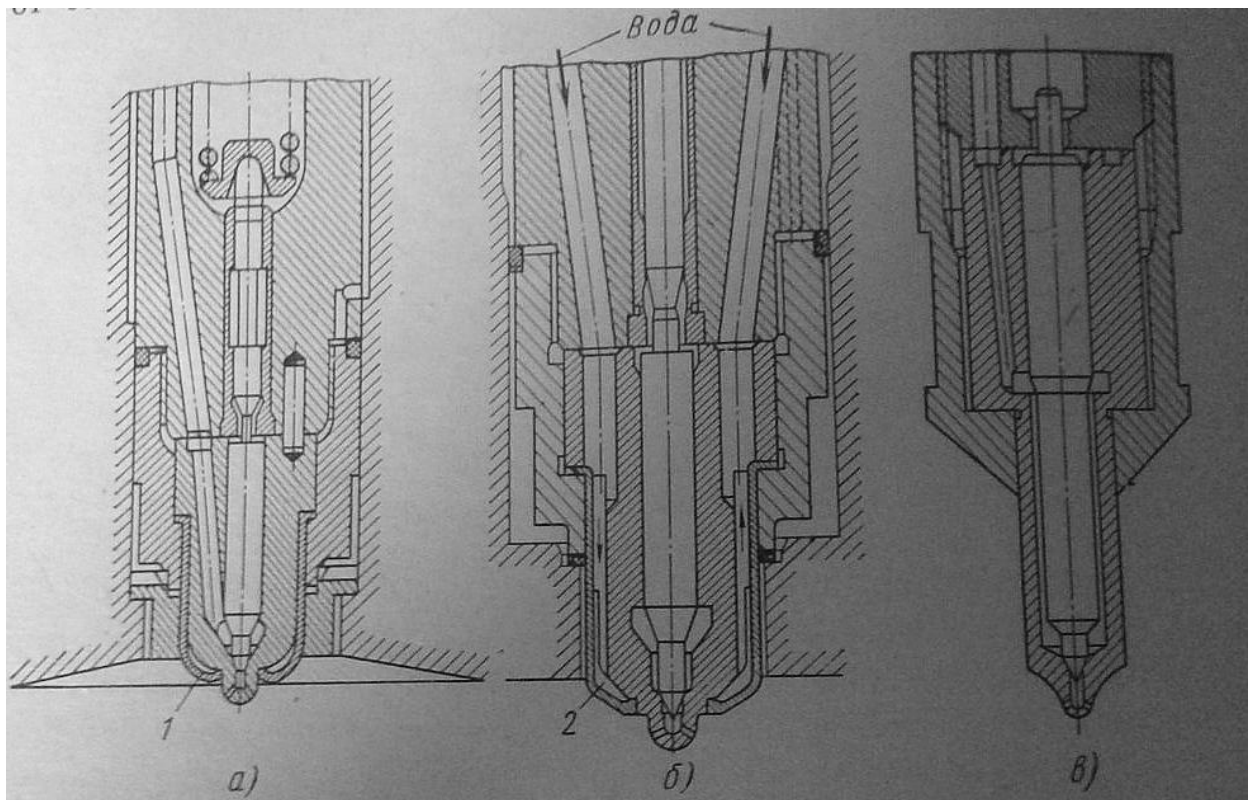


Рисунок 2 – а) экранирование; б) охлаждаемый; в) удлиненный
 где – 1 – экран, 2 – рубашка охлаждения.

Конструкция распылителей, снижающих тепловую напряженность форсунки [15]

5.6 Решение поставленной задачи

На основе выше перечисленных изложений было предложены следующие конструкционные изменения. К распылителю подводится система охлаждения. Вблизи носика распылителя были проделаны каналы рубашки охлаждения с циркулирующей в ней охлаждающей жидкостью, которая поступает непосредственно из системы охлаждения двигателем. Каналы сделаны с соображениями толщины стенок так чтобы стенка не прогорала под влиянием высоких температур, и из-за различной величины температур с различных сторон стенок не возникало деформации структуры металла. Так же непосредственно на самом сопле форсунки был добавлен теплоизолирующий экран. Материал и толщина экрана выбирается с учетом того, что при

экранировании воздействием высоких температур подвергаются тонкие стенки экрана.

Подвод рубашки охлаждения к распылителю снимает температуру и понижает тепловую напряженность распылителя. Использование экрана так же способствует эффективному снижению температуры. На основе многочисленных исследований и опыта двигателестроения использования экранирования, температура в районе сопловых отверстий не превышает примерно 170 °С, а в районе клапана распылителя примерно 140 °С, что не превышает критическую температуру. Следовательно, используя такие конструктивные решения можно снизить вероятность закоксовывания сопла форсунки, что следует повышению ресурса. Наглядно эти способы представлены на рисунке 3.

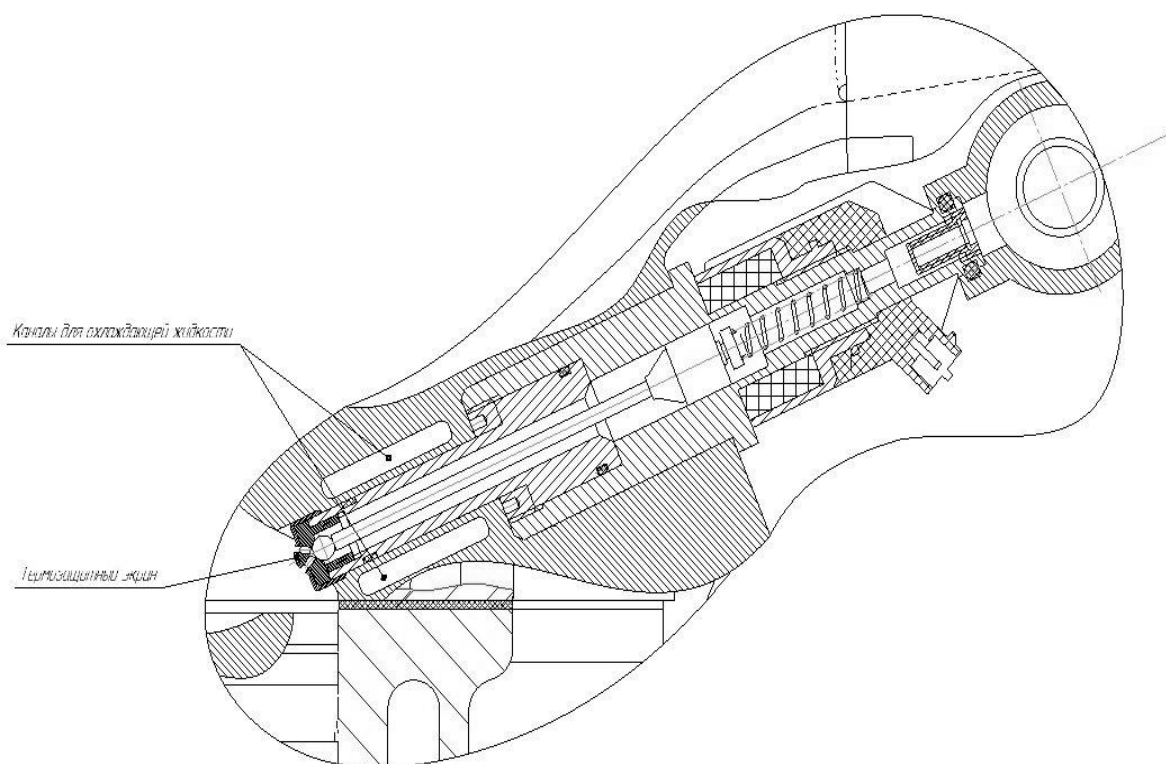


Рисунок 3 – Способы решения закоксовывания

Вывод по разделу:

При вышеперечисленных конструктивных методах по снижению температуры и тепловой напряженности в области сопла и сопловых отверстий. Наиболее эффективным можно выделить использование заградительного экрана и подвод системы охлаждения. Применяв оба этих метода можно снизить температуру ниже критической, что позволит уменьшить риск закоксовывания и вследствие улучшения ее работы. Уменьшения закоксовывания так же положительно влияют на работу двигателя, из-за лучшей работы форсунки, дозирование идет более четко, что снижает расход топлива, а вследствие и уменьшатся вредные выбросы.

6 Безопасность проекта

Выпускная квалификационная работа, которая связанная с двигателем внутреннего сгорания, требует соответствия с отечественными и международными стандартами по безопасности и защиты окружающей среды от вредных выбросов, которые производят продукты сгорания при работе двигателя. Если эти нормы не будут выполняться, данный прототип не может быть утвержден к производству и быть использован для эксплуатации. Поэтому в проектировке прототипа, были проанализированы правила и международные стандарты по вредным выбросам и так же они были использованы.

6.1 Регламент о «Безопасности колесных транспортных средствах

«ПОСТАНОВЛЕНИЕ Правительства РФ от 10-09-2009 720 (ред от 06-10-2011) об утверждении технического регламента о безопасности» [29]

«Настоящий технический регламент устанавливает требования к безопасности колесных транспортных средств при их выпуске в обращение на территории Российской Федерации и их эксплуатации независимо от места их изготовления в целях защиты жизни и здоровья граждан, охраны окружающей

среды, защиты имущества физических и юридических лиц, государственного или муниципального имущества и предупреждения действий, вводящих в заблуждение приобретателей колесных транспортных средств. К объектам технического регулирования, на которые распространяется действие настоящего технического регламента, относятся: колесные транспортные средства категорий L, M, N и O, предназначенные для эксплуатации на автомобильных дорогах общего пользования» [29] [Электронный ресурс];

6.2 Регламент о внешнем шуме в эксплуатации автомобиля

ГОСТ Р 52231-2004 Внешний шум автомобилей в эксплуатации.

«Настоящий стандарт устанавливает допустимые уровни и методы измерения внешнего шума автомобилей категорий M1, M2, M3, N1, N2, N3 при оценке их технического состояния в эксплуатации» [29] [Электронный ресурс]

«Показателем внешнего шума при проверке технического состояния автомобиля считают уровень шума выпускной системы двигателя» [29] [Электронный ресурс]

«При проверке технического состояния автомобиля допустимый уровень шума не должен превышать более чем на 5 дБ контрольное значение уровня шума, измеренное при сертификационных испытаниях по ГОСТ Р 41.51. Если полученное таким образом значение уровня шума

превышает значение, приведенное в таблице 1, то за допустимый уровень шума принимают значение из таблицы» [29] [Электронный ресурс].

«Если контрольные значения уровня шума не представляется возможным установить, то допустимый уровень шума выпускной системы автомобиля не должен превышать значений, приведенных в таблице 1» [29] [Электронный ресурс].

ГОСТ Р 41.51-2004 (Правила ЕЭК ООН N 51)

«Единообразные предписания, касающиеся сертификации транспортных средств, имеющих не менее четырех колес, в связи с производимым ими

шумом. Настоящий стандарт применяют при сертификации транспортных средств (далее - ТС), имеющих не менее четырех колес, в связи с производимым ими шумом» [29] [Электронный ресурс]

Как следует из анализа конструкторского раздела ,то выявленных нарушений по шуму работы электровентилятора не было по ГОСТ 52231-2004. Так как шум моего электровентилятора 60 дцб а допускаемое 74дцб.

6.3 Регламент о выбросах загрязняющих веществах с отработанными газами.

«При работе автомобильного двигателя выделяются вещества, оказывающие вредное влияние на человека и окружающую природу» [29] [Электронный ресурс].

«Наибольшее количество вредных веществ выделяется с отработавшими газами. Основными из них являются следующие: окись углерода CO, углеводороды CmHn, окислы азота NOx, альдегиды R-COH, соединения свинца, бензапирен (канцерогенное вещество), сажа. Кроме того, с картерными газами и при испарении бензина из карбюратора и топливного бака выделяются углеводороды (35-45% общего количества CmHn, выделяемых карбюраторным двигателем)» [29] [Электронный ресурс]

«ГОСТ Р 52033-2003 Автомобили с бензиновыми двигателями. Выбросы загрязняющих веществ с отработавшими газами. Нормы и методы контроля при оценке технического состояния» [29] [Электронный ресурс]

«Настоящий стандарт устанавливает нормативные значения содержания в отработавших газах автомобилей оксида углерода и углеводородов, нормативное значение коэффициента избытка воздуха и методы контроля при оценке технического состояния систем автомобиля и двигателя.» [29] [Электронный ресурс] “Требования настоящего стандарта должны быть обеспечены конструкцией и качеством изготовления автомобилей при

производстве и соблюдением правил их технической эксплуатации, установленных изготовителем» [29] [Электронный ресурс]

«ГОСТ Р 41.83-2004 (Правила ЕЭК ООН N 83) Единообразные предписания, касающиеся сертификации транспортных средств в отношении выбросов вредных веществ в зависимости от топлива, необходимого для двигателей» [29] [Электронный ресурс]

«Выбросов вредных веществ с отработавшими газами при нормальной и низкой температуре окружающей среды, выбросов в результате испарений и выбросов картерных газов, долговечности устройств для очистки отработавших газов, а также в отношении бортовой диагностической системы (БДС) транспортных средств, оснащенных двигателями с принудительным зажиганием и имеющих не менее четырех колес; выбросов вредных веществ с отработавшими газами, долговечности устройств для очистки отработавших газов и БДС транспортных средств категорий МГОСТ Р 41.83-2004 (Правила ЕЭК ООН N 83) Единообразные предписания, касающиеся сертификации транспортных средств в отношении выбросов вредных веществ в зависимости от топлива, необходимого для двигателей и НГОСТ Р 41.83-2004 (Правила ЕЭК ООН N 83) Единообразные предписания, касающиеся сертификации транспортных средств в отношении выбросов вредных веществ в зависимости от топлива, необходимого для двигателей* максимальной массой не более 3500 кг, оснащенных двигателями с воспламенением от сжатия и имеющих не менее четырех колес» [29] [Электронный ресурс]

«ГОСТ Р 56162-2014 Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Метод расчета выбросов от автотранспорта при проведении сводных расчетов для городских населенных пунктов» [40][Электронный ресурс]

«Настоящий стандарт устанавливает метод расчета количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу потоками автотранспортных средств на дорогах разной категории» [29] [Электронный ресурс]

Таблица 10 – Нормативные значения содержания оксида углерода и углеводородов в отработавших газах двигателя [21]

| “Комплектация автомобиля ¹ | Частота вращения коленчатого вала | Оксид углерода, объемная доля, % | Углеводороды, объемная доля, мин ⁻¹ |
|---|-----------------------------------|----------------------------------|--|
| Автомобили категорий M _{1s} N _{1s} произведенные до 01.10.1986 г. | $n_{\text{мин}}$ | 4,51 | - |
| Автомобили категорий M ₁ и N _{1s} не оснащенные системами нейтрализации отработавших газов ² | $n_{\text{мин}}$ | 3,51 | 1201 |
| | $n_{\text{пов}}$ | 2,01 | 601 |
| Автомобили категорий M ₁ и N ₁ , оборудованные двухкомпонентной системой нейтрализации отработавших газов | $n_{\text{мин}}$ | 1,01 | 401 |
| | $n_{\text{пов}}$ | 0,61 | 201 |
| Автомобили категорий M ₁ и N ₁ с трехкомпонентной системой нейтрализации отработавших газов и те же автомобили, оборудованные встроенной (бортовой) системой диагностирования.”[33] | $n_{\text{мин}}$ | 0,51 | 101 |
| | $n_{\text{пов}}$ | 0,31 | 101 |

«Настоящий стандарт предназначен для применения в следующих случаях: - при проведении инвентаризации выбросов загрязняющих веществ автотранспортными средствами, движущимися по автодорогам вне зон производственного и промышленного назначения; - при разработке нормативов предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ для потоков автотранспортных средств на автодорогах» [29] [Электронный ресурс]

Нормы по выбросам: СН до 0,05 г/км, СО до 0,8 г/км и NO_x до 0,06 г/км.

Как следует из раздела конструкторская часть дипломного проекта, конструируемый двигатель внутреннего сгорания прошел нормы по выбросам по ГОСТ Р 56162-2014, ГОСТ Р 56162-2014, ГОСТ Р 52033-2003. Уменьшились показатели таковые как:

- снижение выброса вредных веществ;
- снижение расхода топлива.

6.4 Оценка безопасности двигателя

С каждым днем количество транспортных средств возрастает непрерывно, а значит и растет процент выбросов вредных веществ с отработавшими газами. Отработавшие газы являются чрезмерно токсичными и через систему выпуска поступают в атмосферу.

Оперяясь на многочисленные испытания в этой сфере, они показывают, что в отработавших газах содержатся большое количество различных компонентов, в частности: азот (от 75 до 78 %), кислород (от 0,3 до 0,8 %), водород (от 0 до 0,5%), углеводороды (от 0,2 до 3 %), оксиды углерода (от 0,5 до 12 %) и т.д. Состав зависит от режима работы двигателя.

Двигатель с прямым впрыском имеет систему точечного дозирования и лучшего смесеобразования, что способствует уменьшению расхода топлива и вследствие уменьшения выбросов вредных веществ. Используя двигатель с прямым впрыском можно уменьшить расход топлива и выбросов CO_2 примерно на 15%. В частности того, что самый большой процент выбросов CO_2 от сжигания топлива автомобильными средствами (примерно 23%), что позволяет значительно уменьшить вредные выбросы.

Проблема возникновения нагара в каналах сопла форсунок, так же влияет на увеличение выбросов. Из-за загрязнения сопла точность дозирования снижается, впоследствии увеличивается расход топлива, и, следовательно, увеличиваются процент вредных выбросов. Способ решения этой проблемы, который представлен в данной работе, помогает снять температурное напряжение и избавиться от этой проблемы. Это способствует, как было сказано выше, улучшению показателей по расходу топлива и вредных выбросов CO_2 . Тогда двигатель будет выполнять нормы ЕЭК ООН R101 по выбросам CO_2 .

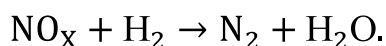
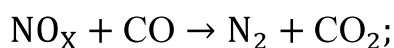
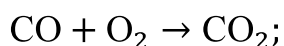
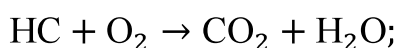
6.5 Выбор нейтрализатора.

Из-за того что процент вредных выбросов превышает нормы Евро 5, то необходимо установить на автомобиль каталитический трёхкомпонентный нейтрализатор.

Он лучше эффективен, при каком-то определенном составе отработавших газов двигателя. Это говорит о том, что нужно точно выдерживать состав, возле стехиометрического состава смеси. Если смесь будет богаче, тогда понизится эффективность нейтрализации.

Поддерживать стехиометрический состав можно одним способом, управлять смесеобразованием, незамедлительно получая информацию о процессе сгорания, другими словами создав обратную связь.

Упрощенно ход реакций в нейтрализаторе выглядит так:



В результате токсичные соединения NO_x , CO , HC окисляются или восстанавливаются до углекислого газа, азота и воды.

Основными компонентами нейтрализатора являются редкоземельные металлы: платина, палладий и родий. Платина и палладий относятся к окислительным катализаторам. Они способствуют окислению несгоревших углеводородов (HC) в водяной пар, оксида углерода (угарный газ, CO) в углекислый газ. Родий является восстановительным катализатором. Он восстанавливает оксиды азота (NO_x) в безвредный азот.

Для обеспечения эффективной работы нейтрализатора необходимо использовать только качественное неэтилированное топливо, так как содержащийся в бензине тетраэтилсвинец необратимо “отравляет” каталитическую поверхность.

Наиболее общие рекомендации при эксплуатации каталитического нейтрализатора можно изложить следующим образом:

– в холодное время года, если двигатель не запустился с первой попытки, необходимо избегать повторных включений стартера через короткие промежутки времени;

– нельзя пускать двигатель путем буксировки;

– запрещается проверять работу цилиндров, отключая свечи зажигания.

Условием эффективной работы каталитического нейтрализатора является температура 300°C. При такой температуре задерживается порядка 90% вредных веществ. С целью быстрого прогрева нейтрализатора при запуске двигателя осуществляются следующие мероприятия:

– установка нейтрализатора непосредственно за выпускным коллектором;

– повышение температуры выхлопных газов за счет обогащения топливно-воздушной смеси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе был проведен расчет двигателя на базе двигателя ВАЗ - 11194, который оснащен системой прямого впрыска топливом. Его можно использовать на легковом автомобиле. Были проведены такие расчеты как тепловой, динамический, кинематический и прочностной. Результаты вышеперечисленных расчетов вынесены на плакаты.

В специальной части была описана базовая форсунка, принцип ее работы и проведен ее расчет, так же проведен анализ возникновения загрязнений, форсунки, были выявлены причины. Еще помимо этого проведен анализ различных методов снятия температурного напряжения и понижения загрязнения нагара сопла форсунки. Данный метод можно использовать на данных типах двигателя легковых автомобилей.

Проведенные исследования и конструкторские мероприятия, выявляют ряд плюсов и минусов:

К плюсам можно отнести:

- снижение температуры в сопле форсунки
- дешевизна изготовления
- простота использования
- увеличение надежности форсунки

К минусам можно отнести:

- проведение рубашки охлаждения, что уменьшает толщину стенок
- установка насоса высокого давления, что увеличивает габариты двигателя
- система прямого впрыска не до конца изучена и идеальна

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя [Текст] / В.И. Анурьев// В 3-х т. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. –296 с.
- 2 Ганенко А.П. Оформление текстовых и графических материалов при подготовке дипломных проектов (требования ЕСКД) [Текст]/Учебное пособие для проф. образов. Ганенко А. П., Молславская Ю.П.-2е изд., стереотип.- М.: ИРПО; Изд. Центр Академия, 2000 - 352с.
- 3 Дзюбан А.М. Тепловой и динамический расчеты автомобильных и тракторных двигателей внутреннего сгорания: Учебно-метод. пособие [Текст]/ Под ред. А.П. Шайкина. – Тольятти: ТГУ, 2006. – 68 с.
- 4 Егоров А.Г. Правила оформления выпускных квалификационных работ по программам подготовки бакалавра и специалиста [Текст] / учебно-методическое пособие / А.Г. Егоров, В.Г. Виткалов, Г.Н. Уполовникова, И.А. Живоглядова – Тольятти, 2012, - 135с.
- 5 Казедорф Ю., Войзетшлегер Э. Системы впрыска зарубежных автомобилей. Устройство, регулировка, ремонт [Текст]: Пер. с немецкого. Под ред. канд. техн. Наук А.С. Тюфякова. – М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2000 – 256 с., ил.
- 6 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. - 400с.
- 7 Корчажкин М.Г., Пачурин Г.В., Беляев Д.В. Особенности эффективности работы систем охлаждения автомобильных двигателей в условиях повышенных температур // Фундаментальные исследования. [Текст] Пачурин Г.В., Беляев Д.В. – 2015. – № 8-1. – С. 64-67; URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=38847> (дата обращения: 30.05.2017)
- 8 Ложкин А. М. Расчёт и анализ параметров рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания. Учебное пособие [Текст]/ Л43 Ложкин

М.Н., Дзюбан А.М.: Учебное пособие / Под редакцией А.П. Шайкина-Тольятти: 2008.- 101 с.

9 Луканин В.Н. Двигатели внутреннего сгорания. В 3кн. Кн 1 Теория Д23 рабочих процессов: Учебник для вузов[Текст]/ Луканин В.Н., Морозов К.А и др.Под ред. В.Н. Луканина, 2е изд. перераб и доп. – М.: «Высшая школа», 2005 - 479с.: ил.

10 Луканин В.Н. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн.Кн.2. Динамика Д23 и конструирование: Учебник для вузов [Текст]//В.Н. Луканин, И.В. Алексеев.; Под ред. В. Н. Луканина и М.Г. Шатрова .- 3-е изд. перераб.- М.:Высш.шк.,2007.- 400с.: ил.

11 Лышевский А.С. Система питания дизелей: Учеб. Пособие для студентов втузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст], - М.: Машиностроение, 1981, - 216 с., ил.

12 Малкин В.С. Надежность технических систем и техногенный риск [Текст]// В.С Малкин.- Ростов н/Д Феникс,2010-432, [1] с.: ил.

13 Методы и средства обеспечения безопасности труда в машиностроении. [Текст] Учебн. Для вузов/В.Г. Еремин, В.В. Сафонов, А.Г. Схиртладзе, Г.А. Харламов; Под ред. Ю.М. Соломенцева. - М.: «Высшая школа», 2000 – 326 с.: ил.

14 Орлин А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для студентов втузов, 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.

15 Орлин А.С. Двигатели внутреннего сгорания [Текст]/ Учебное пособие для вузов - 4 том. М: Машиностроение 1973 -477 с.

16 Попык К.Г. Конструирование и расчет автомобильных и тракторных двигателей [Текст]. – М.: Издательство «Высшая школа», 1967 – 381 с.

- 17 Райков И. Я., Рытвинский Г.Н. Конструкция автомобильных и тракторных двигателей [Текст]/Учебн. Райков И. Я., Рытвинский Г.Н для вузов по спец. Двигатели внутреннего сгорания. - М.:Высш.шк.,1986-352с.:ил.
- 18 Спинов А.Р. Системы впрыска бензиновых двигателей. [Текст] – М.: Машиностроение, 1995, - 112 с.: ил.
- 19 Сыркин П.Э., Гурвич И.Б. Надежность автомобильных двигателей. [Текст] Учебное пособие. Горький, изд. ГПИ им. А.А. Жданова, 1981, 95с.
- 20 Тареев В.М. Справочник по тепловому расчету рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания. [Текст] Л.: Издательство «Речной транспорт» (Ленинградское отделение), 1961 – 416с.
- 21 Трусов В.И., Дмитренко В.П., Масляников Г.Д. Форсунки автотракторных дизелей [Текст]/ Учебное пособие для вузов – М: Машиностроение, 1977 – 167с.
- 22 How car cooling system works [Электронный источник] - URI <https://mgitecotech.wordpress.com/2011/06/28/how-car-cooling-system-works/> [Текст] (дата доступа 06.04.2017).
- 23 A centrifugal pump and a water pum [Электронный источник] - URI <http://autoworld.50webs.com/carcooling.html> [Текст] (дата доступа 06.04.2017).
- 24 Automobile Cooling System [Электронный источник] - URI <http://www.automotive-online.com/cooling-system/>[Текст] (дата доступа 14.03.2017).
- 25 Radiator Repair Guides [Электронный источник] - URI. <http://www.radiatorrepair.com/automotive-cooling-system-works/>[Текст] (дата доступа 06.04.2017).
- 26 Service Volkswagen Программа самообучения 222 Система охлаждения двигателя с электронным регулированием [Текст] Научный журнал -28с.
- 27 Автомануалы [Электронный ресурс] //URL:<http://automn.ru/>[Текст] (дата доступа 30. 05. 2017).

28 Jones P., et al, “Full Cycle Computational Fluid Dynamics Calculations in a Motored Four Valve Pent Roof Combustion Chamber and Comparison with Experiment” [Текст], SAE, SP 1101, №950286, 131-146, 2001.

29 Консорциум кодекс [Электронный ресурс] [Текст] <http://docs.cntd.ru/>
(дата доступа 1.06.17)

Приложение А

Таблица А1-Расчетные значения перемещения, скорости и ускорения поршня

| Угол поворота кривошипа | Перемещение поршня | Скорость поршня | Ускорение поршня первого порядка | Ускорение поршня второго порядка | Ускорение поршня |
|-------------------------|--------------------|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| φ , град | S, метр | V, м/с | W1, м/с ² | W2, м/с ² | W, м/с ² |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 0 | 0 | 0 | 11414 | 3252,9 | 14667 |
| 10 | 0,0007 | 4,6192 | 11240 | 3056,7 | 14297 |
| 20 | 0,0029 | 9,0067 | 10725 | 2491,9 | 13217 |
| 30 | 0,0064 | 12,949 | 9884,6 | 1626,5 | 11511 |
| 40 | 0,0111 | 16,266 | 8743,4 | 564,86 | 9308,3 |
| 50 | 0,0167 | 18,827 | 7336,6 | -564,9 | 6771,7 |
| 60 | 0,0229 | 20,552 | 5706,9 | -1626 | 4080,4 |
| 70 | 0,0296 | 21,421 | 3903,7 | -2492 | 1411,8 |
| 80 | 0,0365 | 21,468 | 1982 | -3057 | -1075 |
| 90 | 0,0432 | 20,771 | 7E-13 | -3253 | -3253 |
| 100 | 0,0496 | 19,443 | -1982 | -3057 | -5039 |
| 110 | 0,0555 | 17,616 | -3903,7 | -2492 | -6396 |
| 120 | 0,0607 | 15,425 | -5706,9 | -1626 | -7333 |
| 130 | 0,0653 | 12,997 | -7336,6 | -564,9 | -7901 |
| 140 | 0,069 | 10,436 | -8743,4 | 564,86 | -8179 |
| 150 | 0,0719 | 7,8222 | -9884,6 | 1626,5 | -8258 |
| 160 | 0,074 | 5,2016 | -10725 | 2491,9 | -8234 |
| 170 | 0,0752 | 2,5945 | -11240 | 3056,7 | -8184 |
| 180 | 0,0756 | 2E-15 | -11414 | 3252,9 | -8161 |
| 190 | 0,0752 | -2,5945 | -11240 | 3056,7 | -8184 |
| 200 | 0,074 | -5,2016 | -10725 | 2491,9 | -8234 |
| 210 | 0,0719 | -7,8222 | -9884,6 | 1626,5 | -8258 |
| 220 | 0,069 | -10,436 | -8743,4 | 564,86 | -8179 |

Продолжение таблицы А1

| | | | | | |
|-----|--------|---------|---------|--------|--------|
| 230 | 0,0653 | -12,997 | -7336,6 | -564,9 | -7901 |
| 240 | 0,0607 | -15,425 | -5706,9 | -1626 | -7333 |
| 250 | 0,0555 | -17,616 | -3903,7 | -2492 | -6396 |
| 260 | 0,0496 | -19,443 | -1982 | -3057 | -5039 |
| 270 | 0,0432 | -20,771 | -2E-12 | -3253 | -3253 |
| 280 | 0,0365 | -21,468 | 1982 | -3057 | -1075 |
| 290 | 0,0296 | -21,421 | 3903,7 | -2492 | 1411,8 |
| 300 | 0,0229 | -20,552 | 5706,9 | -1626 | 4080,4 |
| 310 | 0,0167 | -18,827 | 7336,6 | -564,9 | 6771,7 |
| 320 | 0,0111 | -16,266 | 8743,4 | 564,86 | 9308,3 |
| 330 | 0,0064 | -12,949 | 9884,6 | 1626,5 | 11511 |
| 340 | 0,0029 | -9,0067 | 10725 | 2491,9 | 13217 |
| 350 | 0,0007 | -4,6192 | 11240 | 3056,7 | 14297 |
| 360 | 0 | -7E-15 | 11414 | 3252,9 | 14667 |
| 370 | 0,0007 | 4,6192 | 11240 | 3056,7 | 14297 |
| 380 | 0,0029 | 9,0067 | 10725 | 2491,9 | 13217 |
| 390 | 0,0064 | 12,949 | 9884,6 | 1626,5 | 11511 |
| 400 | 0,0111 | 16,266 | 8743,4 | 564,86 | 9308,3 |
| 410 | 0,0167 | 18,827 | 7336,6 | -564,9 | 6771,7 |
| 420 | 0,0229 | 20,552 | 5706,9 | -1626 | 4080,4 |
| 430 | 0,0296 | 21,421 | 3903,7 | -2492 | 1411,8 |
| 440 | 0,0365 | 21,468 | 1982 | -3057 | -1075 |
| 450 | 0,0432 | 20,771 | 3E-12 | -3253 | -3253 |
| 460 | 0,0496 | 19,443 | -1982 | -3057 | -5039 |
| 470 | 0,0555 | 17,616 | -3903,7 | -2492 | -6396 |
| 480 | 0,0607 | 15,425 | -5706,9 | -1626 | -7333 |
| 490 | 0,0653 | 12,997 | -7336,6 | -564,9 | -7901 |
| 500 | 0,069 | 10,436 | -8743,4 | 564,86 | -8179 |
| 510 | 0,0719 | 7,8222 | -9884,6 | 1626,5 | -8258 |
| 520 | 0,074 | 5,2016 | -10725 | 2491,9 | -8234 |
| 530 | 0,0752 | 2,5945 | -11240 | 3056,7 | -8184 |

Продолжение таблицы А1

| | | | | | |
|-----|--------|---------|---------|--------|--------|
| 540 | 0,0756 | 5E-15 | -11414 | 3252,9 | -8161 |
| 550 | 0,0752 | -2,5945 | -11240 | 3056,7 | -8184 |
| 560 | 0,074 | -5,2016 | -10725 | 2491,9 | -8234 |
| 570 | 0,0719 | -7,8222 | -9884,6 | 1626,5 | -8258 |
| 580 | 0,069 | -10,436 | -8743,4 | 564,86 | -8179 |
| 590 | 0,0653 | -12,997 | -7336,6 | -564,9 | -7901 |
| 600 | 0,0607 | -15,425 | -5706,9 | -1626 | -7333 |
| 610 | 0,0555 | -17,616 | -3903,7 | -2492 | -6396 |
| 620 | 0,0496 | -19,443 | -1982 | -3057 | -5039 |
| 630 | 0,0432 | -20,771 | -5E-12 | -3253 | -3253 |
| 640 | 0,0365 | -21,468 | 1982 | -3057 | -1075 |
| 650 | 0,0296 | -21,421 | 3903,7 | -2492 | 1411,8 |
| 660 | 0,0229 | -20,552 | 5706,9 | -1626 | 4080,4 |
| 670 | 0,0167 | -18,827 | 7336,6 | -564,9 | 6771,7 |
| 680 | 0,0111 | -16,266 | 8743,4 | 564,86 | 9308,3 |
| 690 | 0,0064 | -12,949 | 9884,6 | 1626,5 | 11511 |
| 700 | 0,0029 | -9,0067 | 10725 | 2491,9 | 13217 |
| 710 | 0,0007 | -4,6192 | 11240 | 3056,7 | 14297 |
| 720 | 0 | -1E-14 | 11414 | 3252,9 | 14667 |

Приложение Б

Таблица Б1 – Расчеты динамики двигателя

| ϕ° | Δp_r (МПа) | j , м/с ² | p_j , МПа | p , МПа | $\text{tg } \beta$ | p_N , МПа | $1/\cos \beta$ | p_s , МПа | $\frac{\cos(\varphi + \beta)}{\cos \beta}$ | p_k , МПа | $\frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta}$ | p_T , МПа | T , кН | M_{sp} и Н |
|--------------|--------------------|------------------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|----------------|-------------|--|-------------|--|-------------|----------|--------------|
| 0 | 0,11 | 14667 | -2,218 | -2,1082 | 0 | 0 | 1 | -2,1082 | 1 | -2,1082 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0,1028 | 14297 | -2,162 | -2,0595 | 0,05 | -0,103 | 1,001 | -2,0616 | 0,976 | -2,0101 | 0,223 | -0,4593 | -2,1099 | -79,7549 |
| 20 | 0,0994 | 13217 | -1,999 | -1,8996 | 0,1 | -0,19 | 1,005 | -1,9091 | 0,906 | -1,721 | 0,436 | -0,8282 | -3,8049 | -143,824 |
| 30 | 0,0985 | 11511 | -1,741 | -1,6424 | 0,146 | -0,2398 | 1,011 | -1,6605 | 0,793 | -1,3025 | 0,627 | -1,0298 | -4,7309 | -178,829 |
| 40 | 0,0989 | 9308,3 | -1,408 | -1,3089 | 0,189 | -0,2474 | 1,018 | -1,3324 | 0,645 | -0,8442 | 0,788 | -1,0314 | -4,7382 | -179,104 |
| 50 | 0,0994 | 6771,7 | -1,024 | -0,9248 | 0,226 | -0,209 | 1,025 | -0,9479 | 0,469 | -0,4337 | 0,912 | -0,8434 | -3,8747 | -146,464 |
| 60 | 0,0985 | 4080,4 | -0,617 | -0,5186 | 0,257 | -0,1333 | 1,032 | -0,5352 | 0,277 | -0,1437 | 0,995 | -0,516 | -2,3706 | -89,6103 |
| 70 | 0,096 | 1411,8 | -0,214 | -0,1176 | 0,28 | -0,0329 | 1,039 | -0,1222 | 0,078 | -0,0092 | 1,035 | -0,1217 | -0,5591 | -21,1326 |
| 80 | 0,0947 | -1075 | 0,1625 | 0,2572 | 0,295 | 0,0759 | 1,043 | 0,2683 | 0,117 | -0,0301 | 1,036 | 0,2665 | 1,2242 | 46,2757 |
| 90 | 0,0985 | -3253 | 0,492 | 0,5905 | 0,3 | 0,1771 | 1,044 | 0,6165 | -0,3 | -0,1771 | 1 | 0,5905 | 2,7126 | 102,5374 |
| 100 | 0,1094 | -5039 | 0,7621 | 0,8714 | 0,295 | 0,2571 | 1,043 | 0,9089 | 0,464 | -0,4043 | 0,934 | 0,8139 | 3,739 | 141,3355 |
| 110 | 0,1219 | -6396 | 0,9673 | 1,0891 | 0,28 | 0,305 | 1,039 | 1,1316 | 0,606 | -0,66 | 0,844 | 0,9192 | 4,223 | 159,6279 |
| 120 | 0,1286 | -7333 | 1,1091 | 1,2377 | 0,257 | 0,3181 | 1,032 | 1,2773 | - | -0,8948 | 0,737 | 0,9122 | 4,1904 | 158,3988 |

Продолжение таблицы Б1

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|-------|--------|--------|-------|---------|--------|---------|-------|---------|-------|---------|---------|----------|
| 130 | 0,1243 | -7901 | 1,195 | 1,3193 | 0,226 | 0,2982 | 1,025 | 1,3523 | 0,816 | -1,0766 | 0,62 | 0,818 | 3,7578 | 142,0432 |
| 140 | 0,1124 | -8179 | 1,2369 | 1,3493 | 0,189 | 0,255 | 1,018 | 1,3736 | 0,887 | -1,1969 | 0,498 | 0,672 | 3,087 | 116,6905 |
| 150 | 0,0985 | -8258 | 1,249 | 1,3475 | 0,146 | 0,1967 | 1,011 | 1,3623 | 0,939 | -1,2653 | 0,373 | 0,5026 | 2,309 | 87,2788 |
| 160 | 0,088 | -8234 | 1,2452 | 1,3333 | 0,1 | 0,1333 | 1,005 | 1,3399 | 0,974 | -1,2986 | 0,248 | 0,3307 | 1,519 | 57,4185 |
| 170 | 0,0863 | -8184 | 1,2377 | 1,324 | 0,05 | 0,0662 | 1,001 | 1,3253 | 0,994 | -1,316 | 0,124 | 0,1642 | 0,7542 | 28,509 |
| 180 | 0,0985 | -8161 | 1,2342 | 1,3327 | 0 | 0 | -1 | -1,3327 | -1 | -1,3327 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 190 | 0,1264 | -8184 | 1,2377 | 1,3641 | -0,05 | -0,0682 | -1,001 | -1,3654 | 0,994 | -1,3559 | 0,124 | -0,1692 | -0,7771 | -29,3728 |
| 200 | 0,1572 | -8234 | 1,2452 | 1,4024 | -0,1 | -0,1402 | 1,005 | 1,4094 | 0,974 | -1,366 | 0,248 | -0,3478 | -1,5978 | -60,3967 |
| 210 | 0,1745 | -8258 | 1,249 | 1,4234 | 0,146 | -0,2078 | -1,011 | -1,4391 | 0,939 | -1,3366 | 0,373 | -0,5309 | -2,4391 | -92,1986 |
| 220 | 0,1678 | -8179 | 1,2369 | 1,4047 | 0,189 | -0,2655 | -1,018 | -1,43 | 0,887 | -1,246 | 0,498 | -0,6995 | -3,2137 | -121,478 |
| 230 | 0,1502 | -7901 | 1,195 | 1,3452 | 0,226 | -0,304 | -1,025 | -1,3788 | 0,816 | -1,0977 | -0,62 | -0,834 | -3,8315 | -144,83 |
| 240 | 0,1405 | -7333 | 1,1091 | 1,2496 | 0,257 | -0,3211 | -1,032 | -1,2896 | 0,723 | -0,9035 | 0,737 | -0,9209 | -4,2308 | -159,925 |
| 250 | 0,1532 | -6396 | 0,9673 | 1,1204 | -0,28 | -0,3137 | -1,039 | -1,1641 | 0,606 | -0,679 | 0,844 | -0,9457 | -4,3444 | -164,217 |
| 260 | 0,1844 | -5039 | 0,7621 | 0,9465 | 0,295 | -0,2792 | -1,043 | -0,9872 | 0,464 | -0,4392 | 0,934 | -0,884 | -4,061 | -153,507 |
| 270 | 0,2256 | -3253 | 0,492 | 0,7175 | -0,3 | -0,215 | -1,044 | -0,75 | -0,3 | -0,2153 | -1 | -0,7175 | -3,2962 | -124,6 |

Продолжение таблицы Б1

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|---------|-------|---------|--------|---------|-------|---------|-------|---------|---------|----------|
| 280 | 0,2732 | -1075 | 0,1625 | 0,4358 | 0,295 | -0,1286 | -1,043 | -0,4545 | 0,117 | -0,051 | 1,036 | -0,4515 | -2,074 | -78,3985 |
| 290 | 0,3459 | 1411,8 | -0,214 | 0,1324 | 0,28 | 0,0371 | -1,039 | -0,1375 | 0,078 | 0,0103 | 1,035 | -0,137 | -0,6293 | -23,7885 |
| 300 | 0,4711 | 4080,4 | -0,617 | -0,1461 | 0,257 | 0,0375 | -1,032 | 0,1507 | 0,277 | -0,0405 | 0,995 | 0,1453 | 0,6677 | 25,2384 |
| 310 | 0,6795 | 6771,7 | -1,024 | -0,3447 | 0,226 | 0,0779 | -1,025 | 0,3533 | 0,469 | -0,1616 | 0,912 | 0,3143 | 1,444 | 54,5848 |
| 190 | 0,974 | 9308,3 | -1,408 | -0,4338 | 0,189 | 0,082 | -1,018 | 0,4416 | 0,645 | -0,2798 | 0,788 | 0,3418 | 1,5704 | 59,3615 |
| 200 | 1,3399 | 11511 | -1,741 | -0,401 | 0,146 | 0,0585 | -1,011 | 0,4054 | 0,793 | -0,318 | 0,627 | 0,2514 | 1,1551 | 43,6634 |
| 210 | 1,7598 | 13217 | -1,999 | -0,2392 | -0,1 | 0,0239 | -1,005 | 0,2404 | 0,906 | -0,2167 | 0,436 | 0,1043 | 0,4791 | 18,1108 |
| 220 | 2,2646 | 14297 | -2,162 | 0,1023 | -0,05 | -0,0051 | -1,001 | -0,1024 | 0,976 | 0,0998 | 0,223 | -0,0228 | -0,1048 | -3,9614 |
| 230 | 2,9575 | 14667 | -2,218 | 0,7393 | 0 | 0 | 1 | 0,7393 | 1 | 0,7393 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 240 | 4,1696 | 14297 | -2,162 | 2,0073 | 0,05 | 0,1004 | 1,001 | 2,0093 | 0,976 | 1,9591 | 0,223 | 0,4476 | 2,0564 | 77,7306 |
| 250 | 8,535 | 13217 | -1,999 | 6,536 | 0,1 | 0,6536 | 1,005 | 6,5687 | 0,906 | 5,9216 | 0,436 | 2,8497 | 13,0915 | 494,8597 |
| 260 | 5,2919 | 11511 | -1,741 | 3,551 | 0,146 | 0,5184 | 1,011 | 3,59 | 0,793 | 2,8159 | 0,627 | 2,2265 | 10,2284 | 386,6336 |
| 270 | 3,6033 | 9308,3 | -1,408 | 2,1955 | 0,189 | 0,4149 | 1,018 | 2,235 | 0,645 | 1,4161 | 0,788 | 1,73 | 7,9478 | 300,4265 |
| 280 | 2,7102 | 6771,7 | -1,024 | 1,686 | 0,226 | 0,381 | 1,025 | 1,7281 | 0,469 | 0,7907 | 0,912 | 1,5376 | 7,0638 | 267,0128 |
| 290 | 2,1133 | 4080,4 | -0,617 | 1,4962 | 0,257 | 0,3845 | 1,032 | 1,5441 | 0,277 | 0,4144 | 0,995 | 1,4887 | 6,8392 | 258,5211 |
| 300 | 1,6684 | 1411,8 | -0,214 | 1,4549 | 0,28 | 0,4074 | 1,039 | 1,5116 | 0,078 | 0,1135 | 1,035 | 1,5058 | 6,9176 | 261,4846 |
| 310 | 1,3309 | -1075 | 0,1625 | 1,4935 | 0,295 | 0,4406 | 1,043 | 1,5577 | - | -0,1747 | 1,036 | 1,5473 | 7,1081 | 268,6856 |

Продолжение таблицы Б1

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|-------|--------|--------|-------|---------|--------|---------|-------|---------|-------|---------|---------|----------|
| 320 | 1,0837 | -3253 | 0,492 | 1,5757 | 0,3 | 0,4727 | 1,044 | 1,645 | -0,3 | -0,4727 | 1 | 1,5757 | 7,2388 | 273,6275 |
| 330 | 0,9124 | -5039 | 0,7621 | 1,6744 | 0,295 | 0,494 | 1,043 | 1,7464 | 0,464 | -0,7769 | 0,934 | 1,5639 | 7,1845 | 271,5757 |
| 340 | 0,7919 | -6396 | 0,9673 | 1,7592 | 0,28 | 0,4926 | 1,039 | 1,8278 | 0,606 | -1,0661 | 0,844 | 1,4847 | 6,8209 | 257,8304 |
| 350 | 0,7019 | -7333 | 1,1091 | 1,811 | 0,257 | 0,4654 | 1,032 | 1,8689 | 0,723 | -1,3094 | 0,737 | 1,3347 | 6,1316 | 231,7756 |
| 360 | 0,6274 | -7901 | 1,195 | 1,8224 | 0,226 | 0,4119 | 1,025 | 1,868 | 0,816 | -1,4871 | 0,62 | 1,1299 | 5,1908 | 196,2111 |
| 370 | 0,562 | -8179 | 1,2369 | 1,7989 | 0,189 | 0,34 | 1,018 | 1,8313 | 0,887 | -1,5956 | 0,498 | 0,8959 | 4,1155 | 155,5672 |
| 380 | 0,5012 | -8258 | 1,249 | 1,7501 | 0,146 | 0,2555 | 1,011 | 1,7694 | 0,939 | -1,6434 | 0,373 | 0,6528 | 2,9989 | 113,3601 |
| 390 | 0,4406 | -8234 | 1,2452 | 1,6859 | 0,1 | 0,1686 | 1,005 | 1,6943 | 0,974 | -1,642 | 0,248 | 0,4181 | 1,9207 | 72,6034 |
| 400 | 0,3764 | -8184 | 1,2377 | 1,6141 | 0,05 | 0,0807 | 1,001 | 1,6157 | 0,994 | -1,6044 | 0,124 | 0,2001 | 0,9195 | 34,7555 |
| 410 | 0,3045 | -8161 | 1,2342 | 1,5387 | 0 | 0 | -1 | -1,5387 | -1 | -1,5387 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 420 | 0,225 | -8184 | 1,2377 | 1,4627 | -0,05 | -0,0731 | -1,001 | -1,4642 | 0,994 | -1,4539 | 0,124 | -0,1814 | -0,8332 | -31,4962 |
| 430 | 0,1535 | -8234 | 1,2452 | 1,3987 | -0,1 | -0,1399 | 1,005 | 1,4057 | 0,974 | -1,3623 | 0,248 | -0,3469 | -1,5936 | -60,237 |
| 440 | 0,1092 | -8258 | 1,249 | 1,3582 | 0,146 | -0,1983 | -1,011 | -1,3731 | 0,939 | -1,2753 | 0,373 | -0,5066 | -2,3273 | -87,9715 |
| 450 | 0,1039 | -8179 | 1,2369 | 1,3409 | 0,189 | -0,2534 | -1,018 | -1,365 | 0,887 | -1,1894 | 0,498 | -0,6678 | -3,0677 | -115,958 |
| 460 | 0,1218 | -7901 | 1,195 | 1,3168 | 0,226 | -0,2976 | -1,025 | -1,3497 | 0,816 | -1,0745 | -0,62 | -0,8164 | -3,7506 | -141,774 |

Продолжение таблицы Б1

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|---------|-------|---------|--------|---------|-------|---------|-------|---------|---------|----------|
| 470 | 0,1405 | -7333 | 1,1091 | 1,2496 | 0,257 | -0,3211 | -1,032 | -1,2896 | 0,723 | -0,9035 | 0,737 | -0,9209 | -4,2308 | -159,925 |
| 480 | 0,1432 | -6396 | 0,9673 | 1,1105 | -0,28 | -0,3109 | -1,039 | -1,1538 | 0,606 | -0,6729 | 0,844 | -0,9372 | -4,3057 | -162,754 |
| 490 | 0,133 | -5039 | 0,7621 | 0,8951 | 0,295 | -0,2641 | -1,043 | -0,9336 | 0,464 | -0,4153 | 0,934 | -0,836 | -3,8406 | -145,175 |
| 500 | 0,1224 | -3253 | 0,492 | 0,6143 | -0,3 | -0,1843 | -1,044 | -0,6414 | -0,3 | -0,1843 | -1 | -0,6144 | -2,8223 | -106,683 |
| 510 | 0,1158 | -1075 | 0,1625 | 0,2783 | 0,295 | -0,0821 | -1,043 | -0,2903 | 0,117 | -0,0326 | 1,036 | -0,2884 | -1,3247 | -50,0752 |
| 520 | 0,1143 | 1411,8 | -0,214 | -0,0992 | 0,28 | -0,0278 | -1,039 | 0,1031 | 0,078 | -0,0077 | 1,035 | 0,1027 | 0,4716 | 17,8282 |
| 530 | 0,1162 | 4080,4 | -0,617 | -0,5009 | 0,257 | 0,1287 | -1,032 | 0,517 | 0,277 | -0,1388 | 0,995 | 0,4984 | 2,2898 | 86,5538 |
| 540 | 0,1191 | 6771,7 | -1,024 | -0,9051 | 0,226 | 0,2045 | -1,025 | 0,9277 | 0,469 | -0,4245 | 0,912 | 0,8254 | 3,7919 | 143,3355 |
| 550 | 0,1191 | 9308,3 | -1,408 | -1,2887 | 0,189 | 0,2436 | -1,018 | 1,3119 | 0,645 | -0,8312 | 0,788 | 1,0155 | 4,6652 | 176,3456 |
| 560 | 0,1117 | 11511 | -1,741 | -1,6293 | 0,146 | 0,2379 | -1,011 | 1,6472 | 0,793 | -1,292 | 0,627 | 1,0216 | 4,693 | 177,3965 |
| 570 | 0,0924 | 13217 | -1,999 | -1,9066 | -0,1 | 0,1907 | -1,005 | 1,9162 | 0,906 | -1,7274 | 0,436 | 0,8313 | 3,8189 | 144,3562 |
| 580 | 0,0567 | 14297 | -2,162 | -2,1056 | -0,05 | 0,1053 | -1,001 | 2,1077 | 0,976 | -2,0551 | 0,223 | 0,4696 | 2,1571 | 81,5397 |
| 590 | 0 | 14667 | -2,218 | -2,2182 | 0 | 0 | 1 | -2,2182 | 1 | -2,2182 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 600 | 0,11 | 14667 | -2,218 | -2,1082 | 0 | 0 | 1 | -2,1082 | 1 | -2,1082 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 610 | 0,1028 | 14297 | -2,162 | -2,0595 | 0,05 | -0,103 | 1,001 | -2,0616 | 0,976 | -2,0101 | 0,223 | -0,4593 | -2,1099 | -79,7549 |

Продолжение таблицы Б1

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|---------|----------|
| 620 | 0,0994 | 13217 | -1,999 | -1,8996 | 0,1 | -0,19 | 1,005 | -1,9091 | 0,906 | -1,721 | 0,436 | -0,8282 | -3,8049 | -143,824 |
| 630 | 0,0985 | 11511 | -1,741 | -1,6424 | 0,146 | -0,2398 | 1,011 | -1,6605 | 0,793 | -1,3025 | 0,627 | -1,0298 | -4,7309 | -178,829 |
| 640 | 0,0989 | 9308,3 | -1,408 | -1,3089 | 0,189 | -0,2474 | 1,018 | -1,3324 | 0,645 | -0,8442 | 0,788 | -1,0314 | -4,7382 | -179,104 |
| 650 | 0,0994 | 6771,7 | -1,024 | -0,9248 | 0,226 | -0,209 | 1,025 | -0,9479 | 0,469 | -0,4337 | 0,912 | -0,8434 | -3,8747 | -146,464 |
| 660 | 0,0985 | 4080,4 | -0,617 | -0,5186 | 0,257 | -0,1333 | 1,032 | -0,5352 | 0,277 | -0,1437 | 0,995 | -0,516 | -2,3706 | -89,6103 |
| 670 | 0,096 | 1411,8 | -0,214 | -0,1176 | 0,28 | -0,0329 | 1,039 | -0,1222 | 0,078 | -0,0092 | 1,035 | -0,1217 | -0,5591 | -21,1326 |
| 680 | 0,0947 | -1075 | 0,1625 | 0,2572 | 0,295 | 0,0759 | 1,043 | 0,2683 | 0,117 | -0,031 | 1,036 | 0,2665 | 1,2242 | 46,2757 |
| 690 | 0,0985 | -3253 | 0,492 | 0,5905 | 0,3 | 0,1771 | 1,044 | 0,6165 | -0,3 | -0,1771 | 1 | 0,5905 | 2,7126 | 102,5374 |
| 700 | 0,1094 | -5039 | 0,7621 | 0,8714 | 0,295 | 0,2571 | 1,043 | 0,9089 | 0,464 | -0,4043 | 0,934 | 0,8139 | 3,739 | 141,3355 |
| 710 | 0,1219 | -6396 | 0,9673 | 1,0891 | 0,28 | 0,305 | 1,039 | 1,1316 | 0,606 | -0,66 | 0,844 | 0,9192 | 4,223 | 159,6279 |
| 720 | 0,1286 | -7333 | 1,1091 | 1,2377 | 0,257 | 0,3181 | 1,032 | 1,2773 | 0,723 | -0,8948 | 0,737 | 0,9122 | 4,1904 | 158,3988 |

Таблица Б2 – Расчеты для всех цилиндров.

| Ф° | Цилиндры | | | | | | | | Мкр, Нм |
|-----|---------------------|--------------|---------------------|--------------|---------------------|--------------|---------------------|--------------|------------|
| | 1-й | | 2-й | | 3-й | | 4-й | | |
| | Ф° кливоши па | Мкр.ц, Нм | Ф° кливоши па | Мкр.ц, Нм | Ф° кливош ипа | Мкр.ц, Нм | Ф° кливош ипа | Мкр.ц, Нм | |
| 0 | 0 | 0 | 180 | 0 | 360 | 0 | 540 | 0 | 0 |
| 10 | 10 | -79,7549 | 190 | -29,3728 | 370 | 77,7306 | 550 | -31,4962 | -62,8933 |
| 20 | 20 | -143,824 | 200 | -60,3967 | 380 | 494,8597 | 560 | -60,237 | 230,4017 |
| 30 | 30 | -178,829 | 210 | -92,1986 | 390 | 386,6336 | 570 | -87,9715 | 27,6342 |
| 40 | 40 | -179,104 | 220 | -121,478 | 400 | 300,4265 | 580 | -115,958 | -116,113 |
| 50 | 50 | -146,464 | 230 | -144,83 | 410 | 267,0128 | 590 | -141,774 | -166,055 |
| 60 | 60 | -89,6103 | 240 | -159,925 | 420 | 258,5211 | 600 | -159,925 | -150,939 |
| 70 | 70 | -21,1326 | 250 | -164,217 | 430 | 261,4846 | 610 | -162,754 | -86,6189 |
| 80 | 80 | 46,2757 | 260 | -153,507 | 440 | 268,6856 | 620 | -145,175 | 16,2787 |
| 90 | 90 | 102,5374 | 270 | -124,601 | 450 | 273,6275 | 630 | -106,683 | 144,8806 |
| 100 | 100 | 141,3355 | 280 | -78,3985 | 460 | 271,5757 | 640 | -50,0752 | 284,4374 |
| 110 | 110 | 159,6279 | 290 | -23,7885 | 470 | 257,8304 | 650 | 17,8282 | 411,4981 |
| 120 | 120 | 158,3988 | 300 | 25,2384 | 480 | 231,7756 | 660 | 86,5538 | 501,9667 |
| 130 | 130 | 142,0432 | 310 | 54,5848 | 490 | 196,2111 | 670 | 143,3355 | 536,1746 |
| 140 | 140 | 116,6905 | 320 | 59,3615 | 500 | 155,5672 | 680 | 176,3456 | 507,9647 |
| 150 | 150 | 87,2788 | 330 | 43,6634 | 510 | 113,3601 | 690 | 177,3965 | 421,6988 |
| 160 | 160 | 57,4185 | 340 | 18,1108 | 520 | 72,6034 | 700 | 144,3562 | 292,4888 |
| 170 | 170 | 28,509 | 350 | -3,9614 | 530 | 34,7555 | 710 | 81,5397 | 140,8427 |
| 180 | 180 | 0 | 360 | 0 | 540 | 0 | 720 | 0 | 0 |

Приложение В

Таблица В1 – Результаты расчета силы, которая воздействует на шатунную шейку.

| Ф, град | K, Н | T, Н | Рк, Н | Rш.ш., Н | Крк, Н | Rк, Н |
|---------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|
| 0 | -9,685 | 0 | -15,3873 | 15,3873 | -24,3014 | 24,3014 |
| 10 | -9,2344 | -2,1099 | -14,9367 | 15,085 | -23,8508 | 23,944 |
| 20 | -7,9065 | -3,8049 | -13,6087 | 14,1306 | -22,5228 | 22,842 |
| 30 | -5,9835 | -4,7309 | -11,6857 | 12,6071 | -20,5998 | 21,1361 |
| 40 | -3,8783 | -4,7382 | -9,5806 | 10,6882 | -18,4947 | 19,092 |
| 50 | -1,9926 | -3,8747 | -7,6949 | 8,6153 | -16,609 | 17,0549 |
| 60 | -0,66 | -2,3706 | -6,3622 | 6,7895 | -15,2763 | 15,4592 |
| 70 | -0,0421 | -0,5591 | -5,7444 | 5,7715 | -14,6585 | 14,6692 |
| 80 | -0,1383 | 1,2242 | -5,8405 | 5,9674 | -14,7546 | 14,8053 |
| 90 | -0,8138 | 2,7126 | -6,5161 | 7,0581 | -15,4302 | 15,6668 |
| 100 | -1,8575 | 3,739 | -7,5598 | 8,4339 | -16,4739 | 16,8929 |
| 110 | -3,0321 | 4,223 | -8,7344 | 9,7017 | -17,6485 | 18,1467 |
| 120 | -4,1108 | 4,1904 | -9,8131 | 10,6704 | -18,7272 | 19,1903 |
| 130 | -4,9457 | 3,7578 | -10,648 | 11,2916 | -19,5621 | 19,9197 |
| 140 | -5,4984 | 3,087 | -11,2007 | 11,6183 | -20,1148 | 20,3503 |
| 150 | -5,8126 | 2,309 | -11,5149 | 11,7441 | -20,429 | 20,5591 |
| 160 | -5,9658 | 1,519 | -11,668 | 11,7665 | -20,5822 | 20,6381 |
| 170 | -6,0458 | 0,7542 | -11,7481 | 11,7723 | -20,6622 | 20,6759 |
| 180 | -6,1226 | 0 | -11,8249 | 11,8249 | -20,739 | 20,739 |
| 190 | -6,229 | -0,7771 | -11,9313 | 11,9565 | -20,8454 | 20,8598 |
| 200 | -6,2752 | -1,5978 | -11,9775 | 12,0836 | -20,8916 | 20,9526 |
| 210 | -6,1403 | -2,4391 | -11,8426 | 12,0911 | -20,7567 | 20,8995 |
| 220 | -5,724 | -3,2137 | -11,4262 | 11,8696 | -20,3404 | 20,5927 |
| 230 | -5,0427 | -3,8315 | -10,745 | 11,4077 | -19,6591 | 20,029 |
| 240 | -4,1505 | -4,2308 | -9,8527 | 10,7227 | -18,7668 | 19,2378 |
| 250 | -3,1193 | -4,3444 | -8,8216 | 9,8333 | -17,7357 | 18,26 |
| 260 | -2,0175 | -4,061 | -7,7197 | 8,7228 | -16,6339 | 17,1224 |

Продолжение таблицы В1

| | | | | | | |
|-----|---------|---------|----------|---------|----------|---------|
| 270 | -0,9889 | -3,2963 | -6,6912 | 7,459 | -15,6053 | 15,9496 |
| 280 | -0,2342 | -2,074 | -5,9365 | 6,2884 | -14,8506 | 14,9947 |
| 290 | 0,0474 | -0,6293 | -5,6548 | 5,6897 | -14,569 | 14,5825 |
| 300 | -0,1859 | 0,6677 | -5,8881 | 5,9259 | -14,8023 | 14,8173 |
| 310 | -0,7426 | 1,444 | -6,4449 | 6,6047 | -15,359 | 15,4267 |
| 320 | -1,2854 | 1,5704 | -6,9877 | 7,162 | -15,9018 | 15,9792 |
| 330 | -1,4609 | 1,1551 | -7,1632 | 7,2557 | -16,0773 | 16,1188 |
| 340 | -0,9956 | 0,4791 | -6,6979 | 6,715 | -15,612 | 15,6193 |
| 350 | 0,4587 | -0,1048 | -5,2436 | 5,2446 | -14,1577 | 14,1581 |
| 360 | 3,3964 | 0 | -2,3059 | 2,3059 | -11,22 | 11,22 |
| 370 | 9,0001 | 2,0564 | 3,2978 | 3,8864 | -5,6163 | 5,981 |
| 380 | 27,204 | 13,0915 | 21,5017 | 25,1736 | 12,5876 | 18,1614 |
| 390 | 12,9364 | 10,2284 | 7,2341 | 12,5281 | -1,68 | 10,3655 |
| 400 | 6,5055 | 7,9478 | 0,8032 | 7,9883 | -8,1109 | 11,3558 |
| 410 | 3,6326 | 7,0638 | -2,0697 | 7,3608 | -10,9838 | 13,0591 |
| 420 | 1,904 | 6,8392 | -3,7983 | 7,8231 | -12,7124 | 14,4354 |
| 430 | 0,5213 | 6,9176 | -5,1809 | 8,6426 | -14,0951 | 15,7011 |
| 440 | -0,8027 | 7,1081 | -6,505 | 9,6354 | -15,4191 | 16,9786 |
| 450 | -2,1716 | 7,2388 | -7,8739 | 10,6957 | -16,788 | 18,2822 |
| 460 | -3,5692 | 7,1845 | -9,2715 | 11,7293 | -18,1856 | 19,5533 |
| 470 | -4,8975 | 6,8209 | -10,5997 | 12,6047 | -19,5139 | 20,6716 |
| 480 | -6,0152 | 6,1316 | -11,7174 | 13,2248 | -20,6315 | 21,5234 |
| 490 | -6,8317 | 5,1908 | -12,534 | 13,5663 | -21,4481 | 22,0673 |
| 500 | -7,3303 | 4,1155 | -13,0325 | 13,6669 | -21,9467 | 22,3292 |
| 510 | -7,5496 | 2,9989 | -13,2519 | 13,587 | -22,166 | 22,368 |
| 520 | -7,5435 | 1,9207 | -13,2458 | 13,3843 | -22,1599 | 22,243 |
| 530 | -7,3705 | 0,9195 | -13,0728 | 13,105 | -21,9869 | 22,0061 |
| 540 | -7,069 | 0 | -12,7713 | 12,7713 | -21,6854 | 21,6854 |
| 550 | -6,6793 | -0,8332 | -12,3816 | 12,4096 | -21,2957 | 21,312 |
| 560 | -6,2586 | -1,5936 | -11,9609 | 12,0666 | -20,875 | 20,9357 |
| 570 | -5,8588 | -2,3273 | -11,561 | 11,793 | -20,4752 | 20,607 |

Продолжение таблицы В1

| | | | | | | |
|-----|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| 580 | -5,4639 | -3,0677 | -11,1662 | 11,5799 | -20,0803 | 20,3133 |
| 590 | -4,9363 | -3,7506 | -10,6386 | 11,2804 | -19,5527 | 19,9092 |
| 600 | -4,1505 | -4,2308 | -9,8527 | 10,7227 | -18,7668 | 19,2378 |
| 610 | -3,0915 | -4,3057 | -8,7938 | 9,7913 | -17,7079 | 18,2238 |
| 620 | -1,908 | -3,8406 | -7,6102 | 8,5244 | -16,5244 | 16,9648 |
| 630 | -0,8467 | -2,8223 | -6,549 | 7,1312 | -15,4631 | 15,7185 |
| 640 | -0,1496 | -1,3247 | -5,8519 | 5,9999 | -14,766 | 14,8253 |
| 650 | -0,0355 | 0,4716 | -5,7378 | 5,7572 | -14,6519 | 14,6595 |
| 660 | -0,6375 | 2,2898 | -6,3397 | 6,7406 | -15,2538 | 15,4247 |
| 670 | -1,95 | 3,7919 | -7,6523 | 8,5403 | -16,5664 | 16,9948 |
| 680 | -3,8186 | 4,6652 | -9,5209 | 10,6024 | -18,435 | 19,0161 |
| 690 | -5,9355 | 4,693 | -11,6378 | 12,5484 | -20,5519 | 21,0809 |
| 700 | -7,9357 | 3,8189 | -13,638 | 14,1626 | -22,5521 | 22,8731 |
| 710 | -9,4411 | 2,1571 | -15,1434 | 15,2962 | -24,0575 | 24,154 |
| 720 | -10,1805 | 0 | -15,8926 | 15,8926 | -24,8068 | 24,8068 |

Таблица В2 - Определение суммарных сил.

| Rw.ш i | Значения Rw.ш i, кН, для лучей | | | | | | | | | | | |
|----------|--------------------------------|---------|---------|---|---|---|---|---|---|----|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Rw.ш 0 | 15,3873 | 15,3873 | 15,3873 | - | - | - | - | - | - | - | 15,3873 | 15,3873 |
| Rw.ш 10 | 15,085 | 15,085 | 15,085 | - | - | - | - | - | - | - | 15,085 | 15,085 |
| Rw.ш 20 | 14,1306 | 14,1306 | 14,1306 | - | - | - | - | - | - | - | 14,1306 | 14,1306 |
| Rw.ш 30 | 12,6071 | 12,6071 | 12,6071 | - | - | - | - | - | - | - | | 12,6071 |
| Rw.ш 40 | 10,6882 | 10,6882 | 10,6882 | - | - | - | - | - | - | - | | 10,6882 |
| Rw.ш 50 | 8,6153 | 8,6153 | 8,6153 | - | - | - | - | - | - | - | | 8,6153 |
| Rw.ш 60 | 6,7895 | 6,7895 | 6,7895 | - | - | - | - | - | - | - | | 6,7895 |
| Rw.ш 70 | 5,7715 | 5,7715 | 5,7715 | - | - | - | - | - | - | - | 5,7715 | 5,7715 |
| Rw.ш 80 | 5,9674 | 5,9674 | 5,9674 | - | - | - | - | - | - | - | 5,9674 | 5,9674 |
| Rw.ш 90 | 7,0581 | 7,0581 | | - | - | - | - | - | - | - | 7,0581 | 7,0581 |
| Rw.ш 100 | 8,4339 | 8,4339 | | - | - | - | - | - | - | - | 8,4339 | 8,4339 |
| Rw.ш 110 | 9,7017 | 9,7017 | | - | - | - | - | - | - | - | 9,7017 | 9,7017 |
| Rw.ш 120 | 10,6704 | 10,6704 | | - | - | - | - | - | - | - | 10,6704 | 10,6704 |
| Rw.ш 130 | 11,2916 | 11,2916 | | - | - | - | - | - | - | - | 11,2916 | 11,2916 |
| Rw.ш 140 | 11,6183 | 11,6183 | | - | - | - | - | - | - | - | 11,6183 | 11,6183 |
| Rw.ш 150 | 11,7441 | 11,7441 | | - | - | - | - | - | - | - | 11,7441 | 11,7441 |

Продолжение таблицы В2

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------|---------|---------|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|---------|---------|
| Rw.ш 160 | 11,7665 | 11,7665 | 11,7665 | - | - | - | - | - | - | - | - | 11,7665 | 11,7665 |
| Rw.ш 170 | 11,7723 | 11,7723 | 11,7723 | - | - | - | - | - | - | - | - | 11,7723 | 11,7723 |
| Rw.ш 180 | 11,8249 | 11,8249 | 11,8249 | - | - | - | - | - | - | - | - | 11,8249 | 11,8249 |
| Rw.ш 190 | 11,9565 | 11,9565 | 11,9565 | - | - | - | - | - | - | - | - | 11,9565 | 11,9565 |
| Rw.ш 200 | 12,0836 | 12,0836 | 12,0836 | - | - | - | - | - | - | - | - | 12,0836 | 12,0836 |
| Rw.ш 210 | 12,0911 | 12,0911 | 12,0911 | - | - | - | - | - | - | - | - | | 12,0911 |
| Rw.ш 220 | 11,8696 | 11,8696 | 11,8696 | - | - | - | - | - | - | - | - | | 11,8696 |
| Rw.ш 230 | 11,4077 | 11,4077 | 11,4077 | - | - | - | - | - | - | - | - | | 11,4077 |
| Rw.ш 240 | 10,7227 | 10,7227 | 10,7227 | - | - | - | - | - | - | - | - | | 10,7227 |
| Rw.ш 250 | 9,8333 | 9,8333 | 9,8333 | - | - | - | - | - | - | - | - | | 9,8333 |
| Rw.ш 260 | 8,7228 | 8,7228 | 8,7228 | - | - | - | - | - | - | - | - | | 8,7228 |
| Rw.ш 270 | 7,459 | 7,459 | 7,459 | - | - | - | - | - | - | - | - | | 7,459 |
| Rw.ш 280 | 6,2884 | 6,2884 | 6,2884 | - | - | - | - | - | - | - | - | 6,2884 | 6,2884 |
| Rw.ш 290 | 5,6897 | 5,6897 | 5,6897 | - | - | - | - | - | - | - | - | 5,6897 | 5,6897 |
| Rw.ш 300 | 5,9259 | 5,9259 | | - | - | - | - | - | - | - | - | 5,9259 | 5,9259 |
| Rw.ш 310 | 6,6047 | 6,6047 | | - | - | - | - | - | - | - | - | 6,6047 | 6,6047 |
| Rw.ш 320 | 7,162 | 7,162 | | - | - | - | - | - | - | - | - | 7,162 | 7,162 |
| Rw.ш 330 | 7,2557 | 7,2557 | | - | - | - | - | - | - | - | - | 7,2557 | 7,2557 |
| Rw.ш 340 | 6,715 | 6,715 | 6,715 | - | - | - | - | - | - | - | - | 6,715 | 6,715 |
| Rw.ш 350 | 5,2446 | 5,2446 | 5,2446 | - | - | - | - | - | - | - | - | 5,2446 | 5,2446 |

Продолжение таблицы В2

| | | | | | | | | | | | | |
|----------|---------|---------|---------|---|---|---------|---------|---------|---|---------|---------|---------|
| Rw.ш 360 | 2,3059 | 2,3059 | 2,3059 | - | - | - | - | - | - | - | 2,3059 | 2,3059 |
| Rw.ш 370 | 3,8864 | 3,8864 | 3,8864 | - | - | - | - | - | - | - | 3,8864 | 3,8864 |
| Rw.ш 380 | 25,1736 | 25,1736 | 25,1736 | - | - | 25,1736 | 25,1736 | 25,1736 | - | - | 25,1736 | 25,1736 |
| Rw.ш 390 | 12,5281 | - | - | - | - | - | - | - | - | 12,5281 | 12,5281 | #ЗНАЧ! |
| Rw.ш 400 | 7,9883 | 7,9883 | - | - | - | - | - | - | - | - | 7,9883 | 7,9883 |
| Rw.ш 410 | 7,3608 | 7,3608 | - | - | - | - | - | - | - | - | 7,3608 | 7,3608 |
| Rw.ш 420 | 7,8231 | 7,8231 | - | - | - | - | - | - | - | - | 7,8231 | 7,8231 |
| Rw.ш 430 | 8,6426 | 8,6426 | - | - | - | - | - | - | - | - | 8,6426 | 8,6426 |
| Rw.ш 440 | 9,6354 | 9,6354 | - | - | - | - | - | - | - | - | 9,6354 | 9,6354 |
| Rw.ш 450 | 10,6957 | 10,6957 | - | - | - | - | - | - | - | 12,5281 | 10,6957 | 10,6957 |
| Rw.ш 460 | 11,7293 | 11,7293 | - | - | - | - | - | - | - | - | 11,7293 | 11,7293 |
| Rw.ш 470 | 12,6047 | 12,6047 | - | - | - | - | - | - | - | - | 12,6047 | 12,6047 |
| Rw.ш 480 | 13,2248 | 13,2248 | - | - | - | - | - | - | - | - | 13,2248 | 13,2248 |
| Rw.ш 490 | 13,5663 | 13,5663 | - | - | - | - | - | - | - | - | 13,5663 | 13,5663 |
| Rw.ш 500 | 13,6669 | 13,6669 | - | - | - | - | - | - | - | - | 13,6669 | 13,6669 |
| Rw.ш 510 | 13,587 | 13,587 | - | - | - | - | - | - | - | - | 13,587 | 13,587 |
| Rw.ш 520 | 13,3843 | 13,3843 | 13,3843 | - | - | - | - | - | - | - | 13,3843 | 13,3843 |
| Rw.ш 530 | 13,105 | 13,105 | 13,105 | - | - | - | - | - | - | - | 13,105 | 13,105 |
| Rw.ш 540 | 12,7713 | 12,7713 | 12,7713 | - | - | - | - | - | - | - | 12,7713 | 12,7713 |
| Rw.ш 550 | 12,4096 | 12,4096 | 12,4096 | - | - | - | - | - | - | - | 12,4096 | 12,4096 |

Продолжение таблицы В2

| | | | | | | | | | | | | |
|----------|---------|---------|---------|---|---|---|---|---|---|---|---------|---------|
| Rw.ш 560 | 12,0666 | 12,0666 | 12,0666 | - | - | - | - | - | - | - | 12,0666 | 12,0666 |
| Rw.ш 570 | 11,793 | 11,793 | 11,793 | - | - | - | - | - | - | - | | 11,793 |
| Rw.ш 580 | 11,5799 | 11,5799 | 11,5799 | - | - | - | - | - | - | - | | 11,5799 |
| Rw.ш 590 | 11,2804 | 11,2804 | 11,2804 | - | - | - | - | - | - | - | | 11,2804 |
| Rw.ш 600 | 10,7227 | 10,7227 | 10,7227 | - | - | - | - | - | - | - | | 10,7227 |
| Rw.ш 610 | 9,7913 | 9,7913 | 9,7913 | - | - | - | - | - | - | - | | 9,7913 |
| Rw.ш 620 | 8,5244 | 8,5244 | 8,5244 | - | - | - | - | - | - | - | | 8,5244 |
| Rw.ш 630 | 7,1312 | 7,1312 | 7,1312 | - | - | - | - | - | - | - | | 7,1312 |
| Rw.ш 640 | 5,9999 | 5,9999 | 5,9999 | - | - | - | - | - | - | - | 5,9999 | 5,9999 |
| Rw.ш 650 | 5,7572 | 5,7572 | 5,7572 | - | - | - | - | - | - | - | 5,7572 | 5,7572 |
| Rw.ш 660 | 6,7406 | 6,7406 | | - | - | - | - | - | - | - | 6,7406 | 6,7406 |
| Rw.ш 670 | 8,5403 | 8,5403 | | - | - | - | - | - | - | - | 8,5403 | 8,5403 |
| Rw.ш 680 | 10,6024 | 10,6024 | | - | - | - | - | - | - | - | 10,6024 | 10,6024 |
| Rw.ш 690 | 12,5484 | 12,5484 | | - | - | - | - | - | - | - | 12,5484 | 12,5484 |
| Rw.ш 700 | 14,1626 | 14,1626 | | - | - | - | - | - | - | - | 14,1626 | 14,1626 |
| Rw.ш 710 | 15,2962 | 15,2962 | | - | - | - | - | - | - | - | 15,2962 | 15,2962 |
| Rw.ш 720 | 15,8926 | 15,8926 | | - | - | - | - | - | - | - | 15,8926 | 15,8926 |

Таблица В3 – Результаты расчета сил, которые действуют на коренную шейку.

| φ° | 1-я коренная шейка | 1-й кривошип | | | 2-я коренная шейка | | | 2-й кривошип | | | 3-я коренная шейка | | | 3-й кривошип | | | |
|-----|--------------------|--------------|---------|---------|--------------------|---------|---------|--------------|-----------|---------|--------------------|---------|---------|--------------|----------|---------|----------|
| | Rк.ш1, Н | φ°, град | Rк1, Н | Tз, Н | Kрк1, Н | Tк2, Н | Kк2, Н | Rк.ш2, Н | φ2°, град | Tз, Н | Kрк2, Н | Tк3, Н | Kк3, Н | Rк.ш3, Н | φ°, град | Tз, Н | Kрк3, Н |
| 0 | 12,1507 | 0 | 24,3014 | 0 | -24,3014 | 0 | 1,7812 | 1,7812 | 0 | 0 | -20,739 | 0 | -23,996 | 23,996 | 0 | 0 | -27,253 |
| 10 | 11,972 | 10 | 23,944 | -2,1099 | -23,8508 | 0,6664 | 1,5027 | 1,6439 | 10 | -0,7771 | -20,8454 | -0,8051 | -23,854 | 23,8679 | 10 | -0,8332 | -26,8634 |
| 20 | 11,421 | 20 | 22,842 | -3,8049 | -22,5228 | 1,1035 | 0,8156 | 1,3722 | 20 | -1,5978 | -20,8916 | -1,5957 | -23,667 | 23,7209 | 20 | -1,5936 | -26,4427 |
| 30 | 10,5681 | 30 | 21,1361 | -4,7309 | -20,5998 | 1,1459 | -0,0784 | 1,1486 | 30 | -2,4391 | -20,7567 | -2,3832 | -23,4 | 23,5208 | 30 | -2,3273 | -26,0428 |
| 40 | 9,546 | 40 | 19,092 | -4,7382 | -18,4947 | 0,7623 | -0,9228 | 1,1969 | 40 | -3,2137 | -20,3404 | -3,1407 | -22,994 | 23,2077 | 40 | -3,0677 | -25,648 |
| 50 | 8,5275 | 50 | 17,0549 | -3,8747 | -16,609 | 0,0216 | -1,5251 | 1,5252 | 50 | -3,8315 | -19,6591 | -3,7911 | -22,39 | 22,7084 | 50 | -3,7506 | -25,1204 |
| 60 | 7,7296 | 60 | 15,4592 | -2,3706 | -15,2763 | -0,9301 | -1,7452 | 1,9776 | 60 | -4,2308 | -18,7668 | -4,2308 | -21,551 | 21,962 | 60 | -4,2308 | -24,3345 |
| 70 | 7,3346 | 70 | 14,6692 | -0,5591 | -14,6585 | -1,8926 | -1,5386 | 2,4391 | 70 | -4,3444 | -17,7357 | -4,325 | -20,506 | 20,9568 | 70 | -4,3057 | -23,2756 |
| 80 | 7,4027 | 80 | 14,8053 | 1,2242 | -14,7546 | -2,6426 | -0,9396 | 2,8047 | 80 | -4,061 | -16,6339 | -3,9508 | -19,363 | 19,7619 | 80 | -3,8406 | -22,092 |
| 90 | 7,8334 | 90 | 15,6668 | 2,7126 | -15,4302 | -3,0045 | -0,0876 | 3,0058 | 90 | -3,2963 | -15,6053 | -3,0593 | -18,318 | 18,5717 | 90 | -2,8223 | -21,0307 |
| 100 | 8,4464 | 100 | 16,8929 | 3,739 | -16,4739 | -2,9065 | 0,8116 | 3,0177 | 100 | -2,074 | -14,8506 | -1,6994 | -17,592 | 17,674 | 100 | -1,3247 | -20,3337 |
| 110 | 9,0734 | 110 | 18,1467 | 4,223 | -17,6485 | -2,4261 | 1,5398 | 2,8735 | 110 | -0,6293 | -14,569 | -0,0788 | -17,394 | 17,3945 | 110 | 0,4716 | -20,2196 |
| 120 | 9,5952 | 120 | 19,1903 | 4,1905 | -18,7272 | -1,7614 | 1,9625 | 2,637 | 120 | 0,6677 | -14,8023 | 1,47873 | -17,812 | 17,8732 | 120 | 2,2898 | -20,8215 |
| 130 | 9,9599 | 130 | 19,9197 | 3,7578 | -19,5621 | -1,1569 | 2,1015 | 2,3989 | 130 | 1,444 | -15,359 | 2,61799 | -18,747 | 18,9284 | 130 | 3,7919 | -22,1341 |
| 140 | 10,1752 | 140 | 20,3503 | 3,0871 | -20,1148 | -0,7583 | 2,1065 | 2,2388 | 140 | 1,5704 | -15,9018 | 3,11782 | -19,952 | 20,1944 | 140 | 4,6652 | -24,0027 |
| 150 | 10,2795 | 150 | 20,5591 | 2,309 | -20,429 | -0,5769 | 2,1759 | 2,251 | 150 | 1,1551 | -16,0773 | 2,92407 | -21,098 | 21,3001 | 150 | 4,693 | -26,1196 |

Продолжение таблицы В3

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---------|-----|---------|---------|----------|---------|---------|---------|-----|---------|----------|---------|---------|---------|-----|---------|----------|
| 160 | 10,3191 | 160 | 20,6381 | 1,519 | -20,5822 | -0,5199 | 2,4851 | 2,5389 | 160 | 0,4791 | -15,612 | 2,14903 | -21,866 | 21,9712 | 160 | 3,8189 | -28,1197 |
| 170 | 10,338 | 170 | 20,6759 | 0,7542 | -20,6622 | -0,4295 | 3,2522 | 3,2805 | 170 | -0,1048 | -14,1577 | 1,02617 | -21,891 | 21,9155 | 170 | 2,1571 | -29,6251 |
| 180 | 10,3695 | 180 | 20,739 | 0 | -20,739 | 0 | 4,7595 | 4,7595 | 180 | 0 | -11,22 | 0 | -20,545 | 20,5445 | 180 | 0 | -29,8691 |
| 190 | 10,4299 | 190 | 20,8598 | -0,7771 | -20,8454 | 1,4167 | 7,6145 | 7,7452 | 190 | 2,0564 | -5,6163 | -0,0268 | -17,517 | 17,5174 | 190 | -2,1099 | -29,4185 |
| 200 | 10,4763 | 200 | 20,9526 | -1,5978 | -20,8916 | 7,3447 | 16,7396 | 18,28 | 200 | 13,092 | 12,5876 | 4,64333 | -7,7515 | 9,0358 | 200 | -3,8049 | -28,0905 |
| 210 | 10,4497 | 210 | 20,8995 | -2,4391 | -20,7567 | 6,3338 | 9,5384 | 11,4497 | 210 | 10,228 | -1,68 | 2,74873 | -13,924 | 14,1925 | 210 | -4,7309 | -26,1675 |
| 220 | 10,2963 | 220 | 20,5927 | -3,2137 | -20,3404 | 5,5807 | 6,1147 | 8,2786 | 220 | 7,9478 | -8,1109 | 1,6048 | -16,087 | 16,1665 | 220 | -4,7382 | -24,0624 |
| 230 | 10,0145 | 230 | 20,029 | -3,8315 | -19,6591 | 5,4477 | 4,3377 | 6,9636 | 230 | 7,0638 | -10,9838 | 1,59456 | -16,58 | 16,6567 | 230 | -3,8747 | -22,1766 |
| 240 | 9,6189 | 240 | 19,2378 | -4,2308 | -18,7668 | 5,535 | 3,0272 | 6,3087 | 240 | 6,8392 | -12,7124 | 2,23427 | -16,778 | 16,9263 | 240 | -2,3706 | -20,844 |
| 250 | 9,13 | 250 | 18,26 | -4,3444 | -17,7357 | 5,631 | 1,8203 | 5,9179 | 250 | 6,9176 | -14,0951 | 3,17926 | -17,161 | 17,4526 | 250 | -0,5591 | -20,2262 |
| 260 | 8,5612 | 260 | 17,1224 | -4,061 | -16,6339 | 5,5846 | 0,6074 | 5,6175 | 260 | 7,1081 | -15,4191 | 4,16615 | -17,871 | 18,3499 | 260 | 1,2242 | -20,3223 |
| 270 | 7,9748 | 270 | 15,9496 | -3,2963 | -15,6053 | 5,2676 | -0,5914 | 5,3007 | 270 | 7,2388 | -16,788 | 4,97573 | -18,893 | 19,5372 | 270 | 2,7126 | -20,9978 |
| 280 | 7,4974 | 280 | 14,9947 | -2,074 | -14,8506 | 4,6293 | -1,6675 | 4,9204 | 280 | 7,1845 | -18,1856 | 5,46179 | -20,114 | 20,8419 | 280 | 3,739 | -22,0416 |
| 290 | 7,2913 | 290 | 14,5825 | -0,6293 | -14,569 | 3,7251 | -2,4725 | 4,471 | 290 | 6,8209 | -19,5139 | 5,52194 | -21,365 | 22,0671 | 290 | 4,223 | -23,2162 |
| 300 | 7,4087 | 300 | 14,8173 | 0,6677 | -14,8023 | 2,732 | -2,9146 | 3,9948 | 300 | 6,1316 | -20,6315 | 5,16104 | -22,463 | 23,0485 | 300 | 4,1904 | -24,2949 |
| 310 | 7,7134 | 310 | 15,4267 | 1,444 | -15,359 | 1,8734 | -3,0446 | 3,5747 | 310 | 5,1908 | -21,4481 | 4,47426 | -23,289 | 23,7148 | 310 | 3,7578 | -25,1297 |
| 320 | 7,9896 | 320 | 15,9792 | 1,5704 | -15,9018 | 1,2726 | -3,0224 | 3,2794 | 320 | 4,1155 | -21,9467 | 3,60129 | -23,815 | 24,0853 | 320 | 3,087 | -25,6825 |
| 330 | 8,0594 | 330 | 16,1188 | 1,1551 | -16,0773 | 0,9219 | -3,0443 | 3,1809 | 330 | 2,9989 | -22,166 | 2,65395 | -24,081 | 24,2271 | 330 | 2,309 | -25,9967 |
| 340 | 7,8097 | 340 | 15,6193 | 0,4791 | -15,612 | 0,7208 | -3,2739 | 3,3523 | 340 | 1,9207 | -22,1599 | 1,71987 | -24,155 | 24,216 | 340 | 1,519 | -26,1498 |
| 350 | 7,079 | 350 | 14,1581 | -0,1048 | -14,1577 | 0,5121 | -3,9146 | 3,9479 | 350 | 0,9195 | -21,9869 | 0,83683 | -24,108 | 24,1229 | 350 | 0,7542 | -26,2299 |

Продолжение таблицы В3

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---------|-----|---------|---------|----------|---------|---------|---------|-----|---------|----------|---------|---------|---------|-----|---------|----------|
| 360 | 5,61 | 360 | 11,22 | 0 | -11,22 | 0 | -5,2327 | 5,2327 | 360 | 0 | -21,6854 | 0 | -23,996 | 23,996 | 360 | 0 | -26,3067 |
| 370 | 2,9905 | 370 | 5,981 | 2,0564 | -5,6163 | -1,4448 | -7,8397 | 7,9717 | 370 | -0,8332 | -21,2957 | -0,8051 | -23,854 | 23,8679 | 370 | -0,7771 | -26,413 |
| 380 | 9,0807 | 380 | 18,1614 | 13,0915 | 12,5876 | -7,3425 | -16,731 | 18,2715 | 380 | -1,5936 | -20,875 | -1,5957 | -23,667 | 23,7209 | 380 | -1,5978 | -26,4593 |
| 390 | 5,1827 | 390 | 10,3655 | 10,2284 | -1,68 | -6,2778 | -9,3976 | 11,3016 | 390 | -2,3273 | -20,4752 | -2,3832 | -23,4 | 23,5208 | 390 | -2,4391 | -26,3243 |
| 400 | 5,6779 | 400 | 11,3558 | 7,9478 | -8,1109 | -5,5077 | -5,9847 | 8,1334 | 400 | -3,0677 | -20,0803 | -3,1407 | -22,994 | 23,2077 | 400 | -3,2137 | -25,908 |
| 410 | 6,5296 | 410 | 13,0591 | 7,0638 | -10,9838 | -5,4072 | -4,2845 | 6,8989 | 410 | -3,7506 | -19,5527 | -3,7911 | -22,39 | 22,7084 | 410 | -3,8315 | -25,2268 |
| 420 | 7,2177 | 420 | 14,4354 | 6,8392 | -12,7124 | -5,535 | -3,0272 | 6,3087 | 420 | -4,2308 | -18,7668 | -4,2308 | -21,551 | 21,962 | 420 | -4,2308 | -24,3345 |
| 430 | 7,8505 | 430 | 15,7011 | 6,9176 | -14,0951 | -5,6116 | -1,8064 | 5,8952 | 430 | -4,3057 | -17,7079 | -4,325 | -20,506 | 20,9568 | 430 | -4,3444 | -23,3033 |
| 440 | 8,4893 | 440 | 16,9786 | 7,1081 | -15,4191 | -5,4744 | -0,5526 | 5,5022 | 440 | -3,8406 | -16,5244 | -3,9508 | -19,363 | 19,7619 | 440 | -4,061 | -22,2015 |
| 450 | 9,1411 | 450 | 18,2822 | 7,2388 | -16,788 | -5,0306 | 0,6625 | 5,074 | 450 | -2,8223 | -15,4631 | -3,0593 | -18,318 | 18,5717 | 450 | -3,2963 | -21,1729 |
| 460 | 9,7767 | 460 | 19,5533 | 7,1845 | -18,1856 | -4,2546 | 1,7098 | 4,5853 | 460 | -1,3247 | -14,766 | -1,6994 | -17,592 | 17,674 | 460 | -2,074 | -20,4183 |
| 470 | 10,3358 | 470 | 20,6716 | 6,8209 | -19,5139 | -3,1746 | 2,431 | 3,9985 | 470 | 0,4716 | -14,6519 | -0,0788 | -17,394 | 17,3945 | 470 | -0,6293 | -20,1366 |
| 480 | 10,7617 | 480 | 21,5234 | 6,1316 | -20,6315 | -1,9209 | 2,6889 | 3,3045 | 480 | 2,2898 | -15,2538 | 1,47873 | -17,812 | 17,8732 | 480 | 0,6677 | -20,3699 |
| 490 | 11,0336 | 490 | 22,0673 | 5,1908 | -21,4481 | -0,6994 | 2,4409 | 2,5391 | 490 | 3,7919 | -16,5664 | 2,618 | -18,747 | 18,9284 | 490 | 1,444 | -20,9267 |
| 500 | 11,1646 | 500 | 22,3292 | 4,1155 | -21,9467 | 0,2749 | 1,7558 | 1,7772 | 500 | 4,6652 | -18,435 | 3,11782 | -19,952 | 20,1944 | 500 | 1,5704 | -21,4695 |
| 510 | 11,184 | 510 | 22,368 | 2,999 | -22,166 | 0,847 | 0,8071 | 1,17 | 510 | 4,693 | -20,5519 | 2,92407 | -21,098 | 21,3001 | 510 | 1,1551 | -21,645 |
| 520 | 11,1215 | 520 | 22,243 | 1,9207 | -22,1599 | 0,9491 | -0,1961 | 0,9692 | 520 | 3,8189 | -22,5521 | 2,14903 | -21,866 | 21,9712 | 520 | 0,4791 | -21,1797 |
| 530 | 11,003 | 530 | 22,0061 | 0,9195 | -21,9869 | 0,6188 | -1,0353 | 1,2062 | 530 | 2,1571 | -24,0575 | 1,02617 | -21,891 | 21,9155 | 530 | -0,1048 | -19,7254 |
| 540 | 10,8426 | 540 | 21,6854 | 0 | -21,6854 | 0 | -1,5607 | 1,5607 | 540 | 0 | -24,8068 | 0 | -20,797 | 20,7972 | 540 | 0 | -16,7877 |
| 550 | 10,6559 | 550 | 21,312 | -0,8332 | -21,2957 | -0,6383 | -1,2776 | 1,4282 | 550 | -2,1099 | -23,8508 | -0,0268 | -17,517 | 17,5174 | 550 | 2,0564 | -11,184 |

Продолжение таблицы В3

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---------|-----|---------|---------|----------|---------|---------|--------|-----|---------|----------|---------|---------|---------|-----|--------|----------|
| 560 | 10,4678 | 560 | 20,9357 | -1,5936 | -20,875 | -1,1057 | -0,8239 | 1,3789 | 560 | -3,8049 | -22,5228 | 4,64333 | -7,7515 | 9,0358 | 560 | 13,092 | 7,0199 |
| 570 | 10,3035 | 570 | 20,607 | -2,3273 | -20,4752 | -1,2018 | -0,0623 | 1,2034 | 570 | -4,7309 | -20,5998 | 2,74873 | -13,924 | 14,1925 | 570 | 10,228 | -7,2476 |
| 580 | 10,1566 | 580 | 20,3133 | -3,0677 | -20,0803 | -0,8353 | 0,7928 | 1,1516 | 580 | -4,7382 | -18,4947 | 1,6048 | -16,087 | 16,1665 | 580 | 7,9478 | -13,6786 |
| 590 | 9,9545 | 590 | 19,9092 | -3,7506 | -19,5527 | -0,062 | 1,4719 | 1,4732 | 590 | -3,8747 | -16,609 | 1,59456 | -16,58 | 16,6567 | 590 | 7,0638 | -16,5514 |
| 600 | 9,6189 | 600 | 19,2378 | -4,2308 | -18,7668 | 0,9301 | 1,7452 | 1,9776 | 600 | -2,3706 | -15,2763 | 2,23427 | -16,778 | 16,9263 | 600 | 6,8392 | -18,2801 |
| 610 | 9,1119 | 610 | 18,2238 | -4,3057 | -17,7079 | -4,3057 | 1,5247 | 2,4154 | 610 | -0,5591 | -14,6585 | 3,17926 | -17,161 | 17,4526 | 610 | 6,9176 | -19,6627 |
| 620 | 8,4824 | 620 | 16,9648 | -3,8406 | -16,5244 | -3,8406 | 0,8849 | 1,7812 | 620 | 1,2242 | -14,7546 | 4,16615 | -17,871 | 18,3499 | 620 | 7,1081 | -20,9868 |
| 630 | 7,8592 | 630 | 15,7185 | -2,8223 | -15,4631 | -2,8223 | 0,0165 | 1,6439 | 630 | 2,7126 | -15,4302 | 4,97573 | -18,893 | 19,5372 | 630 | 7,2388 | -22,3557 |
| 640 | 7,4126 | 640 | 14,8253 | -1,3247 | -14,766 | -1,3247 | -0,8539 | 1,3722 | 640 | 3,739 | -16,4739 | 5,46179 | -20,114 | 20,8419 | 640 | 7,1845 | -23,7532 |
| 650 | 7,3297 | 650 | 14,6595 | 0,4717 | -14,6519 | 0,4717 | -1,4983 | 1,1486 | 650 | 4,223 | -17,6485 | 5,52194 | -21,365 | 22,0671 | 650 | 6,8209 | -25,0815 |
| 660 | 7,7123 | 660 | 15,4247 | 2,2898 | -15,2538 | 2,2898 | -1,7367 | 1,1969 | 660 | 4,1904 | -18,7272 | 5,16104 | -22,463 | 23,0485 | 660 | 6,1316 | -26,1992 |
| 670 | 8,4974 | 670 | 16,9948 | 3,7919 | -16,5664 | 3,7919 | -1,4978 | 1,5252 | 670 | 3,7578 | -19,5621 | 4,47426 | -23,289 | 23,7148 | 670 | 5,1908 | -27,0158 |
| 680 | 9,508 | 680 | 19,0161 | 4,6652 | -18,435 | 4,6652 | -0,8399 | 1,9776 | 680 | 3,087 | -20,1148 | 3,60129 | -23,815 | 24,0853 | 680 | 4,1155 | -27,5143 |
| 690 | 10,5404 | 690 | 21,0809 | 4,693 | -20,5519 | 4,693 | 0,0614 | 2,4391 | 690 | 2,309 | -20,429 | 2,65395 | -24,081 | 24,2271 | 690 | 2,9989 | -27,7337 |
| 700 | 11,4365 | 700 | 22,8731 | 3,819 | -22,5521 | 3,819 | 0,985 | 2,8047 | 700 | 1,519 | -20,5822 | 1,71987 | -24,155 | 24,216 | 700 | 1,9207 | -27,7275 |
| 710 | 12,0769 | 710 | 24,154 | 2,1571 | -24,0575 | 2,1571 | 1,6976 | 3,0058 | 710 | 0,7542 | -20,6622 | 0,83683 | -24,108 | 24,1229 | 710 | 0,9195 | -27,5545 |
| 720 | 12,4033 | 720 | 24,8068 | 0 | -24,8068 | 0 | 2,0339 | 3,0177 | 720 | 0 | -20,739 | 0 | -23,996 | 23,996 | 720 | 0 | -27,253 |