

2 МОРСКАЯ МЕХАНИКА НА УРОВНЕ УПРАВЛЕНИЯ

2.1 Оптимизация термодинамических процессов ДВС с использованием ЭВМ (оптимизация параметров работы ДВС)

В данном разделе выполнен оптимизационный расчет цикла ГД 7ДКРН 60/240 с использованием программного обеспечения, разработанного на кафедре ЭМСС [11, 12]. Цель расчета - определение оптимальных параметров работы ДВС, при которых он обеспечивает заданную эффективную мощность $N_e = 15785$ кВт. Целевой функцией является расход топлива. Минимальный расход топлива ограничивается требованием обеспечения нормальных параметров работы ДВС – давлением сгорания, температурой сжатия и др.

Подбор исходных данных (37 параметров) осуществлен на основании технических данных завода изготовителя на данный дизель и рекомендаций [13]. Исходные данные представлены в таблице 2.1.

С помощью программы «Расчет дизеля» [11, 12] был выполнен многовариантный расчет ДВС с перебором по коэффициенту избытка воздуха α (на интервале 1,7-2,3 с шагом 0,1) и степени повышения давления λ (на интервале 1,1-1,7 с шагом 0,05). Было получено 49 вариантов расчета ДВС. В ходе анализа результатов расчета методом экспертных оценок за оптимальный был принят вариант 39, в котором минимальный расход топлива b_e составил 0,183 кг/(кВт·ч) при обеспечении нормальных параметров цикла $p_z = 15,15$ МПа; давлении надвучного воздуха $p_k = 0,269$ МПа и др. В таблице 2.2 приведены варианты 34 – 44 результатов расчета, которые содержат оптимальное решение при $\alpha=2,1$ и $\lambda=1,45$. Развернутая таблица результатов расчета для выбранного варианта представлена в таблице 2.3. На рисунке 2.1 представлена индикаторная диаграмма, построенная ЭВМ для выбранного варианта работы ДВС.

2.2 Анализ динамики и прочности ДВС с использованием ЭВМ

2.2.1 Динамический расчет ДВС

Цель расчета – определение сил, действующих в кривошипно-шатунном механизме.

Исходными данными для динамического расчета являются: назначенный порядок работы цилиндров (1 - 7 - 2 - 5 - 4 – 3 - 6); ориентировочные массы вращающихся ($m_{\text{ВРАЩ}} = 2830$ кг); и поступательно-движущихся масс КШМ ($m_{\text{ПОСТ}} = 1130$ кг); результаты расчета рабочего процесса ДВС и др. (таблица 2.3). С помощью программного обеспечения [11] в ходе расчета были определены силы, действующие в кривошипно-шатунном механизме: движущая, нормальная, радиальная, касательная (в т.ч. касательные силы на выходном конце коленчатого вала). Здесь же были построены диаграммы: развернутая индикаторная диаграмма, диаграмма сила на кривошипах и диаграмма касатель-

ных сил на одном кривошипе и суммарных касательных сил. Результаты расчета представлены в таблицах 2.4 - 2.6 и продемонстрированы на рисунках 2.2 – 2.4.

В ходе расчета были также получены силы, действующие на коренную шейку коленчатого вала: радиальные ($F_{\text{рад}}^{\text{max}} = 3967 \text{ кН}$; $F_{\text{рад}}^{\text{min}} = -299 \text{ кН}$); касательные ($F_{\text{кас}}^{\text{max}} = 2586 \text{ кН}$; $F_{\text{кас}}^{\text{min}} = -1216 \text{ кН}$); срезающие ($F_{\text{срез}}^{\text{max}} = 4215 \text{ кН}$; $F_{\text{срез}}^{\text{min}} = 81 \text{ кН}$). Эти силы необходимы для выполнения прочностного расчета коленчатого вала.

2.2.2 Расчет прочности коленчатого вала

Цель расчета прочности коленчатого вала – рассчитать коэффициенты запаса прочности в галтелях шеек для заданного режима работы ГД. Расчет выполнен в соответствии с [5, 14, 15]. Результаты расчета показали, что искомые коэффициенты находятся в требуемом диапазоне значений: $Q_H = 1,288 > 1,15$; $Q_G = 1,307 > 1,15$. Требования к расчету представлены на листе 35. Исходные данные представлены в таблице 2.7, результаты в таблице 2.8. На страницах 37-40 пояснительной записки представлена последовательность расчета коленчатого вала.

2.3 Рабочие жидкости ГД. Эксплуатация систем ГД

....

....

....

....

Таблица 2.1 - Исходные данные для расчета рабочего процесса судового ДВС
СевНТУ - Факультет МорТС - Кафедра ЭМСС

ЭД-
63з

Подготовил, группа Очеретяный В.А.

№	Параметр	Обозн.	Разм.	Значение	
1	Тип двигателя	7S60MC-C		1	2
2	Мощность двигателя	N	кВт	15785	-
3	Частота вращения коленчатого вала	n	об/мин	105	-
4	Ход поршня	s	м	2,400	-
5	Диаметр цилиндра	D	м	0,600	-
6	Тактность	n	-	2	-
7	Тип наддува	-	-	1	-
8	Число цилиндров	z	штук	7	-
9	Параметры по температуре			-	-
а	Температура окружающей среды	T_o	К	300	-
б	Допускаемая температура сгорания	$T_{доп}$	К	2000	-
в	Подогрев заряда от стенок цилиндра	δ_{cm}	К	10	-
г	Первое приближение температуры сгорания	$T_z(1)$	К	1800	-
д	Температура остаточных газов	T_r	К	550	-
е	Перепад температуры в охладителе наддувочного воздуха	δx_{max}	К	100	-
10	Коэффициент избытка воздуха			-	-
а	минимальное значение	α_{min}	-	1,7	-
б	максимальное значение	α_{max}	-	2,3	-
11	Параметры по давлению			-	-
а	Давление окружающей среды	P_o	МПа	0,1033	-
б	Потери напора в охладителе наддувочного воздуха	δp_x	МПа	0,0015	-
в	Максимально допустимое давление цикла	P_{zmax}	МПа	16	-
г	Давление за турбиной	P_{os}	МПа	0,105	-
д	Давления наддува (начальное значение)	$P_k(1)$	МПа	0,3	-
12	Параметры топлива			-	-
	Низшая теплота сгорания	Q_n	кДж/кг	40206,2	-
	Состав топлива (в 1 кг)			-	-
а	Углерод	C_p	86	85,4	-
б	Водород	H_p	%	10,6	-
в	Кислород	O_p	%	0,5	-
г	Сера	S_p	%	3,5	-
д	Вода	W_p	%	0	-
13	Степень сжатия	ε	-	15	-
14	Доля потерянного хода поршня	ψ	-	0,025	-
15	Степень повышения давления (начальное значение)	λ	-	1,1	-
16	Тип продувки	sk	-	1	-
17	Механический КПД двигателя	η	%	98	-
18	Механический КПД редуктора	η_{dv}	%	100	-
19	КПД турбины	η_t	%	84	-
20	КПД компрессора	η_k	%	82	-
21	Коэффициент использования тепла в точке "Z"	ξ_z	-	0,88	-
22	Полный коэффициент использования тепла	ξ	-	0,94	-
23	Коэффициент округления индикаторной диаграммы	ϕ_z	-	0,98	-
24	Коэффициент продувки	φ	-	1,55	-
25	Коэффициент остаточных газов	γ	-	0,025	-
26	Показатель политропы сжатия воздуха в компрессоре	kb	кДж/(кг*К)	1,4	-
27	Показатель политропы расширения газов в турбине	kg	кДж/(кг*К)	1,35	-
28	Первое прил. показателя политропы сжатия возд. в цил.	$n1(1)$	-	1,3	-
29	Первое прил. показателя политропы расш. газов в цил.	$n2(1)$	-	1,2	-

Таблица 2.2 - Результаты расчета рабочего процесса судового ДВС

СевНТУ - Факультет МТС - Кафедра ЭМСС

Варианты 34...44

№	Обозн.	Разм.	Результаты										
	Вариант		34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
1	α	-	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,2
2	λ	-	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,1	1,15	1,2	1,25
3	Ne	КВт	15830	15830	15833	15836	15839	15841	15844	15834	15863	15861	15838
4	Ni	КВт	16153	16153	16156	16159	16162	16165	16167	16157	16187	16185	16162
5	ηi	%	48,813	48,803	49,118	49,404	49,661	49,893	50,101	47,973	48,666	48,62	49,366
6	ηe	%	47,837	47,827	48,136	48,416	48,668	48,895	49,099	47,013	47,693	47,647	48,38
7	bi	кг/ кВтч	0,1834	0,1835	0,1823	0,1812	0,1803	0,1795	0,1787	0,1866	0,184	0,1842	0,1814
8	be		0,1872	0,1872	0,186	0,1849	0,184	0,1831	0,1824	0,1905	0,1877	0,1879	0,1851
9	Pk	Мпа	0,2754	0,2754	0,2737	0,2722	0,2708	0,2696	0,2686	0,2935	0,2899	0,2901	0,2853
10	Ps		0,2739	0,2739	0,2722	0,2707	0,2693	0,2681	0,2671	0,292	0,2884	0,2886	0,2838
11	Pa		0,2602	0,2602	0,2586	0,2572	0,2559	0,2547	0,2537	0,2774	0,274	0,2742	0,2696
12	Pc		10,674	10,676	10,61	10,551	10,498	10,451	10,409	11,382	11,241	11,25	11,064
13	$Pzmax$		12,809	13,346	13,793	14,244	14,697	15,154	15,613	12,521	12,927	13,5	13,83
14	Pb		0,8647	0,8549	0,8454	0,8368	0,8292	0,8223	0,8161	0,8959	0,8832	0,8726	0,8593
15	Pt		0,2526	0,2541	0,2529	0,2519	0,251	0,2502	0,2495	0,2756	0,2719	0,2755	0,2686
16	Pi		1,9723	1,9723	1,9727	1,9731	1,9734	1,9737	1,974	1,9729	1,9765	1,9762	1,9734
17	Pe		1,9328	1,9328	1,9332	1,9336	1,934	1,9343	1,9345	1,9334	1,9369	1,9367	1,9339
18	Tk		396,99	397,01	396,31	395,68	395,12	394,61	394,16	404,3	402,86	402,96	401,05
19	δTx	86,992	87,015	86,312	85,682	85,118	84,613	84,162	94,299	92,861	92,957	91,047	
20	Ts	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	310	
21	Ta	325,61	325,61	325,61	325,61	325,61	325,61	325,61	325,61	325,61	325,61	325,61	
22	Tc	890,6	890,6	890,6	890,6	890,6	890,6	890,6	890,6	890,65	890,65	890,65	
23	Tz	1847,9	1848,9	1857,8	1866,6	1875,5	1884,3	1893,1	1785,2	1800	1800	1817,4	
24	Tb	1052,8	1040,8	1035,6	1030,9	1026,6	1022,6	1019	1024,4	1022,5	1009,4	1010,7	
25	Tg	765,25	759,85	757,38	755,12	753,06	751,17	749,45	754,62	753,44	748,6	747,68	
26	Tcm	614,33	610,67	608,99	607,46	606,06	604,78	603,62	606,84	606,04	602,77	602,14	
27	Tzm	488,97	485,28	484,51	483,79	483,12	482,5	481,92	471,9	472,96	469,56	471,41	
28	Nt	кВт	4270,9	4271,3	4213,7	4162,4	4116,9	4076,4	4040,5	4887,3	4760,7	4795,5	4602,4
29	Nk		4281,8	4283,6	4226,2	4175,1	4129,7	4089,3	4053,5	4909,5	4781,5	4790	4623,2
30	ηm	%	47,837	47,827	48,136	48,416	48,668	48,895	49,099	47,013	47,693	47,647	48,38
31	$n1$	-	1,3716	1,3716	1,3716	1,3716	1,3716	1,3716	1,3716	1,3716	1,3716	1,3716	1,3716
32	$n2$	-	1,2629	1,2635	1,2639	1,2641	1,2644	1,2646	1,2648	1,2659	1,2662	1,2669	1,2669
33	δt	-	0,2644	0,2644	0,2608	0,2576	0,2547	0,2522	0,2499	0,3025	0,2941	0,2963	0,2848
34	δk	-	0,2651	0,2652	0,2616	0,2584	0,2555	0,253	0,2507	0,3039	0,2954	0,296	0,2861
35	δ	-	8,4402	8,7873	9,0951	9,4	9,7022	10,002	10,298	8,0191	8,3145	8,676	8,9508
36	ρ	-	1,7772	1,707	1,6492	1,5957	1,546	1,4998	1,4566	1,8705	1,8041	1,7289	1,6758
37	Lt	кДж/ кг	137,94	137,92	136,91	136,01	135,2	134,47	133,82	148,18	146,17	147,11	143,57
38	Lk		97,428	97,451	96,745	96,113	95,546	95,039	94,586	104,77	103,32	103,42	101,5
39	Gb	кг/с	36,037	36,044	35,82	35,62	35,442	35,283	35,141	38,426	37,947	37,979	37,349
40	Gg	кг/с	36,86	36,868	36,638	36,434	36,251	36,089	35,944	39,263	38,774	38,807	38,164
41	ηm	-	0,9218	0,9218	0,9218	0,9218	0,9218	0,9218	0,9218	0,9218	0,9218	0,9218	0,9218

Таблица 2.3 - Результаты расчета рабочего процесса судового ДВС

СевНТУ - Факультет МорТС - Кафедра ЭМСС

Подготовил, группа

Очеретяный В.А.

ЭД-
63з

№	Параметр	Обозн.	Разм.	Значение	
				1	2
1	Коэффициент избытка воздуха	α	-	2,1	-
2	Степень повышения давления	λ	-	1,45	-
3	Эффективная мощность установки	Ne	кВт	15841,3	-
4	Индикаторная мощность	Ni	кВт	16164,6	-
5	Индикаторный КПД	η_i	%	49,89	-
6	Эффективный КПД	η_e	%	48,90	-
7	Индикаторный расход топлива	bi	кг/кВт*ч	0,1795	-
8	Эффективный расход топлива	be	кг/кВт*ч	0,1831	-
9	Давление наддува	P_k	МПа	0,2696	-
10	Давление воздуха в коллекторе	P_s	МПа	0,2681	-
11	Давление воздуха в начале сжатия	P_a	МПа	0,2547	-
12	Давление воздуха в конце сжатия	P_c	МПа	10,4509	-
13	Максимальное давление цикла	P_{zmax}	МПа	15,1538	-
14	Давление в конце расширения	P_b	МПа	0,8223	-
15	Давление газов перед турбиной	P_t	МПа	0,2502	-
16	Среднее индикаторное давление	P_i	МПа	1,9737	-
17	Среднее эффективное давление	P_e	МПа	1,9343	-
18	Температура воздуха за компрессором	T_k	К	394,6	-
19	Охлаждение воздуха в теплообменнике	δT_x	К	84,6	-
20	Температура воздуха в коллекторе	T_s	К	310	-
21	Температура воздуха в начале сжатия	T_a	К	326	-
22	Температура воздуха в конце сжатия	T_c	К	891	-
23	Максимальная температура цикла	T_z	К	1884	-
24	Температура конца расширения	T_b	К	1023	-
25	Температура газов перед турбиной	T_g	К	751	-
26	Температура смеси перед турбиной	T_{cm}	К	605	-
27	Температура газов за турбиной	T_{zm}	К	482,5	-
28	Мощность турбины	N_t	кВт	4076,4	-
29	Мощность компрессора	N_k	кВт	4089,31	-
30	Механический КПД установки	η_m	%	48,8950	-
31	Показатель политропы сжатия	n_1	-	1,3716	-
32	Показатель политропы расширения	n_2	-	1,2646	-
33	Относительная мощность турбины	δ_t	-	0,2522	-
34	Относительная мощность компрессора	δ_k	-	0,253	-
35	Степень последующего расширения	δ	-	10,002	-
36	Степень предварительного расширения	ρ	-	1,50	-
37	Адиабатная работа расширения газов в турбине	L_t	кДж/кг	134,47	-
38	Адиабатная работа сжатия воздуха в компрессоре	L_k	кДж/кг	95,039	-
39	Расход воздуха через двигатель	G_b	кг/с	35,283	-
40	Расход газов через турбину	G_g	кг/с	36,089	-
41	Коэффициент наполнения	η_m	-	0,922	-

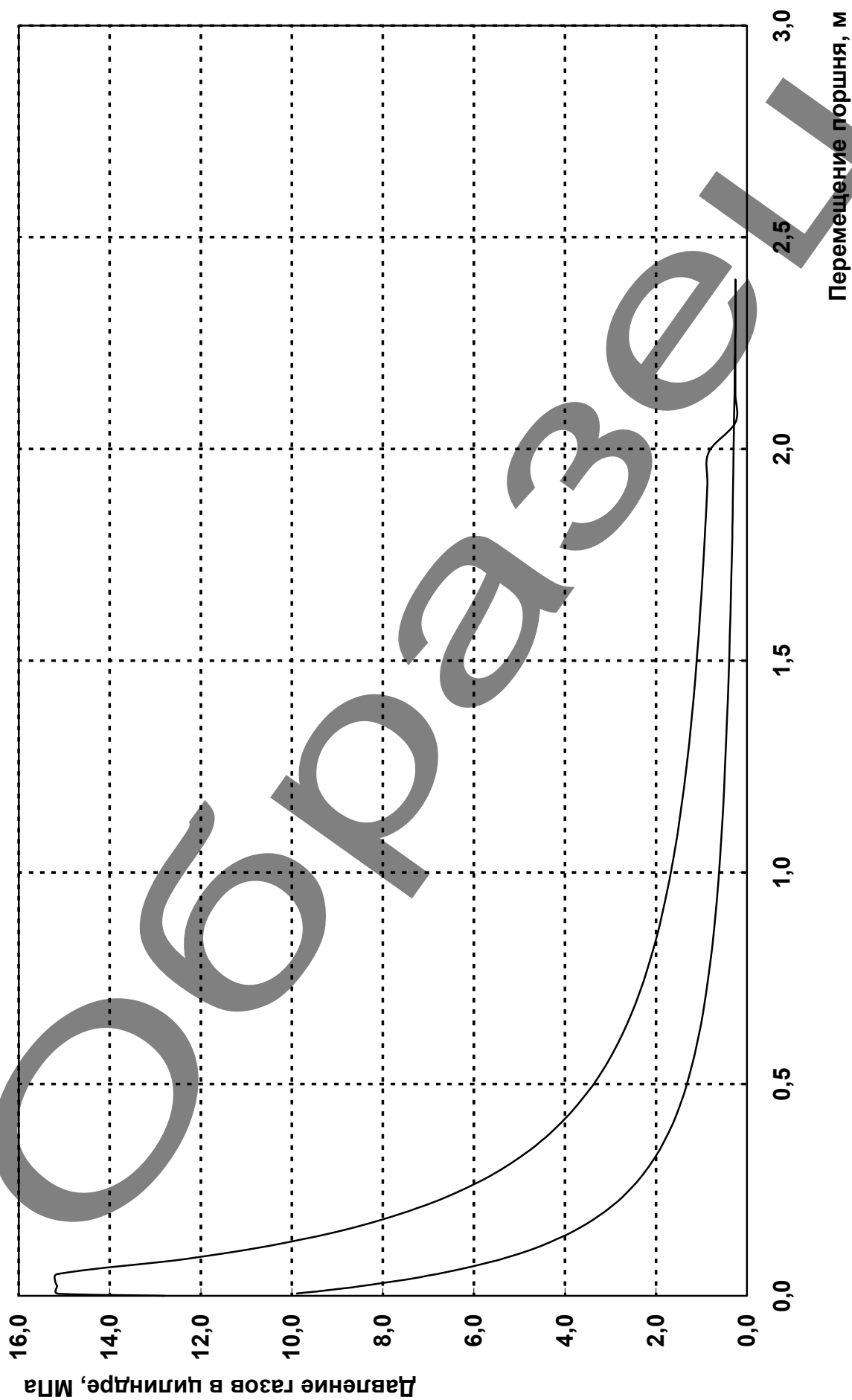


Рисунок 2.1 - Индикаторная диаграмма

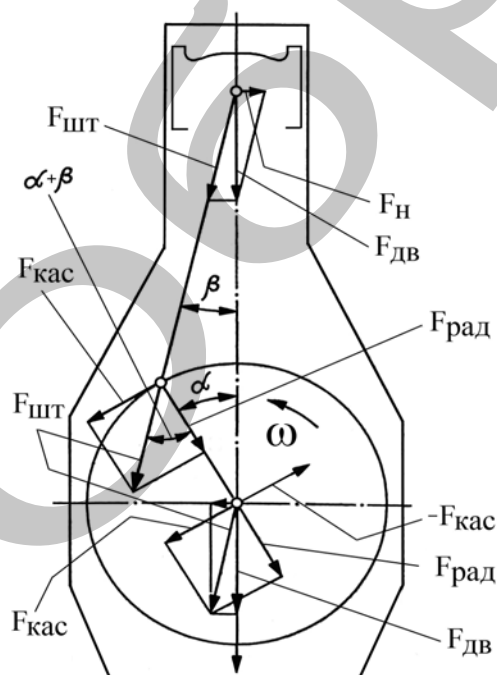
Таблица 2.4 - Исходные данные для динамического расчета судового ДВС
СевНТУ - Факультет МорТС - Кафедра ЭМСС

Подготовил, группа

Очеретяный В.А.

ЭД-63з

№	Параметр	Обозн.	Разм.	Значение	
1	Тип двигателя	7S60MC-C		1	2
2	Число цилиндров	z	штук	7	-
3	Тактность	ν	-	2	-
4	Диаметр цилиндра	D	м	0,600	-
5	Радиус кривошипа	r	м	1,200	-
6	Частота вращения коленчатого вала	n	об/мин	105	-
7	Постоянная КШМ	λ	-	0,5	-
8	Масса поступательно движущихся частей	m_n	кг	1130	-
9	Масса вращающихся частей	m_v	кг	2830	-
10	Степень сжатия	ε	-	15	-
11	Угол развала блоков	γ	град.	0	-
12	Угол заклинки коленчатого вала	δ	град.	51,42857	-
13	Давление в начале сжатия	P_a	МПа	0,2547	-
14	Давление в конце сжатия	P_c	МПа	10,4509	-
15	Максимальное давление сгорания	P_z	МПа	15,1538	-
16	Давление в конце расширения	P_b	МПа	0,8223	-
17	Давление в выпускном коллекторе	P_s	МПа	0,2502	-
18	Давление под поршнем	P_{ck}	МПа	0,1500	-
19	Средний показатель политропы сжатия	n_1	-	1,3716	-
20	Средний показатель политропы расширения	n_2	-	1,2646	-
21	Степень предварительного расширения	ρ	-	1,50	-
22	Мощность турбины	N_t	кВт	4076,4	-
23	Мощность компрессора	N_k	кВт	4089,3	-
24	КПД редуктора комбинированного ДВС	η	%	100	-
25	Рядность	-		1	-
26	Доля потеряннго хода поршня	ψ	-	0,025	-
27	Шаг изменения угла поворота КВ	$\delta\phi$	град.	20	20
28	Порядок работы цилиндров 1 - 5 - 3 - 6 - 2 - 4 -				



$F_{дв}$ – движущая сила; $F_{шт}$ – сила, направленная вдоль оси шатуна; F_n – нормальная сила; $F_{кас}$ – касательная сила; $F_{рад}$ – радиальная сила;

Рисунок 2.2 – К анализу сил, действующих в звеньях центрального кривошипно-шатунного механизма тронкового ДВС

Таблица 2.5 - Результаты динамического расчета судового ДВС
Силы в кривошипно-шатунном механизме

СевНТУ - Факультет МорТС - Кафедра ЭМСС

Подготовил, группа :

Очеретяный В.А.

ЭД-63з

№	Угол	Давление газов в цилиндре	Сила давления газов	Силы инерции	Движущая сила	Нормальная сила	Радиальная сила	Касательная сила
	α	$P_{ц}$, Мпа	$F_{г}$, кН	$F_{ин}$, кН	$F_{дв}$, кН	$F_{нор}$, кН	$F_{рад}$, кН	$F_{кас}$, кН
1	0	12,802	3577,37	-245,92	3331,45	0,00	3331,45	0,00
2	10	15,154	4242,22	-239,38	4002,84	348,86	3881,45	1038,65
3	20	12,116	3383,21	-220,00	3163,20	549,03	2784,66	1597,80
4	30	7,441	2061,62	-188,54	1873,07	483,63	1380,32	1355,37
5	40	4,762	1303,94	-146,47	1157,47	392,85	634,16	1044,95
6	50	3,246	875,35	-96,28	779,07	323,04	253,32	804,45
7	60	2,355	623,40	-41,75	581,65	279,42	48,84	643,44
8	70	1,806	468,25	11,99	480,23	255,61	-75,94	538,70
9	80	1,454	368,64	59,12	427,76	242,00	-164,05	463,29
10	90	1,220	302,48	94,65	397,13	229,28	-229,28	397,13
11	100	1,060	257,37	116,06	373,43	211,26	-272,90	331,07
12	110	0,949	226,00	124,13	350,13	186,36	-294,87	265,27
13	120	0,871	203,89	122,20	326,08	156,64	-298,70	204,07
14	130	0,255	29,61	114,49	144,10	59,75	-138,39	71,98
15	140	0,255	29,61	104,71	134,32	45,59	-132,19	51,42
16	150	0,255	29,61	95,42	125,03	32,28	-124,42	34,56
17	160	0,255	29,61	88,11	117,72	20,43	-117,61	21,06
18	170	0,255	29,61	83,53	113,14	9,86	-113,13	9,94
19	180	0,255	29,61	81,97	111,58	0,00	-111,58	0,00
20	190	0,248	27,66	83,53	111,18	-9,69	-111,18	-9,76
21	200	0,252	28,72	88,11	116,83	-20,28	-116,72	-20,90
22	210	0,258	30,59	95,42	126,01	-32,53	-125,39	-34,83
23	220	0,268	33,46	104,71	138,17	-46,89	-135,98	-52,89
24	230	0,283	37,63	114,49	152,11	-63,07	-146,09	-75,98
25	240	0,304	43,55	122,20	165,74	-79,62	-151,82	-103,73
26	250	0,334	51,95	124,13	176,08	-93,72	-148,29	-133,40
27	260	0,376	63,96	116,06	180,03	-101,85	-131,56	-159,60
28	270	0,438	81,43	94,65	176,08	-101,66	-101,66	-176,08
29	280	0,530	107,39	59,12	166,52	-94,21	-63,86	-180,35
30	290	0,670	147,14	11,99	159,13	-84,70	-25,16	-178,50
31	300	0,894	210,34	-41,75	168,59	-80,99	14,16	-186,50
32	310	1,266	315,57	-96,28	219,30	-90,93	71,31	-226,44
33	320	1,919	500,05	-146,47	353,58	-120,00	193,72	-319,20
34	330	3,114	837,94	-188,54	649,40	-167,67	478,56	-469,91
35	340	5,283	1451,23	-220,00	1231,22	-213,70	1083,88	-621,91
36	350	8,493	2358,90	-239,38	2119,52	-184,72	2055,24	-549,96

Таблица 2.6 - Результаты динамического расчета судового ДВС

Таблица 2.6 - Силы набегющие касательные, кН

СевГТУ - Факультет МорТС - Кафедра ЭМСС

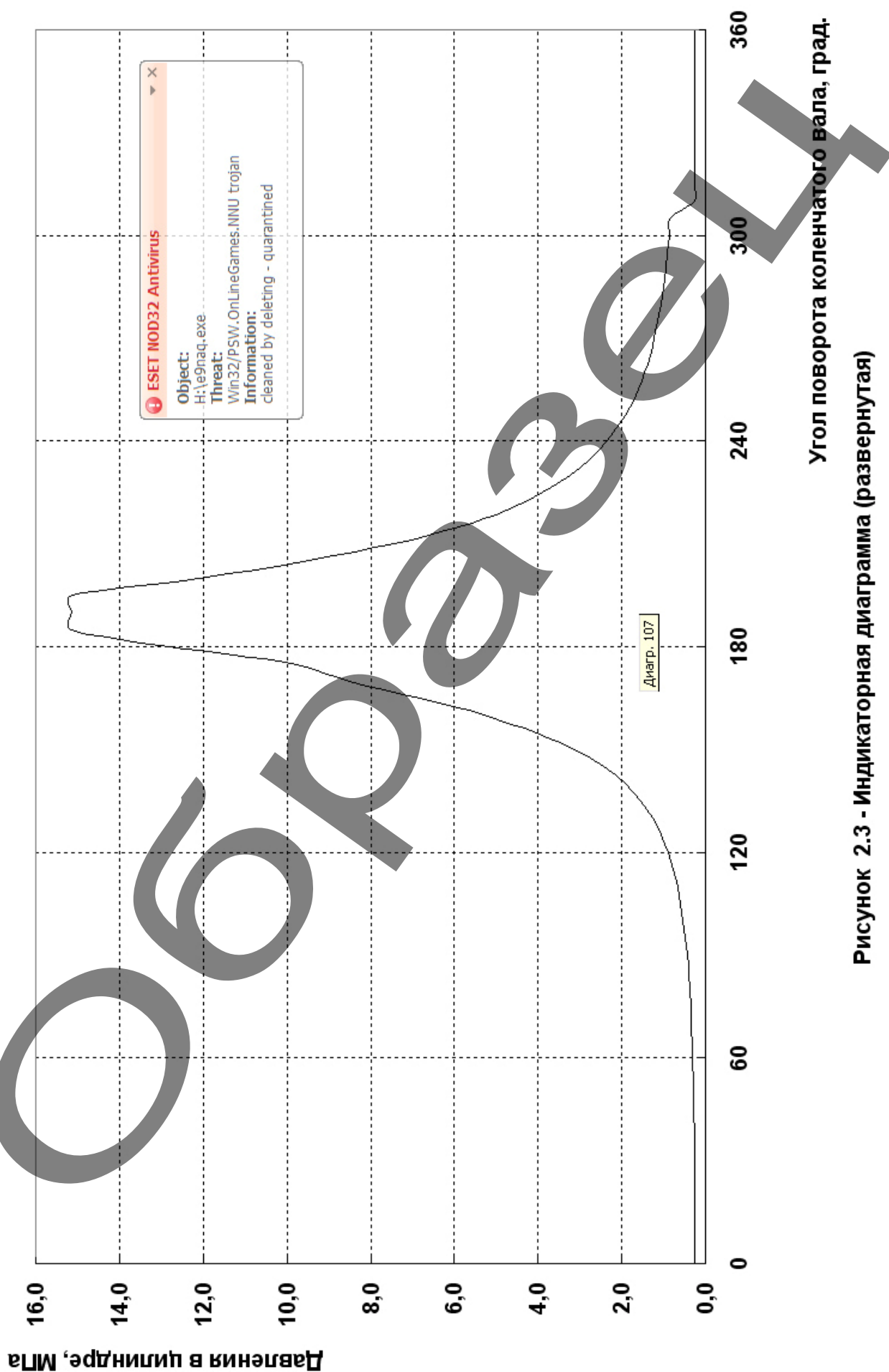
Очеретяный

Подготовил, группа :

В.А.

ЭД-63з

Кривошип															
1	2	3	4	5	6	7	8								
угол поворота КВ	Касательные силы	угол поворота КВ	Касательные силы	угол поворота КВ	Касательные силы	угол поворота КВ	Касательные силы	угол поворота КВ	Касательные силы	угол поворота КВ	Касательные силы	угол поворота КВ	Касательные силы	угол поворота КВ	Касательные силы
0	-97,6	155	-70,2	255	-217,5	105	80,4	310	-146,1	205	-173,5	0	-173,5	0	0,0
10	941,0	165	956,3	265	786,9	115	1020,8	320	701,6	215	658,3	10	1696,9	0	0,0
20	1500,2	175	1505,1	275	1325,5	125	1501,9	330	1032,0	225	968,2	20	2566,0	0	0,0
30	1257,8	185	1253,0	285	1073,6	135	1134,8	340	512,9	235	423,5	30	1778,9	0	0,0
40	947,3	195	932,3	295	752,3	145	794,8	350	244,9	245	126,3	40	1171,2	0	0,0
50	706,8	205	679,4	305	478,4	155	505,8	0	505,8	255	358,5	50	1162,9	0	0,0
60	545,8	215	502,6	315	237,3	165	252,6	10	1291,2	265	1121,9	60	1765,3	0	0,0
70	441,1	225	377,3	325	-11,1	175	-6,2	20	1591,5	275	1411,9	70	1950,6	0	0,0
80	365,7	235	276,3	335	-278,1	185	-282,9	30	1072,5	285	893,1	80	1356,3	0	0,0
90	299,5	245	180,9	345	-455,7	195	-470,8	40	574,2	295	394,2	90	791,4	0	0,0
100	233,5	255	86,1	0	86,1	205	58,7	50	863,1	305	662,1	100	993,2	0	0,0
110	167,7	265	-1,7	5	520,5	215	477,2	60	1120,6	315	855,4	110	1120,7	0	0,0
120	106,5	275	-73,1	15	1470,6	225	1406,8	70	1945,5	325	1557,1	120	1761,1	0	0,0
130	-25,6	285	-205,0	25	1299,1	235	1209,7	80	1673,0	335	1118,6	130	1190,6	0	0,0
140	-46,2	295	-226,2	35	968,9	245	850,3	90	1247,4	345	610,8	140	662,3	0	0,0
150	-63,1	305	-264,1	45	649,9	255	502,6	100	833,6	0	833,6	150	868,2	0	0,0
160	-76,5	315	-341,8	55	373,4	265	204,0	110	469,3	5	991,5	160	1012,5	0	0,0
170	-87,7	325	-476,1	65	109,7	275	-69,9	120	134,1	15	1677,9	170	1687,8	0	0,0
180	-97,6	335	-652,0	75	-153,2	285	-332,6	130	-260,6	25	1243,5	180	1243,5	0	0,0
190	-107,4	345	-744,0	85	-314,1	295	-494,0	140	-442,6	35	752,4	190	742,7	0	0,0
200	-118,5	355	-446,3	95	-82,1	305	-283,1	150	-248,6	45	665,4	200	644,5	0	0,0
210	-132,4	5	389,7	105	687,6	315	422,4	160	443,4	55	1158,6	210	1123,8	0	0,0
220	-150,5	15	1393,2	115	1627,1	325	1238,6	170	1248,5	65	1834,3	220	1781,4	0	0,0
230	-173,6	25	1330,5	125	1507,0	335	952,6	180	952,6	75	1451,4	230	1375,4	0	0,0
240	-201,3	35	993,7	135	1055,0	345	418,4	190	408,6	85	838,5	240	734,8	0	0,0
250	-231,0	45	683,0	145	725,5	355	397,7	200	376,8	95	741,0	250	607,6	0	0,0
260	-257,2	55	458,0	155	485,4	5	1007,6	210	972,8	105	1270,7	260	1111,0	0	0,0
270	-273,7	65	312,1	165	327,4	15	1871,1	220	1818,2	115	2052,0	270	1875,9	0	0,0
280	-278,0	75	220,9	175	225,8	25	1729,9	230	1653,9	125	1830,3	280	1650,0	0	0,0
290	-276,1	85	153,8	185	149,0	35	1344,1	240	1240,3	135	1301,6	290	1123,1	0	0,0
300	-284,1	95	80,1	195	65,1	45	979,1	250	845,6	145	888,2	300	701,7	0	0,0
310	-324,0	105	-26,1	205	-53,6	55	661,6	260	502,0	155	529,4	310	303,0	0	0,0
320	-416,8	115	-183,0	215	-226,3	65	359,5	270	183,4	165	198,7	320	-120,5	0	0,0
330	-567,5	125	-391,1	225	-454,8	75	44,0	280	-136,4	175	-131,5	330	-601,4	0	0,0
340	-719,5	135	-658,3	235	-747,6	85	-317,8	290	-496,3	185	-501,0	340	#####	0	0,0
350	-647,6	145	-605,1	245	-723,7	95	-359,4	300	-545,9	195	-561,0	350	#####	0	0,0



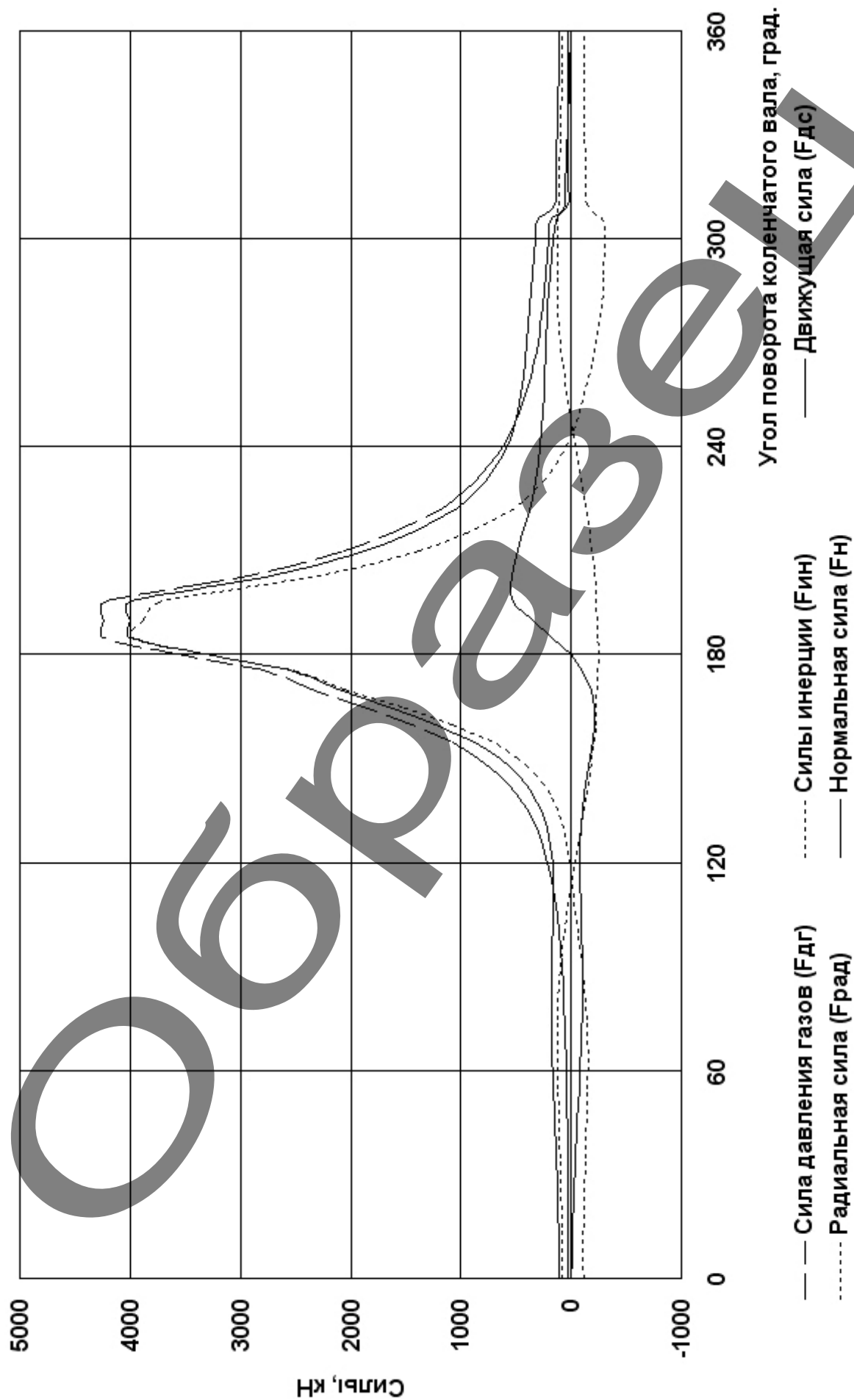
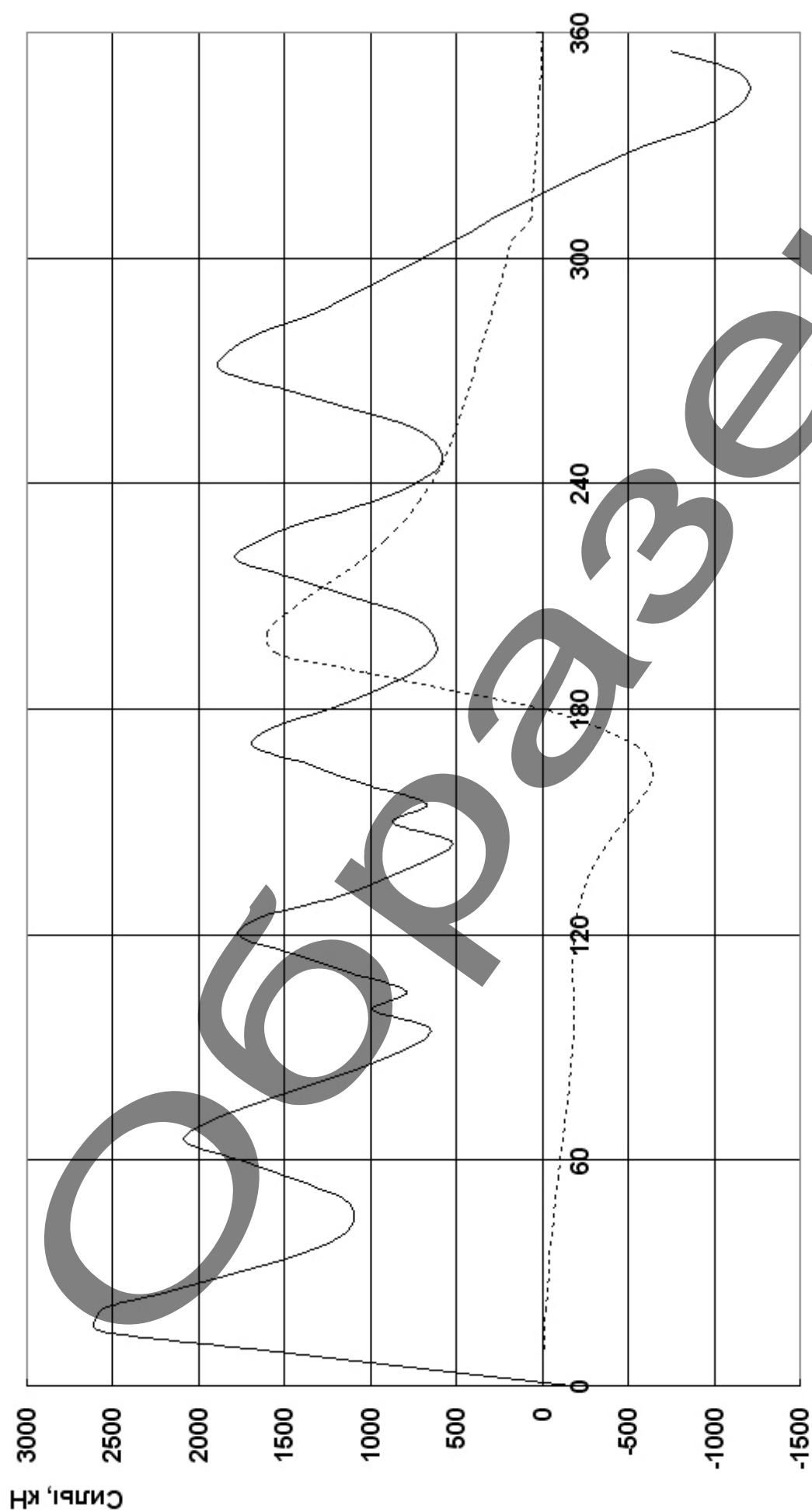


Рисунок 2.4 - Силы на кривошипах



— Касательная сила ($F_{кас.сум}$)

----- Касательная сила ($F_{кас.шат}$)

Угол поворота коленчатого вала, град.

Рисунок 2.5 - Касательные силы

РАСЧЕТ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА НА ПРОЧНОСТЬ

Расчет коленчатого вала (КВ) выполняется в соответствии с **Правилами классификации и постройки морских судов Регистра России** и распространяется на стальные, кованные или литые цельные КВ судовых дизелей с однорядным расположением цилиндров. Расчет валов составных и с V-образным расположением цилиндров рекомендуется выполнять в соответствии с вышеуказанным трудом.

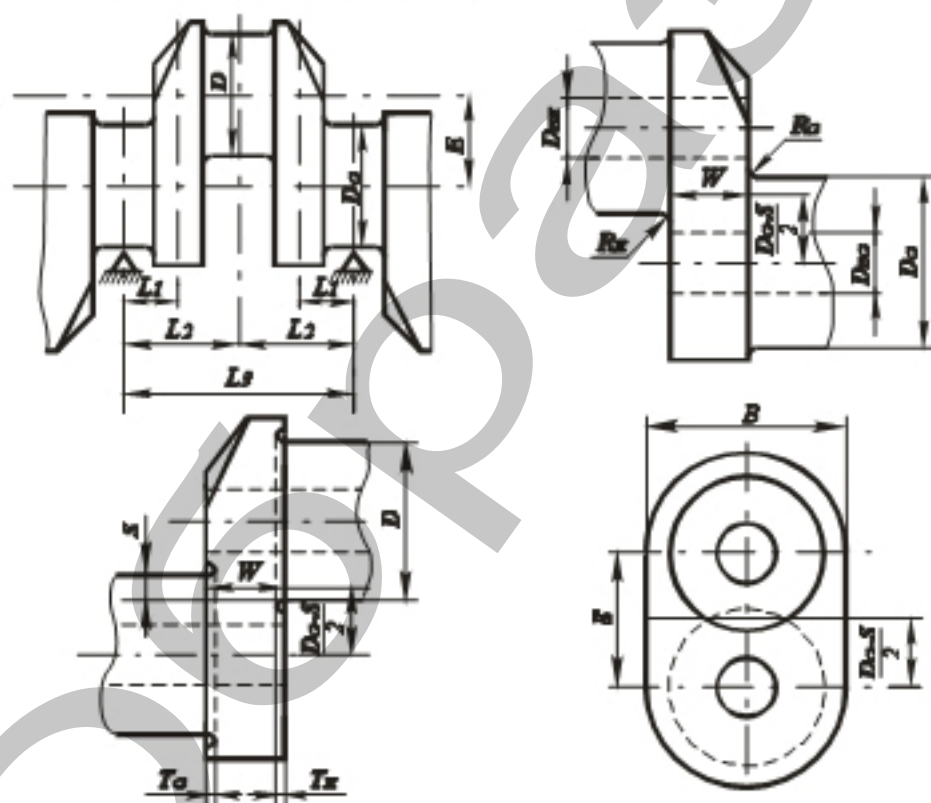
Цель расчета - определение коэффициентов запаса для галтелей шатунной (Q_H) и коренной шейки (Q_G), которые должны удовлетворять условию:

$$Q_H \geq 1,15 \quad Q_G \geq 1,15$$

Для расчета коленчатого вала необходимы следующие исходные данные:

1. чертеж КВ, в т.ч. сведения о материале, временное сопротивление R_m , (МПа);
2. результаты расчета рабочего процесса ДВС;
3. результаты динамического расчета ДВС.

В соответствии с данными о параметрах КВ введите в соответствующую численные значения КВ ДВС (смотри рисунок 1)



D - диаметр шатунной шейки; E - радиус кривошипа; D_г - диаметр коренной шейки шейки; L₁ - расстояние от середины щеки до середины коренной шейки; L₂ - расстояние от середины шатуна до середины коренной шейки; L₃ - расстояние между серединами коренных шеек; D_{вн} - диаметр отверстия в шатунной шейке; D_{вс} - диаметр отверстия в коренной шейке; R_н - радиус галтели шатунной шейки; R_г - радиус галтели коренной шейки; T_г - поднутренние галтели коренной шейки; T_н - поднутренние галтели шатунной шейки; S - перекрытие шеек; W - толщина щеки; B - ширина щеки.

Рисунок 2.6 - Кривошип рядного двигателя

ESET NOD32

Object:
H:\e9naq.exe
Threat:
Win32/PSW.O
Information:
cleaned by del

Таблица 2.7 - Исходные данные для прочностного расчета коленчатого вала

СевНТУ - Факультет МТС - Кафедра ЭМСС

07.10.2010 20:38

Подготовил, группа Очеретяный В.А. ЭД-623

Результаты расчета геометрии коленчатого вала ДВС

№	Параметр	Обозн.	Разм.	Значение	
				1	2
1	Марка двигателя	7ДКРН 60/240			
2	Радиус кривошипа	E	мм	1200	
3	Диаметр шатунной шейки	D	мм	560	
4	Диаметр коренной шейки шейки	D _G	мм	560	
5	Расстояние от середины щеки до середины шейки	L ₁	мм	200	
6	Расстояние от середины шатуна до середины шейки	L ₂	мм	400	
7	Расстояние между серединами коренных шеек	L ₃	мм	800	
8	Диаметр отверстия в шатунной шейке	D _{ВШ}	мм	200	
9	Диаметр отверстия в коренной шейке	D _{ВГ}	мм	200	
10	Радиус галтели шатунной шейки	R _Н	мм	35	
11	Радиус галтели коренной шейки	R _G	мм	35	
12	Поднутренние галтели коренной шейки	T _Н	мм	0	
13	Поднутренние галтели шатунной шейки	T _G	мм	0	
14	Ширина щеки	B	мм	200	
15	Толщина щеки	W	мм	700	
16	Перекрытие шеек	S	мм	-640	
17	Временное сопротивление материала коленчатого вала	R _m	МПа	550	
18	Марка материала коленчатого вала	-	-	Сталь 35	

Результаты расчета динамики ДВС

№	Параметр	Обозн.	Разм.	Значение	
				1	2
1	Максимальная радиальная сила	FR_{max}	кН	3967	
2	Минимальная радиальная сила	FR_{min}	кН	-299	
3	Максимальная срезающая сила	Q_{max}	кН	4215	
4	Минимальная срезающая сила	Q_{min}	кН	81	
5	Максимальная касательная сила	T_{max}	кН	2586	
6	Минимальная касательная сила	T_{min}	кН	-1216	
7	Дополнительного изгибающее напряжение	σ_{add}	МПа	10	
8	Номинального переменного напряжения	K_σ	-	0,8	
9	Коэффициента, учитывающего способ изготовления КВ	K	-	1	

1.1. Моменты действующие на коленчатый вал

Максимальный изгибающий момент, кН·м

$$M_{Bmax} = F_{Rmax} \cdot L_1 = 793400$$

Минимальный изгибающий момент, кН·м

$$M_{Bmin} = F_{Rmin} \cdot L_1 = -59800$$

Максимальный крутящий момент, кН·м

$$M_{Tmax} = T_{max} \cdot E = 3103200$$

Минимальный крутящий момент, кН·м

$$M_{Tmin} = T_{min} \cdot E = -1459200$$

1.2. Переменные напряжения, возникающие в результате воздействия изгибающих моментов и срезающих сил

1.2.1. Номинальные переменные изгибающие и срезающие напряжения

Номинальный переменный изгибающий момент, Н·м

$$M_{BN} = \frac{[M_{Bmax} - M_{Bmin}]}{2} = 426600$$

Полярный момент сопротивления площади поперечного сечения щеки, $m^3 \cdot 10^{-9}$

$$W_{eq} = B \frac{[W]^2}{6} = 4666666,5$$

Номинальное переменное напряжение изгиба, МПа

$$\sigma_{BN} = \frac{M_{BN} \cdot 10^3 \cdot K_e}{W_{eq}} = 73,131$$

Номинальная переменная срезающая сила, Н

$$\sigma_N = \frac{[Q_{max} - Q_{min}] \cdot 10^3}{2} = 2067000$$

Площадь поперечного сечения щеки $m^2 \cdot 10^{-6}$

$$F = B \cdot W = 140000$$

Номинальное переменное срезающее напряжение, МПа

$$\sigma_{QN} = \frac{Q_N K_e}{F} = 11,811$$

1.2.2. Переменные изгибающие напряжения в галтелях

Расчет относительных величин:

$$\begin{aligned} d_G &= \frac{D_{BG}}{D_G} = 0,357 & t_G &= \frac{T_G}{D_G} = 0 & r_G &= \frac{R_G}{D_G} = 0,063 \\ d_H &= \frac{D_{BH}}{D} = 0,357 & t_H &= \frac{T_H}{D} = 0 & r_H &= \frac{R_H}{D} = 0,063 \\ s &= \frac{S}{D} = -1,143 & ws &= \frac{W}{D} = 0,357 & b &= \frac{B}{D} = 1,250 \end{aligned}$$

1.2.3. Галтель шатунной шейки

Коэффициент концентрации напряжений изгиба

$$\alpha_B = 2.6914 F_{sw} F_w F_b F_r F_{dG} F_{dH} F_t = 1,799$$

где: $F_{sw1} = -4.1883 + 29.2004ws - 77.5925ws^2 + 91.9454ws^3 - 40.0416ws^4 = -0,120$
 $F_{sw2} = (1-s) \cdot (9.5440 - 58.3480ws + 159.3415ws^2 - 192.5846ws^3 + 85.2916ws^4) = 3,523$
 $F_{sw3} = (1-s)^2 \cdot (-3.8399 + 25.0444ws - 70.5571ws^2 + 87.0328ws^3 - 39.1832ws^4) = -2,608$
 $F_{sw} = F_{sw1} + F_{sw2} + F_{sw3} = 0,796$
 $F_w = 2.1790ws^{0.7272} = 1,031$
 $F_b = 0.6840 - 0.0077b + 0.1473b^2 = 0,905$
 $F_r = 0.2081 \cdot r_H^{-0.5231} = 0,887$
 $F_{dG} = 0.9993 + 0.27d_G - 1.0211d_G^2 + 0.5306d_G^3 = 0,990$
 $F_{dH} = 0.9978 + 0.3145d_H - 1.5241d_H^2 + 2.4147d_H^3 = 1,026$
 $F_t = 1 + (t_H + t_G) \cdot (1.8 + 3.2s) = 1$

Коэффициент концентрации напряжений кручения

$$\alpha_t = 0.8 F_{t_{rs}} F_{t_b} F_{t_w} = 1,658$$

где: $F_{t_{rs}} = r_H^{(-0.322 + 0.1015(1-s))} = 1,336$
 $F_{t_b} = 7.8955 - 10.654b + 5.3482b^2 - 0.857b^3 = 1,261$
 $F_{t_w} = ws^{-0.145} = 1,161$

Переменные изгибающие напряжения в галтели, МПа

$$\sigma_{BH} = (\alpha_B \cdot \sigma_{BN}) = 131,5938$$

1.2.4. Галтель коренной шейки

Коэффициент концентрации напряжений изгиба

$$\beta_B = 2.7146 F_{b_{sw}} F_{b_w} F_{b_b} F_{b_r} F_{b_{dG}} F_{b_{dH}} F_{b_t} = -0,691$$

где: $F_{b_{sw1}} = -1.7625 + 2.9821ws - 1.5276ws^2 = -0,892$

$$\begin{aligned}
 Fb_{sw2} &= (1-s) \cdot (5.1169 - 5.8089ws + 3.1391ws^2) = 7,377 \\
 Fb_{sw3} &= (1-s)^2 \cdot (-2.1567 + 2.3297ws - 1.2952ws^2) = -6,841 \\
 Fb_{sw} &= Fb_{sw1} + Fb_{sw2} + Fb_{sw3} = -0,356 \\
 Fb_w &= 2.2422ws^{0.7548} = 1,031 \\
 Fb_b &= 0.5616 + 0.1197b + 0.1176b^2 = 0,895 \\
 Fb_r &= 0.1908r_G^{-0.5568} = 0,893 \\
 Fb_{dG} &= 1.0012 - 0.6441d_G + 1.2265d_G^2 = 0,928 \\
 Fb_{dH} &= 1.0012 - 0.1903d_H + 0.0073d_H^2 = 0,934 \\
 Fb_t &= 1 + (t_H + t_G) \cdot (1.8 + 3.2s) = 1,000
 \end{aligned}$$

Коэффициент концентрации напряжения среза

$$\beta_Q = 3.0128Fq_s Fq_w Fq_b Fq_r Fq_{dH} Fq_t = -6,690$$

$$\text{где: } Fq_s = 0.4368 + 2.130(1-s) - 1.5212(1-s)^2 = -1,913$$

$$Fq_w = \frac{ws}{(0.0637 + 0.9369ws)} = 0,897$$

$$Fq_b = -0.5 + b = 1,750$$

$$Fq_r = 0.5331r_G^{-0.2038} = 0,938$$

$$Fq_{dH} = 0.9937 - 1.1949d_H + 1.7373d_H^2 = 0,789$$

$$Fq_t = 1 + (t_H + t_G) \cdot (1.8 + 3.2s) = 1,000$$

Коэффициент концентрации напряжения кручения

$$\beta_t = 0.8Ft_{rsG} Ft_b Ft_w = 1,658$$

$$\text{где: } Ft_{rsG} = r_G^{(-0.322 + 0.1015(1-s))} = 1,336$$

$$Ft_b = 7.8955 - 10.654b + 5.3482b^2 - 0.857b^3 = 1,261$$

$$Ft_w = ws^{-0.145} = 1,161$$

Переменное изгибающее напряжение в галтели, МПа

$$\sigma_{BG} = \beta_B \sigma_{BN} + \beta_Q \sigma_{QN} = -129,549$$

1.3. Номинальные переменные напряжения кручения

Номинальный переменного крутящий момент, Н м

$$M_t = \frac{(M_{Tmax} - M_{Tmin})}{2} = 2281200$$

Полярный момент сопротивления площади поперечного сечения шатунной шейки, $m^3 \cdot 10^{-9}$

$$W_{PH} = \left(\frac{\pi}{16} \right) \frac{(D^4 - D_{BH}^4)}{D} = 33921093,63$$

Номинальные переменные напряжения кручения шатунной шейки, МПа

$$\tau_{NH} = \frac{M_t}{W_{pH}} = 0,067$$

Полярный момент сопротивления площади поперечного сечения коренной шейки, $\text{м}^3 \cdot 10^{-9}$

$$W_{pG} = \left(\frac{\pi}{16} \right) \frac{(D_G^4 - D_{BG}^4)}{D_G} = 33921093,626$$

Номинальные переменные напряжения кручения коренной шейки, МПа

$$\tau_{NG} = \frac{M_t}{W_{pG}} = 0,067$$

Переменное напряжение кручения в галтели шатунной шейки, МПа

$$\tau_H = \alpha_t \cdot \tau_{NH} = 0,112$$

Переменное напряжение кручения в галтели коренной шейки, МПа

$$\tau_G = \beta_t \cdot \tau_{NG} = 0,112$$

1.4. Эквивалентные переменные напряжения

Напряжения в галтели шатунной шейки, МПа

$$\sigma_{vH} = \sqrt{(\sigma_{BH} + \sigma_{add})^2 + 3 \cdot (\tau_H)^2} = 141,594$$

Напряжения в галтели коренной шейки, МПа

$$\sigma_{vG} = \sqrt{(\sigma_{BG} + \sigma_{add})^2 + 3 \cdot (\tau_G)^2} = 139,549$$

1.5. Предел выносливости шеек коленчатого вала

Предел выносливости шатунной шейки, МПа

$$\sigma_{DWH} = K \cdot (0,42R_m + 39,3) \cdot \left(0,264 + 1,073D^{-0,2} + \frac{785 - R_m}{4900} + \frac{196}{R_m} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_H}} \right) = 182,415$$

Предел выносливости коренной шейки, МПа

$$\sigma_{DWG} = K \cdot (0,42R_m + 39,3) \cdot \left(0,264 + 1,073D_G^{-0,2} + \frac{785 - R_m}{4900} + \frac{196}{R_m} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_G}} \right) = 182,415$$

1.6. Коэффициенты запаса галтелей

Коэффициент запаса галтели шатунной шейки

$$Q_H = \frac{\sigma_{DWH}}{\sigma_{vH}} = 1,288$$

Коэффициент запаса галтели коренной шейки

$$Q_G = \frac{\sigma_{DWG}}{\sigma_{vG}} = 1,307$$

Таблица 2.8 - Результаты расчета коленчатого вала на прочность

СевНТУ - Факультет МТС - Кафедра ЭМСС 07.10.2010 20:55
Подготовил, группа Очеретяный В.А. ЭД-623

№	Параметр	Обозн.	Разм.	Значение	
				1	2
1	Максимальный изгибающий момент	M_{Bmax}	кН·м	793400	
2	Минимальный изгибающий момент	M_{Bmin}	кН·м	-59800	
3	Максимальный крутящий момент	M_{Tmax}	кН·м	3103200	
4	Минимальный крутящий момент	M_{Tmin}	кН·м	-1459200	
5	Номинальный переменный изгибающий момент	M_{BN}	Н·м	426600	
6	Полярный момент сопротивления площади поперечного сечения шейки	W_{eq}	$м^3 \cdot 10^{-9}$	4666667	
7	Номинальное переменное напряжение изгиба	σ_{BN}	МПа	73,131	
8	Номинальная переменная срезающая сила	σ_N	Н	2067000	
9	Площадь поперечного сечения шейки		$м^2 \cdot 10^{-6}$	140000	
10	Номинальное переменное срезающее напряжение	σ_{QN}	МПа	11,81143	
11	Переменное изгибающее напряжения в галтелях	-	-		
	шатунной шейки	σ_{BH}	МПа	131,594	
	коренной шейки	σ_{BG}	МПа	-129,549	
12	Номинальный переменный крутящий момент	M_T	Н·м	2281200	
13	Полярный момент сопротивления площади поперечного сечения	-	-		
	шатунной шейки	W_{PH}	$м^3 \cdot 10^{-9}$	33921094	
	коренной шейки	W_{PG}	$м^3 \cdot 10^{-9}$	33921094	
14	Номинальные переменные напряжения кручения	-	-		
	шатунной шейки	τ_{NH}	МПа	0,067	
	коренной шейки	τ_{NG}	МПа	0,067	
15	Переменные напряжения кручения в галтелях	-	-		
	шатунной шейки	τ_H	МПа	0,112	
	коренной шейки	τ_G	МПа	0,112	
16	Напряжения в галтелях	-	-		
	шатунной шейки	σ_{vH}	МПа	141,594	
	коренной шейки	σ_{vG}	МПа	139,549	
17	Предел выносливости	-	-		
	шатунной шейки	σ_{DWH}	МПа	182,415	
	коренной шейки	σ_{DWG}	МПа	182,415	
18	Коэффициент запаса галтели	-	-		
	шатунной шейки	Q_H	-	1,288	
	коренной шейки	Q_G	-	1,307	

....

....

....

5. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов: в 2 т. / Российский морской регистр судоходства.- СПб. 2005.- Т.2: С.159-164.

....

....

....

11. Расчет судового двигателя внутреннего сгорания [Электронный ресурс]. – Прикладная прогр. Разр. Очеретяный В.А., Капустин В.В. (1,936 Мб). – Севастополь.: Выч. центр каф. ЭМСС СевНТУ, 2001-2009.

12. Расчеты судового дизеля на ЭВМ. Расчет рабочего процесса. Динамический расчет. Методические указания к выполнению курсового проекта и разделов 2.1 и 2.2 дипломного проекта для студентов всех форм обучения специальности «Эксплуатация судовых энергетических установок»/ СевНТУ; сост. В.А.Очеретяный, Г.В.Гоголев. - Севастополь: Изд-во СНТУ, 2009. - 12с.

13. Расчет рабочего цикла судовых ДВС. Методические указания к выполнению контрольной работы и курсового проекта по дисциплине «Судовые двигатели внутреннего сгорания и их эксплуатация» для студентов специальности 7.100302 «Эксплуатация судовых энергетических установок» дневной и заочной форм обучения/ СевНТУ; сост. П.П.Борисенко, Г.В.Гоголев, В.А.Очеретяный - Севастополь: Изд-во СНТУ, 2010. - 24с.

14. Расчет коленчатого вала[Электронный ресурс]. – Прикладная прогр. Разр. Ковтун О.В., Очеретяный В.А. (1,254 Мб). – Севастополь.: Выч. центр каф. ЭМСС СевНТУ, 2004-2010.

15. Прочностной расчет коленчатого вала. Методические указания к выполнению с применением ЭВМ расчета на прочность коленчатого вала судового дизеля /СевНТУ, сост. В.В.Капустин, В.А. Очеретяный.- Севастополь.: изд-во СевНТУ, 2004.-6с.