



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(национальный исследовательский университет)»

Институт (Филиал) №1 Авиационная техника Кафедра 106  
Группа М10-403Б-18 Направление подготовки 24.03.03 - Баллистика и гидроаэродинамика  
Профиль Динамика полёта и управление движением летательных аппаратов  
Квалификация бакалавр

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
БАКАЛАВРА

На тему: Исследование характеристик эшелонированного крейсерского полета транспортного самолета  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Автор ВКРБ Москвитин Андрей Семенович  
(фамилия, имя, отчество полностью)  
Руководитель Мальцев Юрий Иванович  
(фамилия, имя, отчество полностью)  
Консультант \_\_\_\_\_  
(фамилия, имя, отчество полностью)  
Консультант \_\_\_\_\_  
(фамилия, имя, отчество полностью)  
Рецензент Титов Константин Николаевич  
(фамилия, имя, отчество полностью)

К защите допустить

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ Ефремов Александр Викторович  
(№ каф.) (фамилия, имя, отчество полностью)  
\_\_\_\_\_ 2022 г.

Москва 2022

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа бакалавра 86 с., 77 рис., 3 источн., 45 табл.

### РАСЧЕТ ЛЕТНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК, СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫСОТЫ, АНАЛИЗ ЭШЕЛОНИРОВАННОГО ПОЛЕТА

Предмет исследования — прототип транспортного самолета Ил-76.

Работа состоит из трех частей: общая часть, синтез системы автоматического управления и специальная часть.

В общей части был проведен расчет основных летно-технических характеристик самолета-прототипа.

В разделе синтеза системы автоматического управления была синтезирована система автоматической стабилизации высоты.

В специальной части был проведен анализ характеристик самолета-прототипа при выполнении эшелонирования.

Цель работы — провести анализ расхода топлива при различных вариантах эшелонирования.

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Общая часть</b>	<b>5</b>
1.1. Исходные данные	7
1.2. Расчет лётно – технических характеристик самолета	10
1.3. Расчет траектории полета	32
1.3.1. Расчет характеристик набора высоты	32
1.3.2. Расчет характеристик крейсерского полета	36
1.3.3. Расчет характеристик участка снижения	37
1.4. Расчет диаграммы транспортных возможностей	42
1.5. Расчет взлетно-посадочных характеристик самолета	43
1.6. Расчет характеристик маневренности самолета	45
1.7. Расчет характеристик продольной статической устойчивости и управляемости	47
<b>2. Синтез системы автоматического управления</b>	<b>55</b>
2.1. Описание объекта управления	55
2.1.1. Построение области высот и скоростей	56
2.1.2. Выбор параметров привода	57
2.1.3. Вывод	58
2.2. Синтез контуров автоматического управления	58
2.2.1. Расчет ядра системы	59
2.2.2. Расчет внешнего контура	61
2.2.3. Вывод	64
2.3. Частотный анализ	64
2.3.1. Анализ контура демпфирования	64

2.3.2.	Анализ ядра системы . . . . .	66
2.3.3.	Анализ внешнего контура . . . . .	69
2.3.4.	Вывод . . . . .	72
2.4.	Нелинейное моделирование САУ . . . . .	72
2.4.1.	Сравнение для разных максимальных скоростей откло- нения руля высоты . . . . .	73
2.4.2.	Сравнение линейной и нелинейной модели . . . . .	75
2.4.3.	Вывод . . . . .	76
2.5.	Вывод по разделу . . . . .	77
<b>3.</b>	<b>Специальная часть . . . . .</b>	<b>78</b>
3.1.	Исследование характеристик транспортного самолета при вы- полнении эшелонирования . . . . .	78
3.1.1.	Постановка задачи . . . . .	78
3.1.2.	Расчетные формулы . . . . .	78
3.2.	Исходные данные для расчетов . . . . .	78
3.2.1.	Задачи . . . . .	79
3.3.	Результаты . . . . .	79
3.3.1.	Результаты расчета при постоянной высоте и оптималь- ной скорости полета . . . . .	79
3.3.2.	Результаты расчета при оптимальном изменении высо- ты и скорости полета . . . . .	80
3.3.3.	Эшелонированный полет, высота меняется ступенчато с шагом 300 м. . . . .	81
3.3.4.	Анализ результатов . . . . .	83
3.4.	Вывод . . . . .	83
	<b>Заключение . . . . .</b>	<b>85</b>

Список литературы . . . . .	86
-----------------------------	----

## 1. Общая часть

В 1966 г. в ВВС было сформулировано техническое задание на военнотранспортный самолет нового типа, который должен был заменить Ан-12. Требовалась машина, способная транспортировать до 40 тонн груза на расстояние порядка 5000 км. без ухудшения ВПХ.

Работы по созданию Ил-76 начались в 1967 г. в условиях конкуренции с ОКБ Антонова, которое предлагало глубокую модернизацию Ан-12.

Руководство созданием Ил-76 впервые осуществлял не сам С.В. Ильюшин, а его заместитель — Г.В. Новожилов. Главным конструктором Ил-76 и последующих его модификаций стал Р.П. Палковский.

Ил-76 представляет собой свободнонесущий высокоплан нормальной аэродинамической схемы со стреловидным крылом, стабилизатором и рулем высоты, однокилевым Т-образным вертикальным оперением, пятиопорным шасси и турбореактивной силовой установкой Д-30КП оснащенной реверсивным устройством (Рисунок. 1.1).

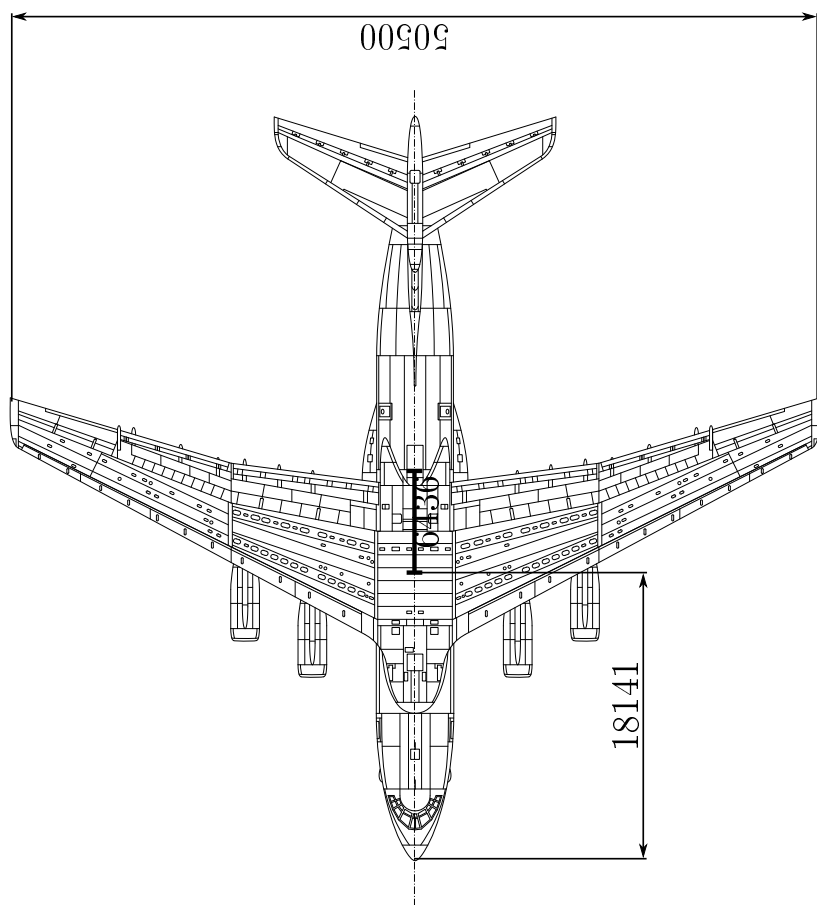
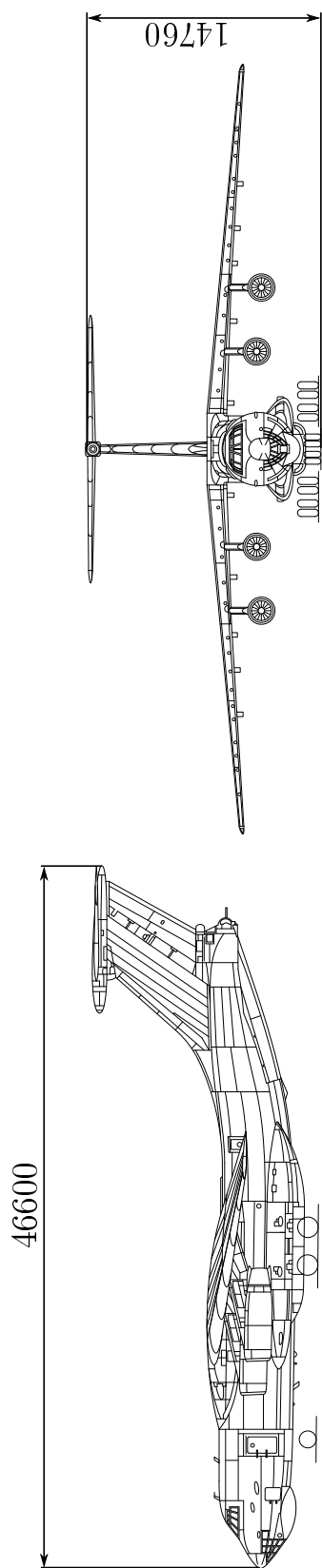


Рисунок 1.1 — Общий вид самолета Ил-76

## 1.1. Исходные данные

Основные параметры самолета необходимые для расчета представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 — Исходные данные для самолета Ил-76

$M_{\text{доп}}$	$V_i$	$m_0$	$\bar{m}_{\text{цн}}$	$\bar{m}_{\text{т}}$	$\bar{m}_{\text{сн}}$	$\bar{P}_0$	$Ce_0$	$\frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{рев}}}$	$P_s$	$b_a$	$\bar{L}_{\text{го}}$	$S$
-	$\frac{\text{км}}{\text{ч}}$	кг	-	-	-	-	$\frac{\text{кг}}{\text{дан*ч}}$	-	$\frac{\text{дан}}{\text{м}^2}$	м	-	$\text{м}^2$
0.80	$\leq 650$	140000	0.25	0.44	0.45	0.276	0.048	4/2	457	6.436	3.10	300

Зависимости аэродинамических характеристик представлены на рисунке 1.2. Зависимости  $C_y(C_x)$ ,  $C_y(\alpha)$  для различных конфигурация представлены на рисунке 1.3. Аэродинамические характеристики для отдельных компоновочных групп приведены на рисунке 1.4. Основные параметры двигателя приведены на рисунках 1.5, 1.6.

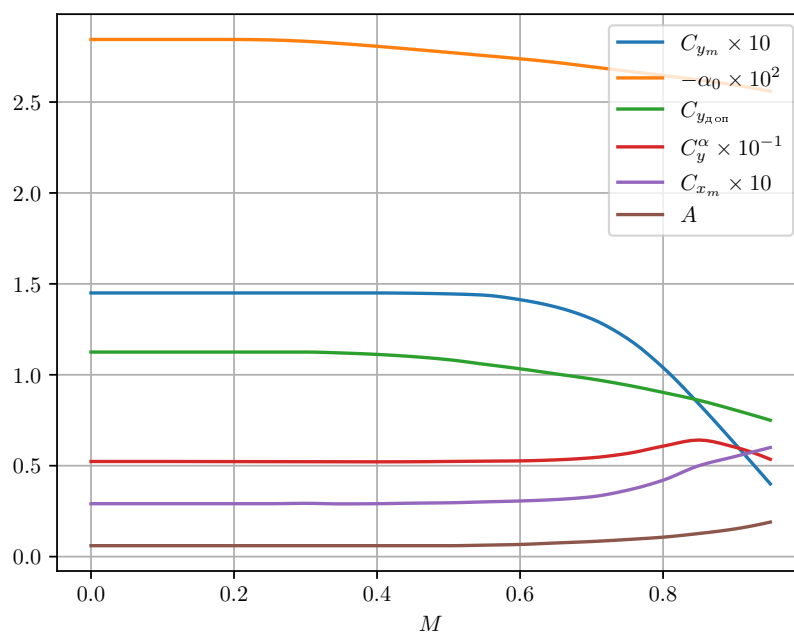


Рисунок 1.2 — Аэродинамические характеристики самолета



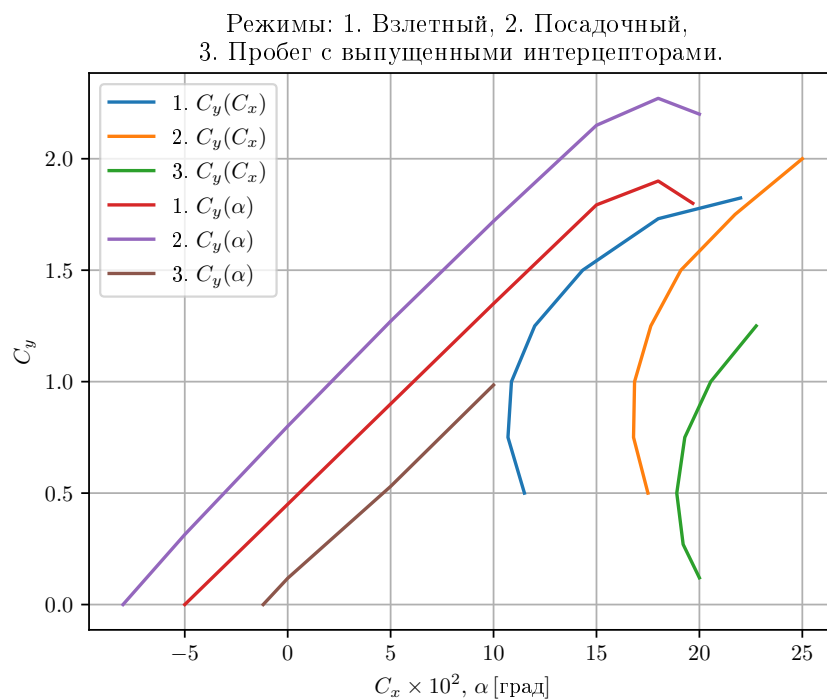


Рисунок 1.3 — Аэродинамические характеристики самолета на взлётно-посадочных режимах

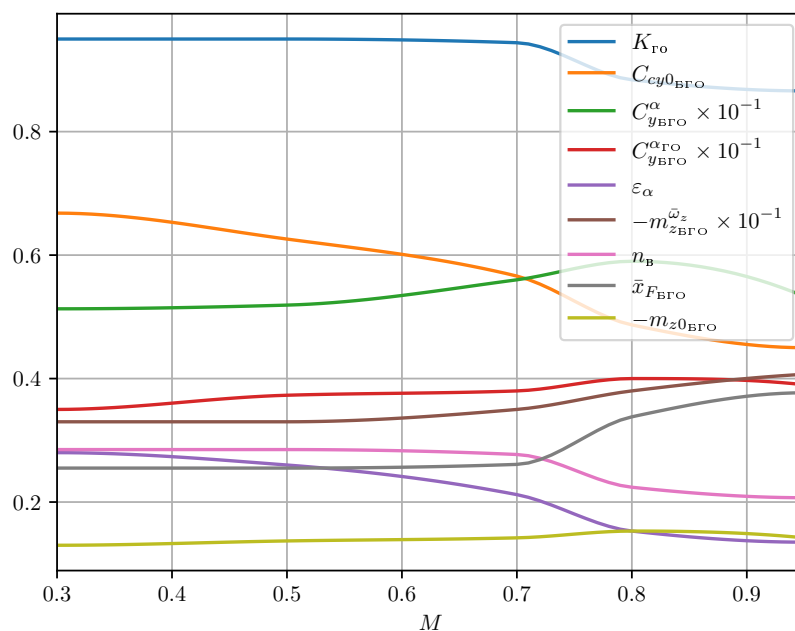


Рисунок 1.4 — Аэродинамические характеристики для отдельных компоновочных групп самолета

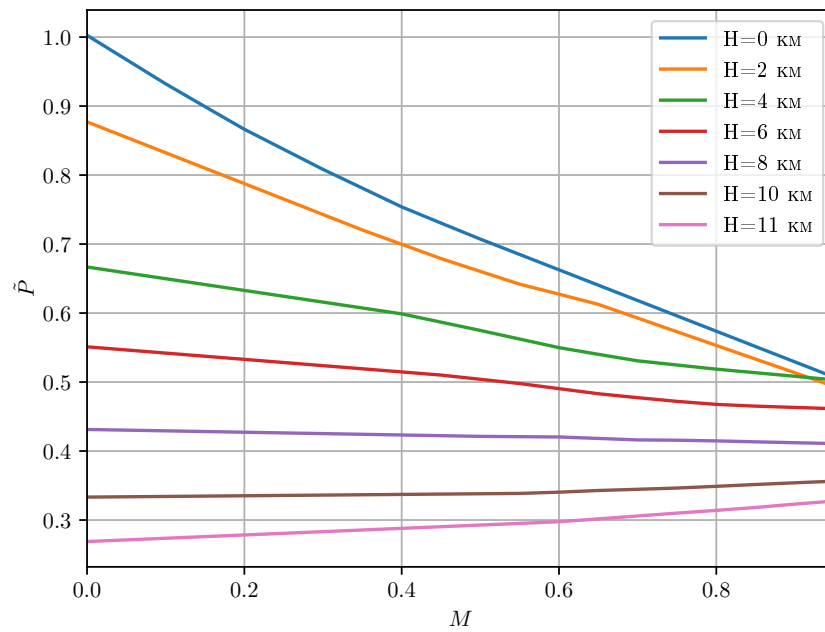


Рисунок 1.5 — Высотно-скоростные характеристики ТРДД на режиме «номинал»

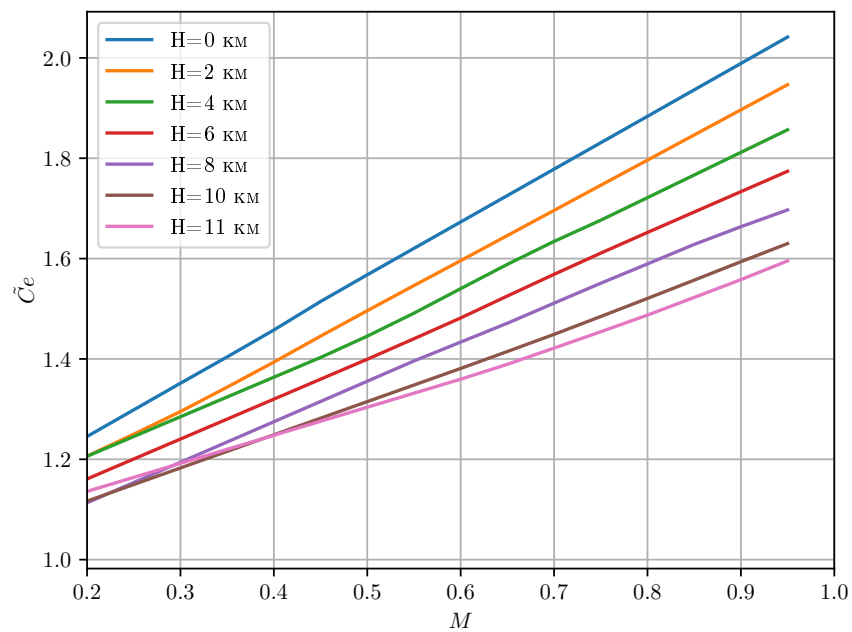


Рисунок 1.6 — Относительный удельный часовой расход топлива для ТРДД на режиме «номинал»

## 1.2. Расчет лётно – технических характеристик самолета

Определим следующие характеристики самолета:

1. Зависимости от числа  $M$  (скорости) и  $H$  (высоты) полета результаты сведем в таблицы 1.2 - 1.8:

- располагаемой и потребной для горизонтального установившегося полета тяги силовой установки,
- энергетической скороподъемности,
- часового расхода топлива,
- километрового расхода топлива.

2. Зависимости от высоты:

- максимальной энергетической скороподъемности,
- минимального часового расхода топлива,
- минимального километрового расхода топлива,
- минимального и максимального числа  $M$  (скорости) полета (с учетом ограничений по безопасности полета),
- числа  $M$  полета, соответствующего минимальной потребной тяги,
- числа  $M$  полета, соответствующего максимальной энергетической скороподъемности,
- скорости полета, соответствующей минимальному часовому расходу топлива,
- скорости полета, соответствующему минимальному километровому расходу топлива.

3. Статический и практический потолки самолета.

Соотношения для расчета: Узловые точки по числу Маха:

$$M = [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.95]$$

$$V = Ma_H, \quad (1.1)$$

где  $a_H$  — скорость звука на высоте  $H$ .

$$q = \frac{\rho_H V^2}{2}, \quad (1.2)$$

где  $\rho_H$  — плотность воздуха на высоте  $H$ .

Коэффициент подъемной силы для крейсерского полета:

$$C_{y_n} = \frac{\bar{m} P_s 10}{q}, \quad (1.3)$$

где  $\bar{m} = 0.95$  — относительная масса самолета,  $P_s$  — удельная нагрузка на крыло.

Коэффициент лобового сопротивления при  $C_y = C_{y_n}$ :

$$C_{x_n}(C_y, M) = C_{x_m}(M) + A(M) [C_{y_n} - C_{y_m}(M)]^2, \quad (1.4)$$

где  $C_{y_m}$  — коэффициент подъемной силы при  $C_x = C_{x_m}$ ,  $C_{x_m}$  — минимальный коэффициент лобового сопротивления,  $A$  — коэффициент отвала поляры.

$$K_n = \frac{C_{y_n}}{C_{x_n}}, \quad (1.5)$$

$$P_n = \frac{\bar{m} m_0 g}{K_n}, \quad (1.6)$$

$$P_p(M, H) = \bar{P}_0 m_0 g \tilde{P}(H, M), \quad (1.7)$$

$$n_x = \Delta \bar{P} = \frac{(P_p - P_n)}{\bar{m} m_0 g}, \quad (1.8)$$

$$V_y^* = \Delta \bar{P} V, \quad (1.9)$$

$$\bar{R} = \frac{P_n}{P_p}, \quad (1.10)$$

$$q_{\text{ч}} = Ce(M, H, \bar{R}) P_n = Ce_0 \tilde{C}e(H, M) \hat{C}e_{\text{др}}(R) P_n, \quad (1.11)$$

$$q_{\text{км}} = \frac{q_{\text{ч}}}{3.6V}, \quad (1.12)$$

где  $K_n$  — аэродинамическое качество,  $P_n$  — потребная тяга двигателя,  $P_p$  — располагаемая тяга двигателя,  $n_x$  — тангенциальная перегрузка,  $V_y^*$  — энергетическая скороподъемность,  $\bar{R}$  — потребное значение коэффициента дросселирования двигателя при крейсерском полете,  $q_{\text{ч}}$  — часовой расход топлива,  $q_{\text{км}}$  — километровый расход топлива.

Результаты для высот от 0 до  $H_{\text{пр}}$  с шагом в 2 км. приведены в таблицах 1.2 - 1.8. Также графическое представление результатов на рисунках 1.7 - 1.34.

Таблица 1.2 — Результаты расчета для высоты  $H = 0$  км

$M$	$V$	$V$	$q$	$C_{y_n}$	$K_n$	$P_n * 10^{-5}$	$P_p * 10^{-5}$	$\Delta \bar{p}(n_x)$	$V_y^*$	$\bar{R}_{кр}$	$q_{ч}$	$q_{км}$
—	$\frac{м}{с}$	$\frac{км}{ч}$	$\frac{H}{м^2}$	—	—	$H$	$H$	—	$\frac{м}{с}$	—	$\frac{кг}{ч}$	$\frac{кг}{км}$
0.10	34	123	709	6.454	2.67	4.887	3.531	-0.099	-3.4	1.38	25512	208.25
0.20	68	245	2837	1.614	10.18	1.282	3.282	0.146	9.9	0.39	8654	35.32
0.30	102	368	6383	0.717	14.65	0.890	3.062	0.158	16.1	0.29	6851	18.64
0.40	136	490	11348	0.403	12.19	1.071	2.856	0.130	17.7	0.37	8500	17.35
0.50	170	613	17732	0.258	8.50	1.535	2.679	0.083	14.2	0.57	12368	20.19
0.60	204	735	25534	0.179	5.84	2.234	2.510	0.020	4.1	0.89	18083	24.60
0.70	238	858	34754	0.132	4.00	3.259	2.342	-0.067	-15.9	1.39	26431	30.82
0.80	272	980	45394	0.101	2.40	5.435	2.173	-0.237	-64.6	2.50	40404	41.23
0.90	306	1103	57451	0.080	1.45	9.013	2.005	-0.510	-156.3	4.50	50959	46.22
0.95	323	1164	64012	0.072	1.19	10.980	1.920	-0.660	-213.3	5.72	48567	41.73

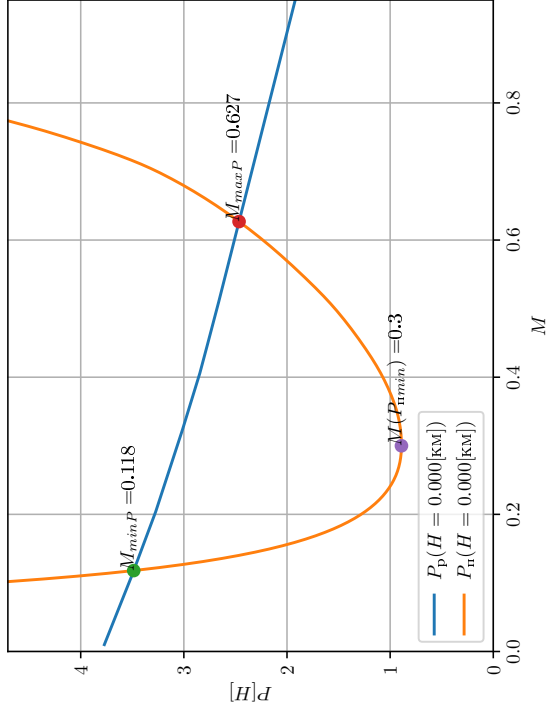


Рисунок 1.7 — График располагаемой и потребной

тяги

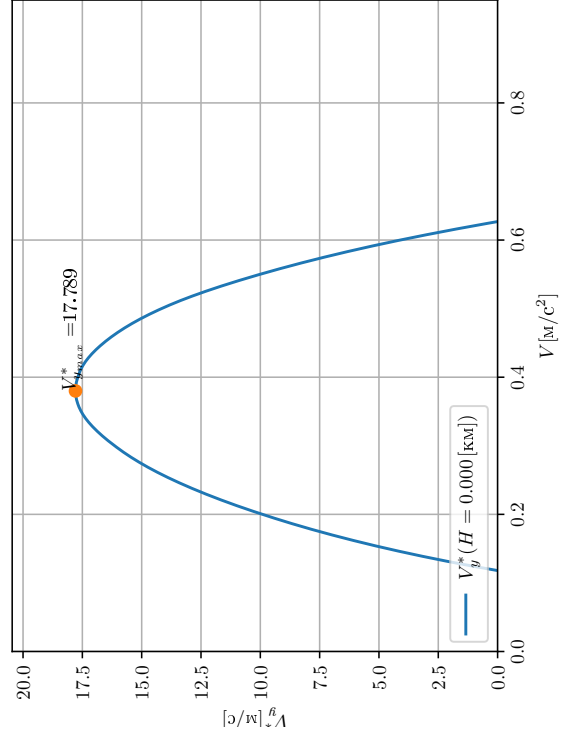


Рисунок 1.9 — График  $V_y^*(M, H)$

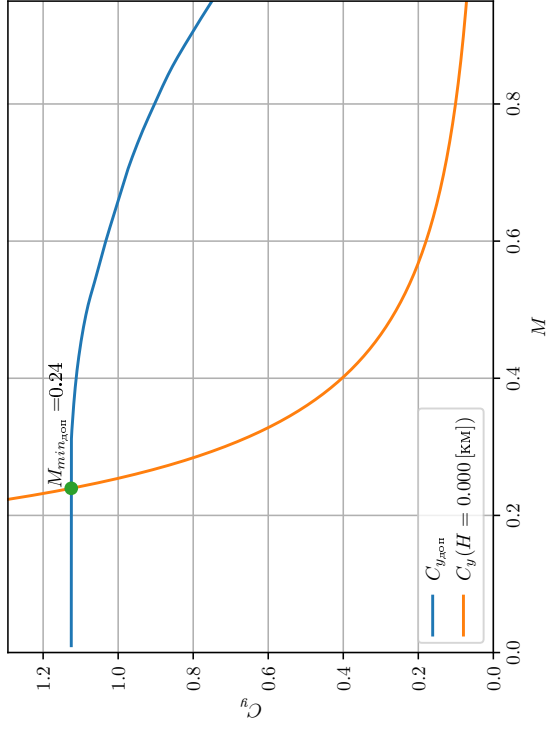


Рисунок 1.8 — График  $C_{y_{\text{доп}}}$ ,  $C_{y_n}$

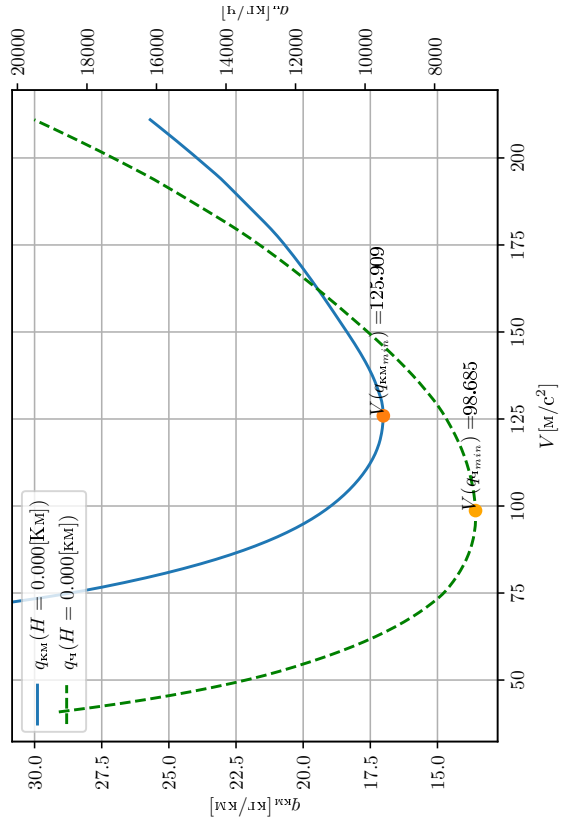


Рисунок 1.10 — График  $q_{\text{kM}}$ ,  $q_n$

Таблица 1.3 — Результаты расчета для высоты  $H = 2$  км

$M$	$V$	$V$	$q$	$C_{y_n}$	$K_n$	$P_n * 10^{-5}$	$P_p * 10^{-5}$	$\Delta \bar{p}(n_x)$	$V_y^*$	$\bar{R}_{кр}$	$q_{ч}$	$q_{км}$
—	$\frac{м}{с}$	$\frac{км}{ч}$	$\frac{H}{м^2}$	—	—	$H$	$H$	—	$\frac{м}{с}$	—	$\frac{кг}{ч}$	$\frac{кг}{км}$
0.10	33	120	557	8.226	2.08	6.261	3.153	-0.226	-7.5	1.99	29631	247.52
0.20	67	239	2226	2.057	8.28	1.576	2.983	0.103	6.8	0.53	9898	41.34
0.30	100	359	5009	0.914	14.11	0.925	2.814	0.138	13.7	0.33	6645	18.50
0.40	133	479	8904	0.514	13.79	0.946	2.650	0.124	16.5	0.36	7216	15.07
0.50	166	599	13913	0.329	10.40	1.255	2.501	0.091	15.1	0.50	9855	16.47
0.60	200	718	20034	0.229	7.35	1.776	2.376	0.044	8.7	0.75	13975	19.46
0.70	233	838	27269	0.168	5.09	2.566	2.245	-0.023	-5.4	1.14	20447	24.40
0.80	266	958	35617	0.129	3.06	4.271	2.095	-0.158	-42.1	2.04	32241	33.67
0.90	299	1077	45077	0.102	1.84	7.096	1.945	-0.375	-112.3	3.65	44571	41.37
0.95	316	1137	50225	0.091	1.51	8.660	1.870	-0.494	-156.2	4.63	46660	41.03



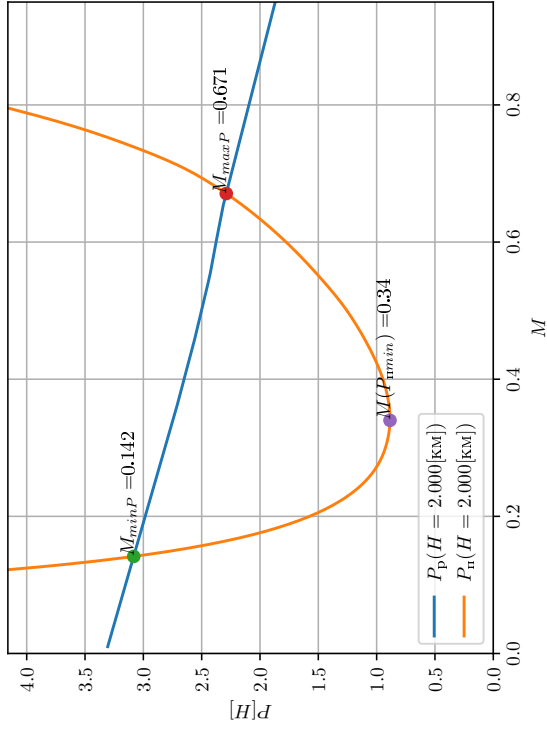


Рисунок 1.11 — График располагаемой и потребляемой тяги

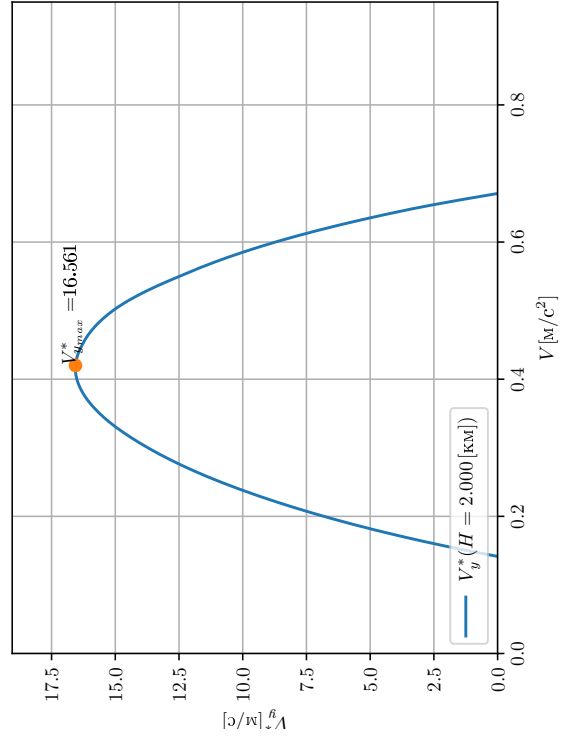


Рисунок 1.13 — График  $V_y^*(M, H)$

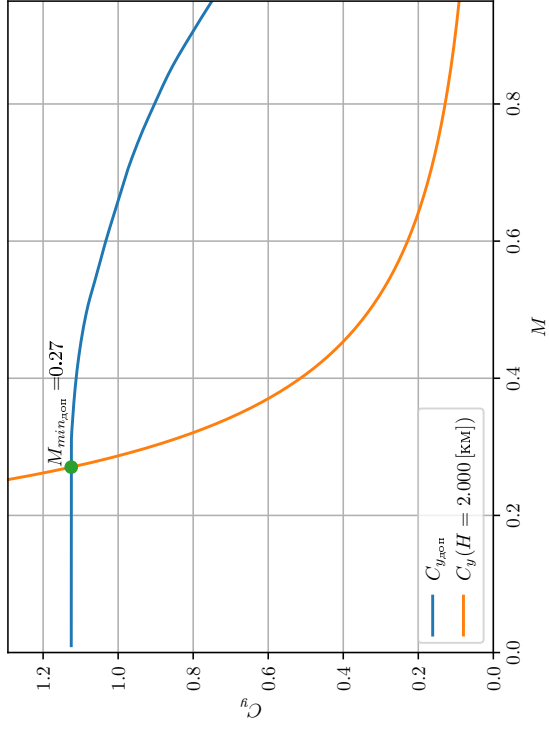


Рисунок 1.12 — График  $C_{y_{\text{доп}}}$ ,  $C_{y_n}$

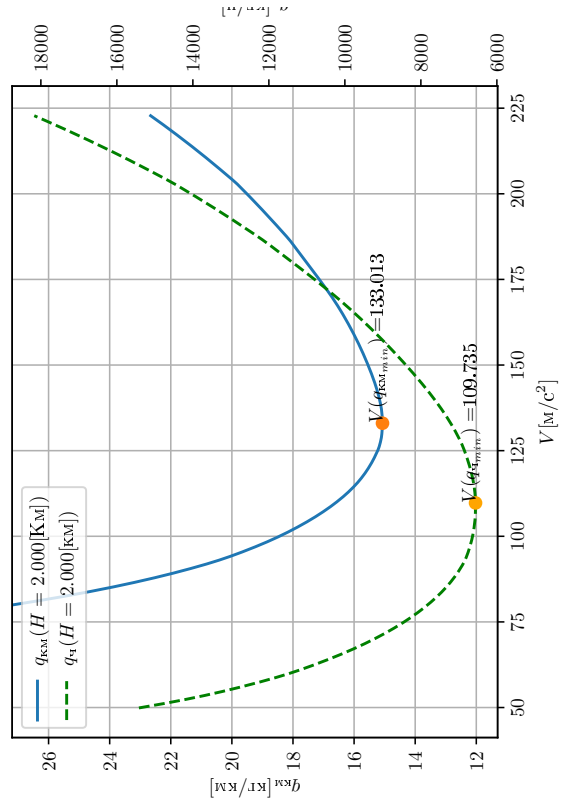


Рисунок 1.14 — График  $q_{\text{км}}$ ,  $q_{\text{ч}}$

Таблица 1.4 — Результаты расчета для высоты  $H = 4$  км

$M$	$V$	$V$	$q$	$C_{y_n}$	$K_n$	$P_n * 10^{-5}$	$P_p * 10^{-5}$	$\Delta \bar{p}(n_x)$	$V_y^*$	$\bar{R}_{кр}$	$q_{ч}$	$q_{км}$
—	$\frac{м}{с}$	$\frac{км}{ч}$	$\frac{H}{м^2}$	—	—	$H$	$H$	—	$\frac{м}{с}$	—	$\frac{кг}{ч}$	$\frac{кг}{км}$
0.10	32	117	432	10.606	1.61	8.113	2.461	-0.412	-13.4	3.30	32076	274.50
0.20	65	234	1726	2.652	6.53	1.998	2.397	0.029	1.9	0.83	11735	50.21
0.30	97	351	3885	1.178	12.62	1.034	2.333	0.095	9.2	0.44	7094	20.24
0.40	130	467	6906	0.663	14.67	0.890	2.268	0.100	13.0	0.39	6573	14.06
0.50	162	584	10791	0.424	12.37	1.055	2.177	0.082	13.3	0.48	8044	13.77
0.60	195	701	15538	0.295	9.16	1.425	2.083	0.048	9.3	0.68	10954	15.62
0.70	227	818	21150	0.216	6.46	2.020	2.010	-0.001	-0.2	1.00	15762	19.27
0.80	260	935	27624	0.166	3.91	3.339	1.965	-0.100	-26.0	1.70	25239	27.00
0.90	292	1052	34961	0.131	2.35	5.552	1.926	-0.264	-77.1	2.88	37573	35.73
0.95	308	1110	38954	0.118	1.92	6.788	1.906	-0.355	-109.6	3.56	42354	38.15

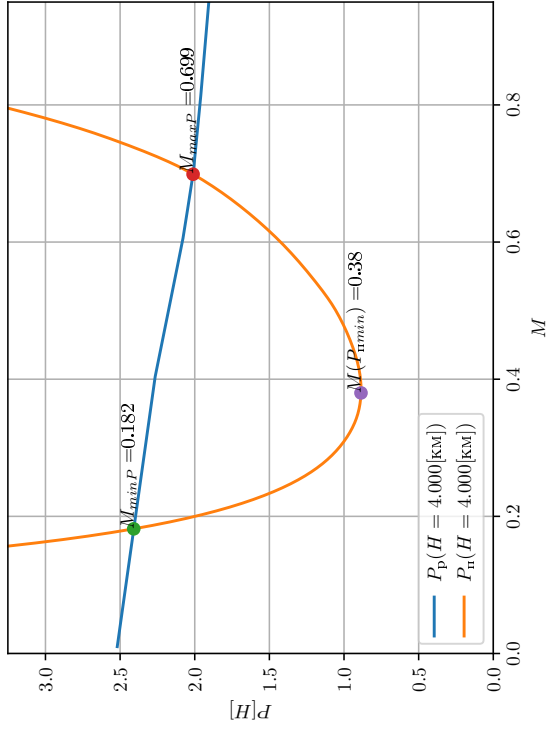


Рисунок 1.15 — График располагаемой и потребляемой тяги

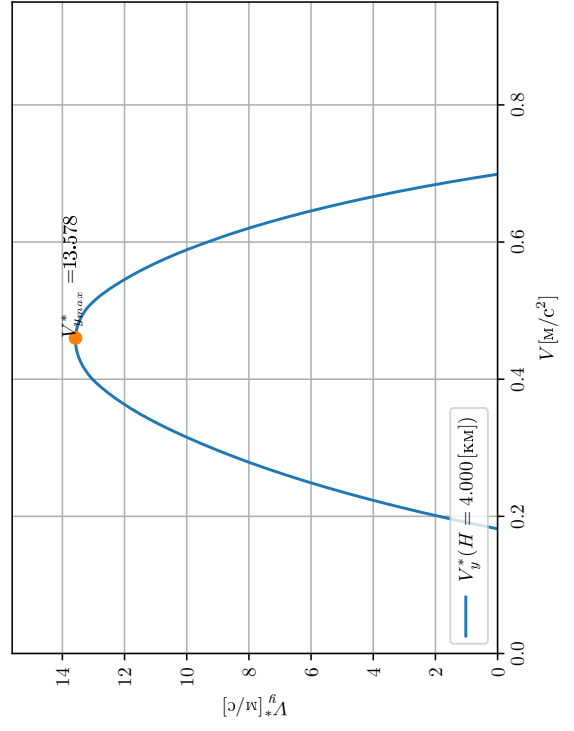


Рисунок 1.17 — График  $V_y^*(M, H)$

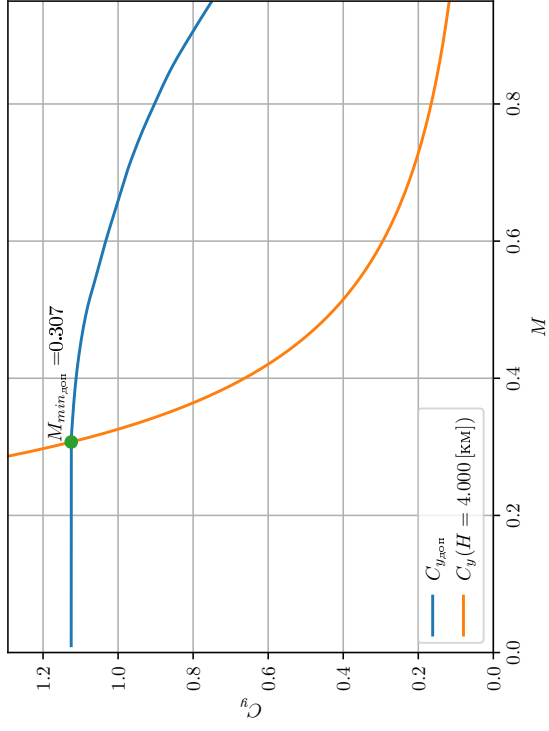


Рисунок 1.16 — График  $C_{y_{\text{доп}}}$ ,  $C_{y_n}$

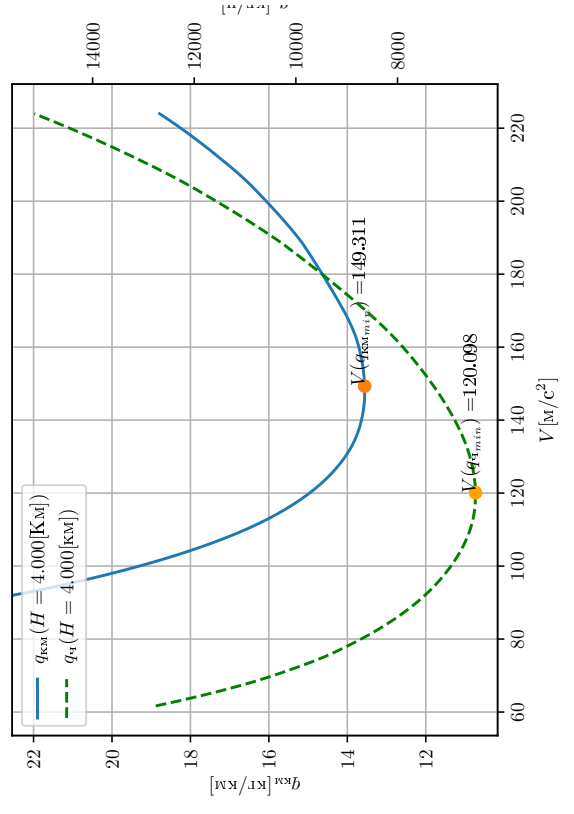


Рисунок 1.18 — График  $q_{\text{кМ}}$ ,  $q_{\text{ч}}$

Таблица 1.5 — Результаты расчета для высоты  $H = 6$  км

$M$	$V$	$V$	$q$	$C_{y_n}$	$K_n$	$P_n * 10^{-5}$	$P_p * 10^{-5}$	$\Delta \bar{p}(n_x)$	$V_y^*$	$\bar{R}_{кр}$	$q_{ч}$	$q_{км}$
—	$\frac{м}{с}$	$\frac{км}{ч}$	$\frac{H}{м^2}$	—	—	$H$	$H$	—	$\frac{м}{с}$	—	$\frac{кг}{ч}$	$\frac{кг}{км}$
0.10	32	114	331	13.851	1.23	10.644	2.053	-0.626	-19.8	5.19	28345	248.81
0.20	63	228	1322	3.463	5.02	2.598	2.018	-0.042	-2.7	1.29	13930	61.14
0.30	95	342	2975	1.539	10.55	1.237	1.984	0.054	5.2	0.62	7765	22.72
0.40	127	456	5288	0.866	14.37	0.908	1.950	0.076	9.6	0.47	6360	13.96
0.50	158	570	8263	0.554	13.97	0.934	1.909	0.071	11.2	0.49	6887	12.09
0.60	190	684	11899	0.385	11.13	1.172	1.858	0.050	9.5	0.63	8771	12.83
0.70	222	797	16196	0.283	8.12	1.607	1.808	0.015	3.2	0.89	12198	15.30
0.80	253	911	21153	0.216	4.99	2.614	1.771	-0.061	-15.5	1.48	19496	21.39
0.90	285	1025	26772	0.171	3.01	4.334	1.755	-0.188	-53.5	2.47	29782	29.05
0.95	301	1082	29830	0.153	2.46	5.309	1.748	-0.259	-78.0	3.04	34381	31.77

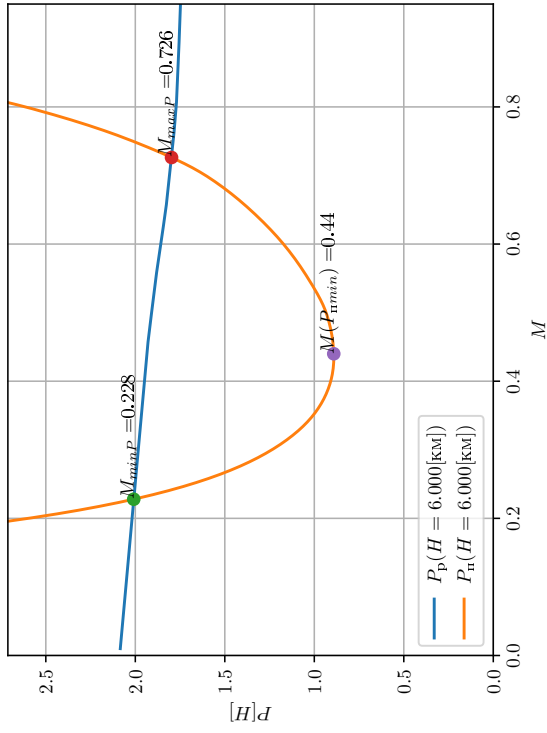


Рисунок 1.19 — График располагаемой и потребляемой тяги

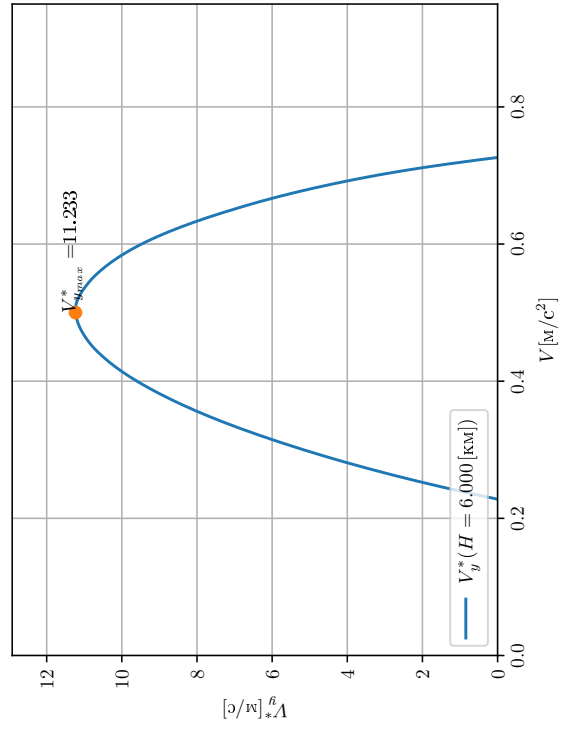


Рисунок 1.21 — График  $V_y^*(M, H)$

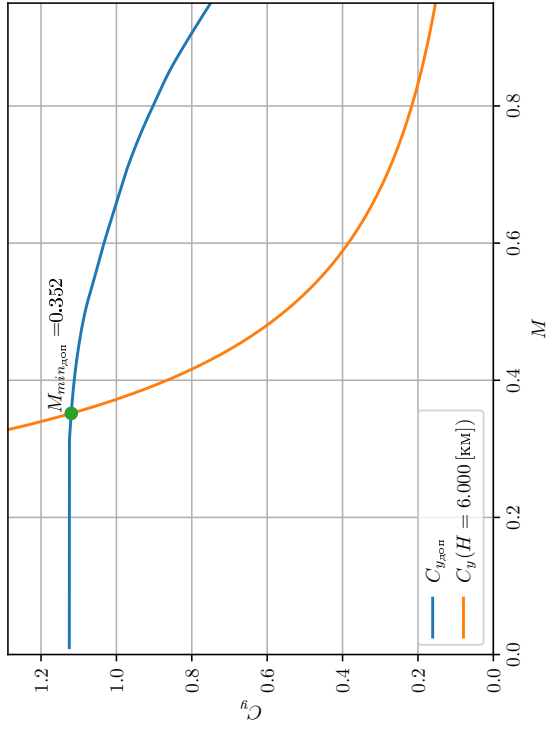


Рисунок 1.20 — График  $C_{y_{\text{доп}}}$ ,  $C_{y_n}$

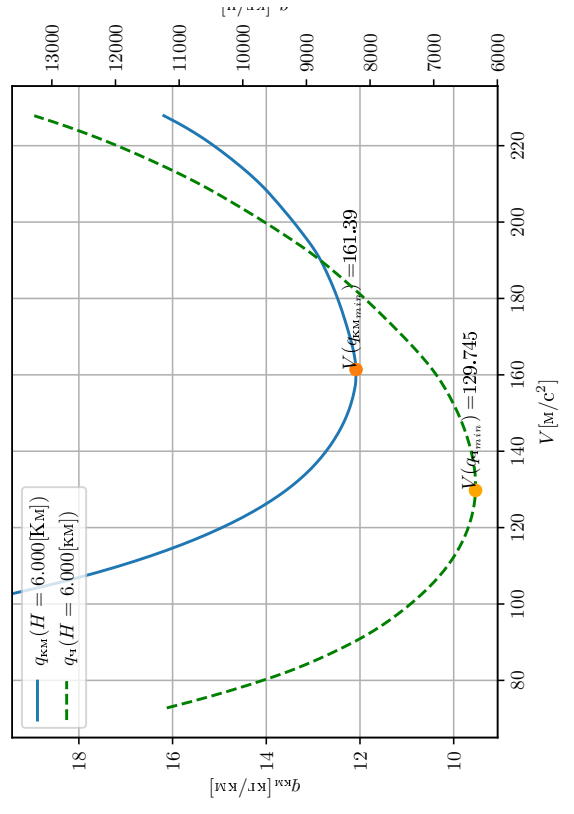


Рисунок 1.22 — График  $q_{\text{кв}}$ ,  $q_{\text{ч}}$

Таблица 1.6 — Результаты расчета для высоты  $H = 8$  км

$M$	$V$	$V$	$q$	$C_{y_n}$	$K_n$	$P_n * 10^{-5}$	$P_p * 10^{-5}$	$\Delta \bar{p}(n_x)$	$V_y^*$	$\bar{R}_{кр}$	$q_{ч}$	$q_{км}$
—	$\frac{м}{с}$	$\frac{км}{ч}$	$\frac{H}{м^2}$	—	—	$H$	$H$	—	$\frac{м}{с}$	—	$\frac{кг}{ч}$	$\frac{кг}{км}$
0.10	31	111	250	18.344	0.92	14.155	1.626	-0.912	-28.1	8.71	7548	68.05
0.20	62	222	998	4.586	3.78	3.449	1.618	-0.133	-8.2	2.13	15946	71.88
0.30	92	333	2246	2.038	8.34	1.564	1.611	0.003	0.3	0.97	8954	26.91
0.40	123	444	3993	1.147	12.84	1.016	1.603	0.043	5.3	0.63	6535	14.73
0.50	154	555	6239	0.734	14.55	0.897	1.596	0.051	7.8	0.56	6268	11.30
0.60	185	666	8984	0.510	12.84	1.016	1.592	0.042	7.8	0.64	7340	11.03
0.70	216	776	12228	0.374	9.90	1.318	1.576	0.019	4.1	0.84	9698	12.49
0.80	246	887	15972	0.287	6.29	2.075	1.571	-0.037	-9.0	1.32	15169	17.10
0.90	277	998	20214	0.226	3.83	3.405	1.561	-0.134	-37.2	2.18	23359	23.40
0.95	293	1054	22523	0.203	3.12	4.176	1.556	-0.191	-55.8	2.68	27261	25.87

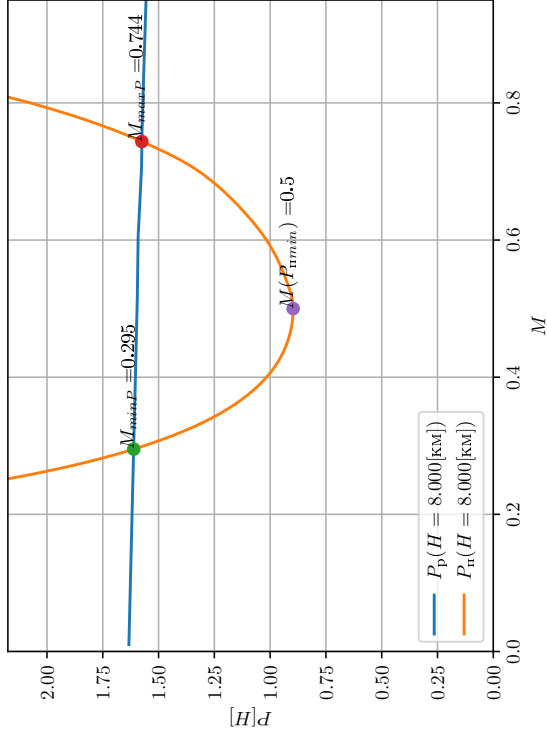


Рисунок 1.23 — График располагаемой и потребляемой тяги

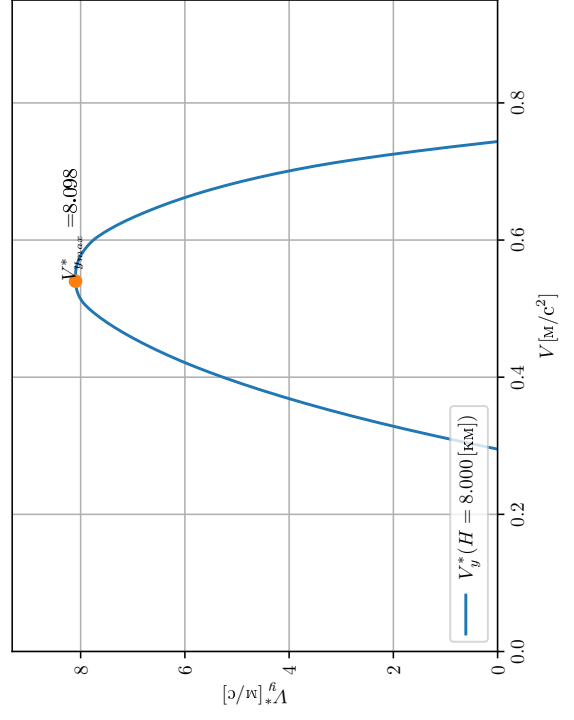


Рисунок 1.25 — График  $V_y^*(M, H)$

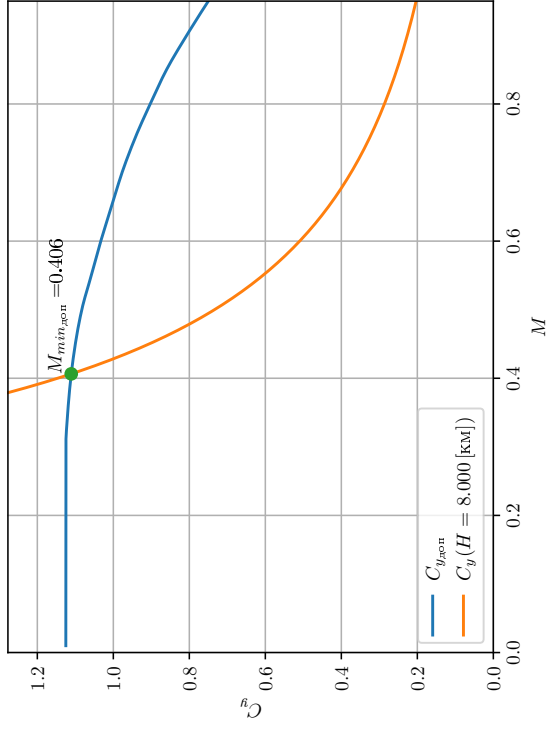


Рисунок 1.24 — График  $C_{y_{доп}}$ ,  $C_{y_n}$

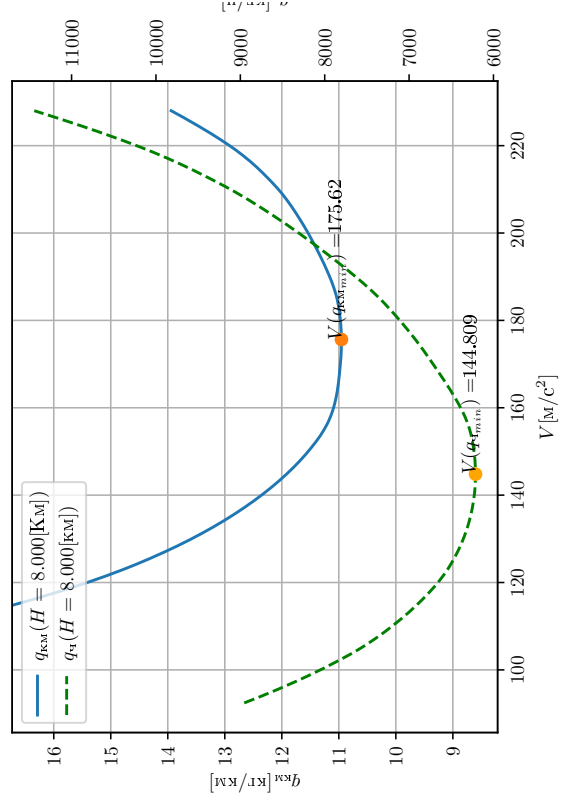


Рисунок 1.26 — График  $q_{км}$ ,  $q_{ч}$

Таблица 1.7 — Результаты расчета для высоты  $H = 10$  км

$M$	$V$	$V$	$q$	$C_{y_n}$	$K_n$	$P_n * 10^{-5}$	$P_p * 10^{-5}$	$\Delta \bar{p}(n_x)$	$V_y^*$	$\bar{R}_{кр}$	$q_{ч}$	$q_{км}$
—	$\frac{м}{с}$	$\frac{км}{ч}$	$\frac{H}{м^2}$	—	—	$H$	$H$	—	$\frac{м}{с}$	—	$\frac{кг}{ч}$	$\frac{кг}{км}$
0.10	30	108	185	24.679	0.68	19.109	1.266	-1.299	-38.9	15.09	-60549	-561.51
0.20	60	216	742	6.170	2.80	4.667	1.270	-0.247	-14.8	3.68	17187	79.70
0.30	90	323	1669	2.742	6.32	2.065	1.273	-0.058	-5.2	1.62	10829	33.48
0.40	120	431	2968	1.542	10.55	1.237	1.277	0.003	0.3	0.97	7409	17.18
0.50	150	539	4637	0.987	13.67	0.954	1.281	0.024	3.6	0.75	6189	11.48
0.60	180	647	6678	0.686	13.59	0.960	1.289	0.024	4.3	0.74	6540	10.11
0.70	210	755	9089	0.504	11.33	1.151	1.305	0.011	2.3	0.88	8078	10.70
0.80	240	863	11872	0.386	7.64	1.708	1.321	-0.028	-6.8	1.29	11992	13.90
0.90	270	970	15025	0.305	4.77	2.738	1.341	-0.102	-27.4	2.04	18333	18.89
0.95	285	1024	16741	0.273	3.89	3.357	1.350	-0.146	-41.6	2.49	21642	21.13



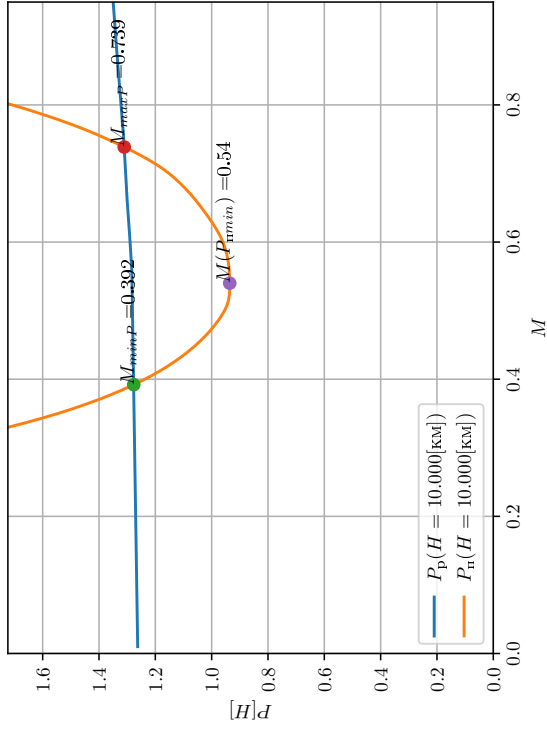


Рисунок 1.27 — График располагаемой и потребляемой тяги

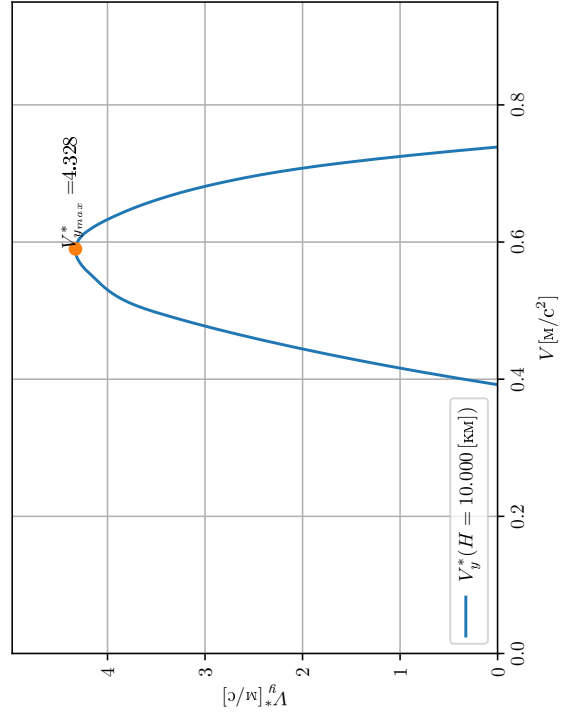


Рисунок 1.29 — График  $V_y^*(M, H)$

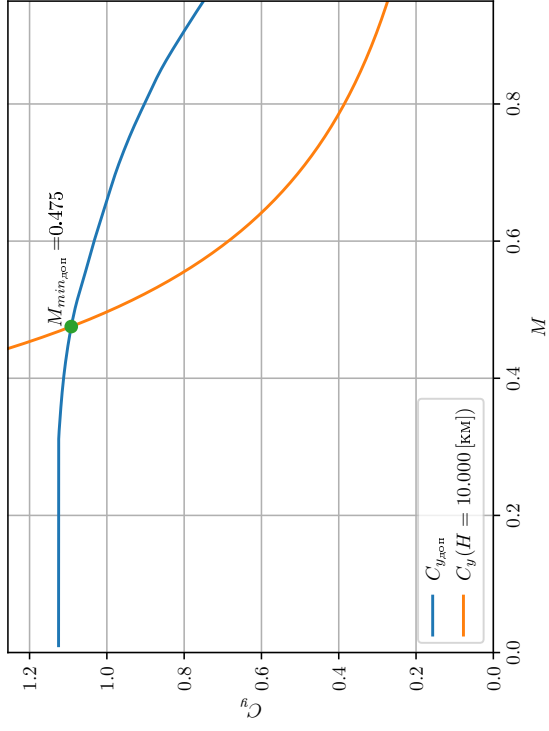


Рисунок 1.28 — График  $C_{y_{доп}}$ ,  $C_{y_n}$

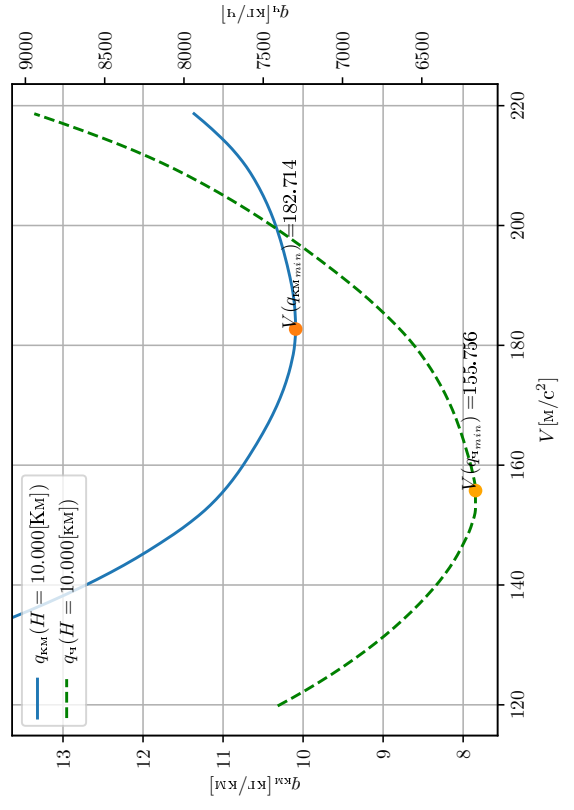


Рисунок 1.30 — График  $q_{км}$ ,  $q_ч$

Таблица 1.8 — Результаты расчета для высоты  $H = 11.880$  км

$M$	$V$	$V$	$q$	$C_{y_n}$	$K_n$	$P_n * 10^{-5}$	$P_p * 10^{-5}$	$\Delta \bar{p}(n_x)$	$V_y^*$	$\bar{R}_{кр}$	$q_{ч}$	$q_{км}$
—	$\frac{м}{с}$	$\frac{км}{ч}$	$\frac{H}{м^2}$	—	—	$H$	$H$	—	$\frac{м}{с}$	—	$\frac{кг}{ч}$	$\frac{кг}{км}$
0.10	30	106	138	33.082	0.51	25.683	0.968	-1.800	-53.1	26.52	-247989	-2334.57
0.20	59	212	554	8.271	2.07	6.295	0.984	-0.387	-22.8	6.40	12295	57.87
0.30	89	319	1245	3.676	4.73	2.759	1.000	-0.128	-11.3	2.76	11989	37.62
0.40	118	425	2214	2.068	8.24	1.583	1.016	-0.041	-4.9	1.56	8458	19.91
0.50	148	531	3460	1.323	11.71	1.114	1.032	-0.006	-0.9	1.08	6586	12.40
0.60	177	637	4982	0.919	12.92	1.010	1.048	0.003	0.5	0.96	6408	10.05
0.70	207	744	6781	0.675	11.74	1.111	1.075	-0.003	-0.5	1.03	7308	9.83
0.80	236	850	8856	0.517	8.58	1.521	1.102	-0.031	-7.2	1.38	9899	11.65
0.90	266	956	11209	0.408	5.58	2.339	1.132	-0.088	-23.3	2.07	14621	15.29
0.95	280	1009	12489	0.367	4.57	2.857	1.147	-0.125	-34.9	2.49	17261	17.11

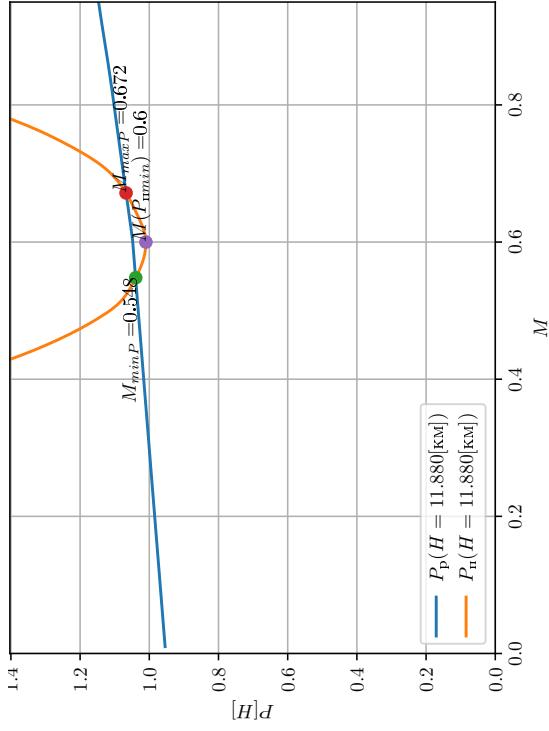


Рисунок 1.31 — График располагаемой и потреб-  
ной тяги

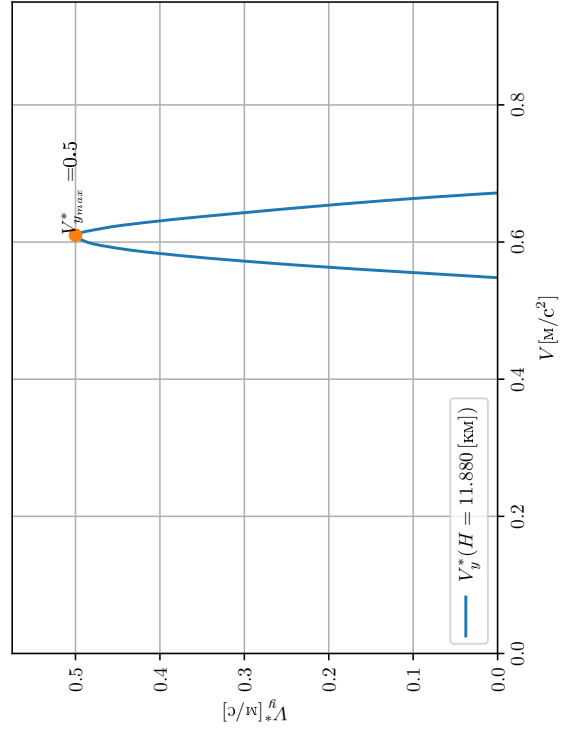


Рисунок 1.33 — График  $V_y^*(M, H)$

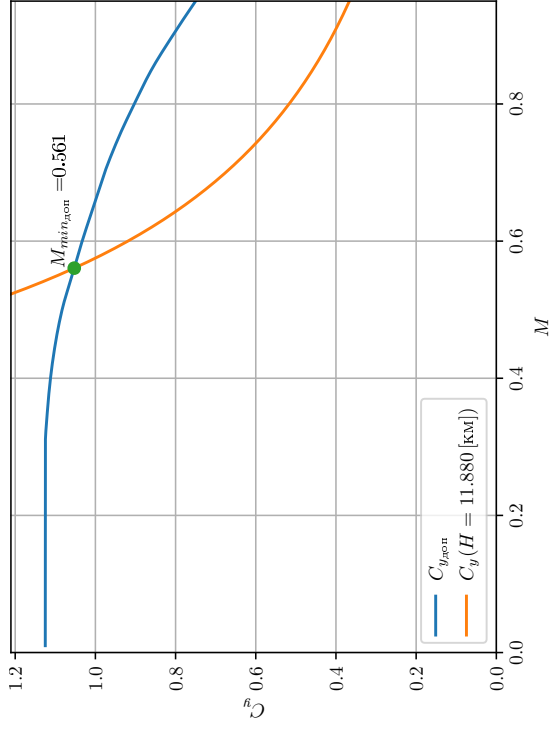


Рисунок 1.32 — График  $C_{y_{\text{доп}}}$ ,  $C_{y_n}$

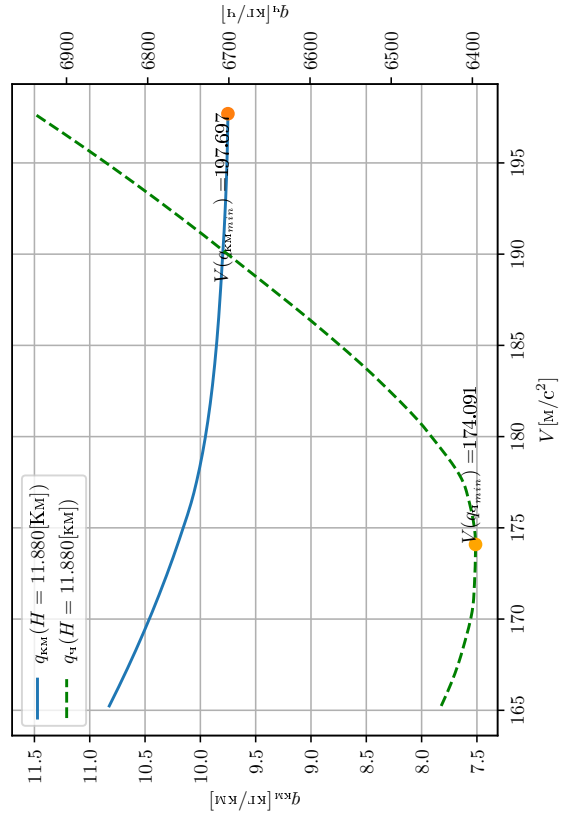


Рисунок 1.34 — График  $q_{\text{кв}}$ ,  $q_{\text{ч}}$

Для построение таблицы 1.9 для узловых высот:

$$H = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 11.56 \text{ км},$$

где значение 11.56 км соответствует практическому потолку  $H_{\text{пр}}$ .

1. Определим  $M_{\min_P}$  и  $M_{\max_P}$ , как точка пересечения графиков  $P_n(M, H_i)$  и  $P_p(M, H_i)$  (рисунки 1.7, 1.11, 1.15, 1.19, 1.23, 1.27, 1.31).
2. Минимально допустимое число  $M_{\min_{\text{доп}}}$ , как точка пересечения графиков  $C_{y_n}(M, H_i)$  и  $C_{y_{\text{доп}}}(M)$  (рисунки 1.8, 1.12, 1.16, 1.24, 1.28, 1.32).
3. Максимально допустимое число  $M$  полета по условиям безопасности определяется как:

$$M_{\max_{\text{доп}}} = \min \{ M_{\text{пред}}, M(V_{i_{\max}}) \},$$

где  $M(V_{i_{\max}}) = \frac{V_{i_{\max}} \sqrt{\Delta^{-1}}}{3.6 a_H}$ ,  $\sqrt{\Delta^{-1}} = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_H}}$ ,  $V_{i_{\max}} = 650 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$  — максимальная допустимая индикаторная скорость.

4. Располагаемые значение минимального и максимального числа  $M$  определяются как:

$$M_{\min} = \max \{ M_{\min_{\text{доп}}}, M_{\min_P} \},$$

$$M_{\max} = \min \{ M_{\max_{\text{доп}}}, M_{\max_P}, M_{\text{пред}} \}.$$

5. Число  $M_1$  полета, соответствующее минимальной потребной тяге определяется как:

$$M_1 = M(P_{n_{\min}}) = \arg \min_M \Delta P_n(M).$$

6. Число  $M_2$  полета, соответствующее максимальной энергетической скороподъёмности определяется как:

$$M_2 = M(V_{y_{\max}}^*) = \arg \max_M V_y^*(M, H_i).$$

7. Минимальные значения часового  $q_{ч_{min}}$  и километрового  $q_{км_{min}}$  расхода топлива, и соответствующие им скорости полета определены на рисунках 1.10, 1.14, 1.18, 1.22, 1.26, 1.30, 1.34 или как:

$$q_{ч_{min}} = \min_V q_{ч}(V, H_i), V_3 = V(q_{ч_{min}}) = \arg \min_V q_{ч}(V, H_i);$$

$$q_{км_{min}} = \min_V q_{км}(V, H_i), V_4 = V(q_{км_{min}}) = \arg \min_V q_{км}(V, H_i).$$

Результаты расчетов приведены в таблице 1.9, также графически представлены на рисунках 1.35, 1.37.

Статические и практический потолок определен на рисунке 1.36, как:

$$H_{ст} = H_i(V_{y_{max}}^* = 0),$$

$$H_{пр} = H_i(V_{y_{max}}^* = V_{y_{доп}}^*).$$

где значение  $V_{y_{доп}}^* = 0.5 \frac{м}{с}$  — минимально-допустимая энергетическая скороподъемность для неменевренного самолета.

Таблица 1.9 — Результаты для построение графика высот и скоростей

$H$	$V_{y_{max}}^*$	$M[V]_{\min \text{ доп}}$	$M[V]_{\max \text{ доп}}$	$M[V]_{\min}$	$M[V]_{\max}$	$M_1[V_1]$ ( $P_{\Pi \min}$ )	$M_2[V_2]$ ( $V_{y_{max}}^*$ )	$V_3$ ( $q_{\text{км}\min}$ )	$V_4$ ( $q_{\text{км}\min}$ )	$M_4$	$q_{\text{ч}\min}$	$q_{\text{км}\min}$
КМ	$\frac{\text{М}}{\text{с}}$	$-\left[\frac{\text{КМ}}{\text{ч}}\right]$	$-\left[\frac{\text{КМ}}{\text{ч}}\right]$	$-\left[\frac{\text{КМ}}{\text{ч}}\right]$	$-\left[\frac{\text{КМ}}{\text{ч}}\right]$	$-\left[\frac{\text{КМ}}{\text{ч}}\right]$	$-\left[\frac{\text{КМ}}{\text{ч}}\right]$	$\frac{\text{КМ}}{\text{ч}}$	$\frac{\text{КМ}}{\text{ч}}$	—	$\frac{\text{КТ}}{\text{ч}}$	$\frac{\text{КТ}}{\text{КМ}}$
0.0	17.79	0.240 [293]	0.612 [750]	0.240 [293]	0.612 [750]	0.300 [368]	0.380 [466]	355	453	0.370	6822.21	17.02
2.0	16.56	0.270 [324]	0.675 [808]	0.270 [324]	0.671 [803]	0.340 [407]	0.420 [503]	395	479	0.400	6561.6	15.07
4.0	13.58	0.307 [359]	0.748 [874]	0.307 [359]	0.699 [817]	0.380 [444]	0.460 [538]	432	538	0.460	6464.88	13.56
6.0	11.23	0.352 [401]	0.800 [911]	0.352 [401]	0.726 [827]	0.440 [501]	0.500 [570]	467	581	0.510	6342.81	12.08
8.0	8.1	0.406 [451]	0.800 [887]	0.406 [451]	0.744 [825]	0.500 [555]	0.540 [599]	521	632	0.570	6212.43	10.95
10.0	4.33	0.475 [513]	0.800 [863]	0.475 [513]	0.739 [796]	0.540 [582]	0.590 [636]	561	658	0.610	6161.04	10.09
11.56	0.5	0.544 [578]	0.800 [850]	0.544 [578]	0.664 [705]	-	-	-	-	-	-	-

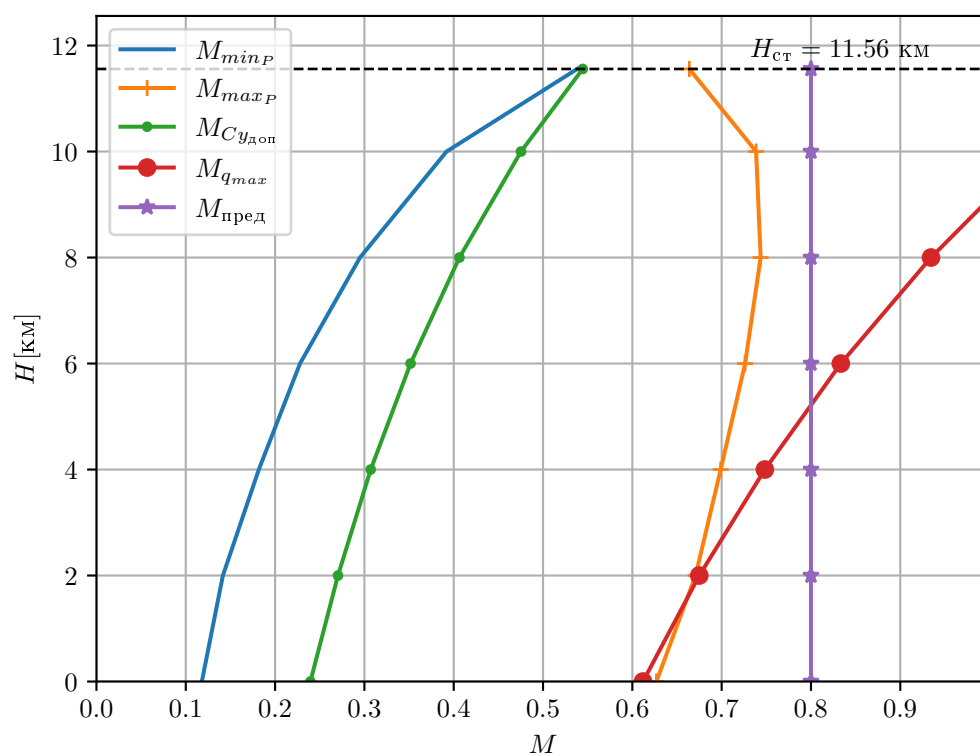


Рисунок 1.35 — График области высот и скоростей установившегося горизонтального полета

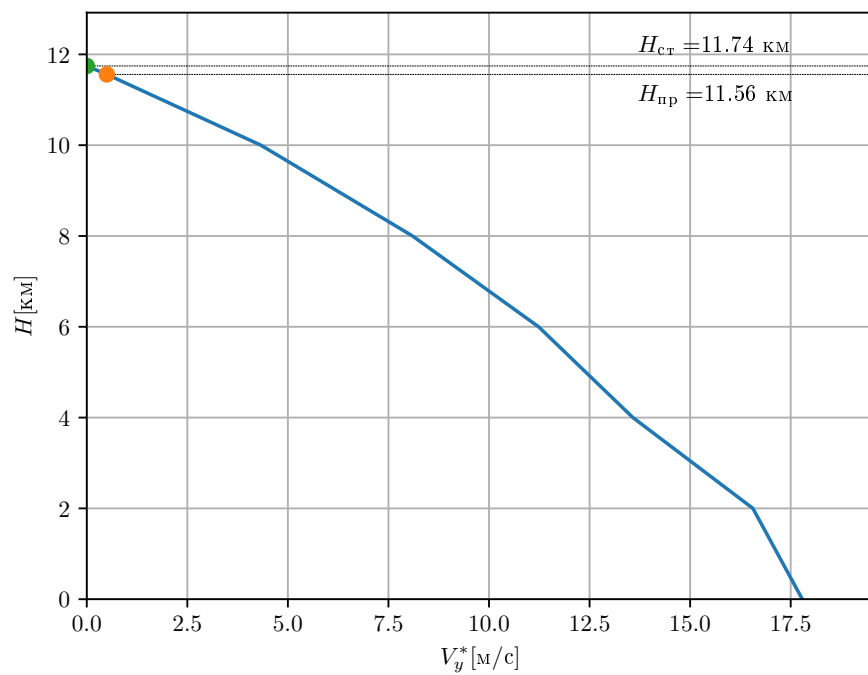


Рисунок 1.36 — График  $V_{y_{max}}^*(H)$

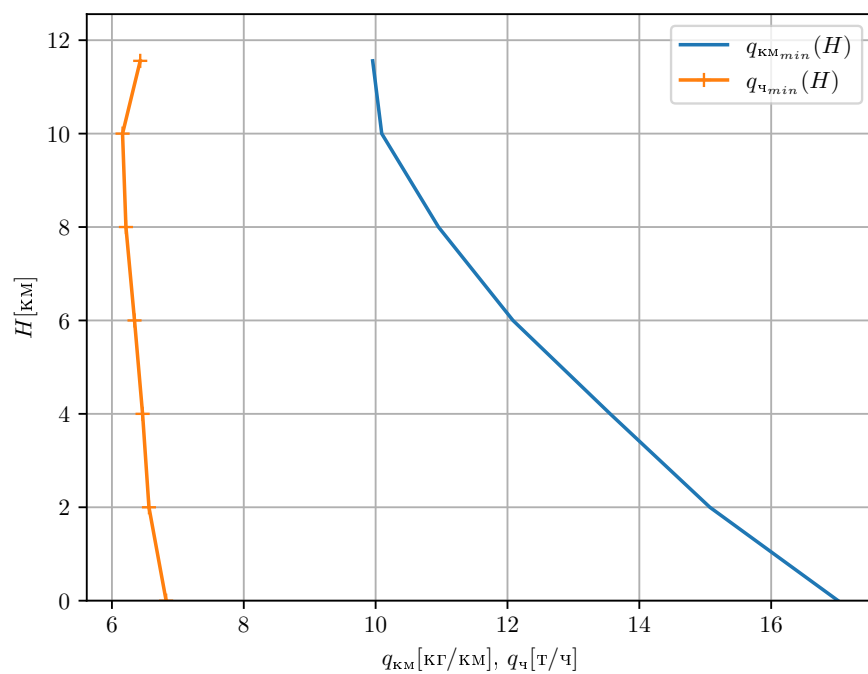


Рисунок 1.37 — График  $q_{ч_{min}}(H), q_{км_{min}}(H)$



### 1.3. Расчет траектории полета

#### 1.3.1. Расчет характеристик набора высоты

Начальные условия:

$$H_0 = 0; M_0 = 1.2M_{\min_{\text{доп}}}, V_0 = 1.2V_{\min_{\text{доп}}}.$$

Конечные условия:

$$(H_k, M_k) = \arg \min_{H, M} q_{\text{км}}(M, H).$$

Конечная высота принимается равная  $H_k = 10$  км из условия минимума  $q_{\text{км}}$  без учета значения  $H_{\text{пр}}$ .

При расчете угла наклона траектории  $\theta_{\text{наб}}$  и вертикальной скорости  $V_{y_{\text{наб}}}$  производная вычисляется по приближенной формуле:

$$\frac{dV}{dH} = \frac{V^{i+1} - V^i}{H^{i+1} - H^i} \quad (1.13)$$

где  $i$  — индекс узловой точки.

Основные характеристики в наборе определяются по формулам:

$$\theta_{\text{наб}} = 57.3n_x\kappa, \quad [\text{град}] \quad (1.14)$$

$$V_{y_{\text{наб}}} = V_{y_{\text{max}}}^* \kappa, \quad \left[\frac{\text{м}}{\text{с}}\right] \quad (1.15)$$

$$L_{\text{наб}} = \int_0^{H_k} \frac{1}{1000n_x(M, H)} dH_{\text{э}} \quad [\text{км}] \quad (1.16)$$

$$t_{\text{наб}} = \int_0^{H_k} \frac{1}{60V_y^*(M, H)} dH_{\text{э}} \quad [\text{мин}] \quad (1.17)$$

$$m_{T_{\text{наб}}} = \int_0^{H_k} \frac{Ce(M, H)P_p(M, H)}{3600n_x(M, H)} dH_{\text{э}} \quad [\text{кг}] \quad (1.18)$$

$$\text{где } \kappa = \frac{1}{1 + \frac{V}{g} \frac{dV}{dH}}.$$

Вычисление интегралов 1.16 - 1.18 производится методом трапеций, тогда уравнения 1.16 - 1.18 будут иметь вид:

$$L_{\text{наб}} = \sum \left( \frac{1}{n_x} \right)_{\text{ср}} \frac{\Delta H_{\text{э}}}{1000}, \quad [\text{км}] \quad (1.19)$$

$$t_{\text{наб}} = \sum \left( \frac{1}{V_y^*} \right)_{\text{ср}} \frac{\Delta H_{\text{э}}}{60}, \quad [\text{мин}] \quad (1.20)$$

$$m_{T_{\text{наб}}} = \sum \left( \frac{CeP}{V_y^*} \right)_{\text{ср}} \frac{\Delta H_{\text{э}}}{3600}, \quad [\text{кг}] \quad (1.21)$$

где  $\Delta H_{\text{э}} = H_{\text{э}}^{i+1}(V_{\text{наб}}^{i+1}, H^{i+1}) - H_{\text{э}}^i(V_{\text{наб}}^i, H^i)$ ,  $H_{\text{э}}^i = H^i + \frac{(V^i)^2}{2g}$  — энергетическая высота в узловой точке,  $V^i$  — скорость соответствующая  $V_{y_{\text{max}}}^*(H^i)$  при наборе высоты.

$$\left( \frac{1}{n_x} \right)_{\text{ср}} = 0.5 \left[ \frac{1}{n_x(H_{\text{э}}^i)} + \frac{1}{n_x(H_{\text{э}}^{i+1})} \right], \quad (1.22)$$

$$\left( \frac{1}{V_y^*} \right)_{\text{ср}} = 0.5 \left[ \frac{1}{V_y^*(H_{\text{э}}^i)} + \frac{1}{V_y^*(H_{\text{э}}^{i+1})} \right], \quad (1.23)$$

$$\left( \frac{CeP}{V_y^*} \right)_{\text{ср}} = 0.5 \left[ \frac{CeP}{V_y^*(H_{\text{э}}^i)} + \frac{CeP}{V_y^*(H_{\text{э}}^{i+1})} \right]. \quad (1.24)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 1.11. Основные параметры наборы представлены в таблице 1.10. Также результаты сведены в графики на рисунках 1.38 - 1.40.

Таблица 1.10 — Основные параметры в наборе высоты

$m_{T_{\text{наб}}}$	$L_{\text{наб}}$	$t_{\text{наб}}$
кг	км	мин
3830.5	175.7	18.3

Таблица 1.11 — Результаты расчета набора высоты

$H_{\text{узел}}$	$M_{\text{наб}}$	$V$	$V_{\text{км}}$	$\frac{\Delta V}{\Delta H}$	$n_x$	$V_y^*$	$\theta$	$V_{y\text{наб}}$	$H_y$	$\Delta H_y$	$n_{x\text{ср}}$	$\frac{\Delta H_y}{1000n_x}$
М	-	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\frac{\text{км}}{\text{ч}}$	$\frac{1}{\text{с}}$	-	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	град.	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	М	М	-	КМ
0.0	0.29	97.8	352.1	0.021	0.16	17.8	7.6	14.7	488.0	2507.0	0.136	15.69
2.0	0.42	139.7	502.8	0.005	0.119	16.6	6.4	15.5	2994.0	2142.0	0.103	18.07
4.0	0.46	149.3	537.5	0.004	0.091	13.6	4.9	12.7	5136.0	2140.0	0.08	23.53
6.0	0.5	158.2	569.6	0.004	0.071	11.2	3.8	10.5	7276.0	2135.0	0.058	30.07
8.0	0.54	166.4	599.0	0.008	0.049	8.1	2.4	7.1	9411.0	2291.0	0.032	47.06
10.0	0.61	182.7	657.8	0.0	0.023	4.3	1.3	4.3	11702.0	-	-	-

Таблица 1.11 — (Продолжение) Результаты расчета набора высоты

$P$	$\frac{CeP}{V_y^*}$	$(\frac{CeP}{V_y^*})_{\text{ср}}$	$\frac{\Delta H_y}{3600} (\frac{CeP}{V_y^*})_{\text{ср}}$	$L_{\text{наб}}$	$V_{y\text{ср}}^*$	$t_{\text{наб}}$	$Ce$
$H$	-	-	КГ	КМ	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	МИН	$\frac{\text{кг}}{\text{Нч}}$
308927.0	1339.9	1087.7	757.4	18.4	0.1	2.44	0.064
261897.0	1140.2	1082.3	644.0	20.8	0.1	2.39	0.067
221372.0	1172.1	1116.1	663.4	26.8	0.1	2.9	0.067
190906.0	1209.1	1218.9	722.9	37.0	0.1	3.78	0.067
159439.0	1483.9	1639.1	1042.9	72.7	0.2	6.77	0.066
129122.0	1974.9	-	-	-	-	-	0.066

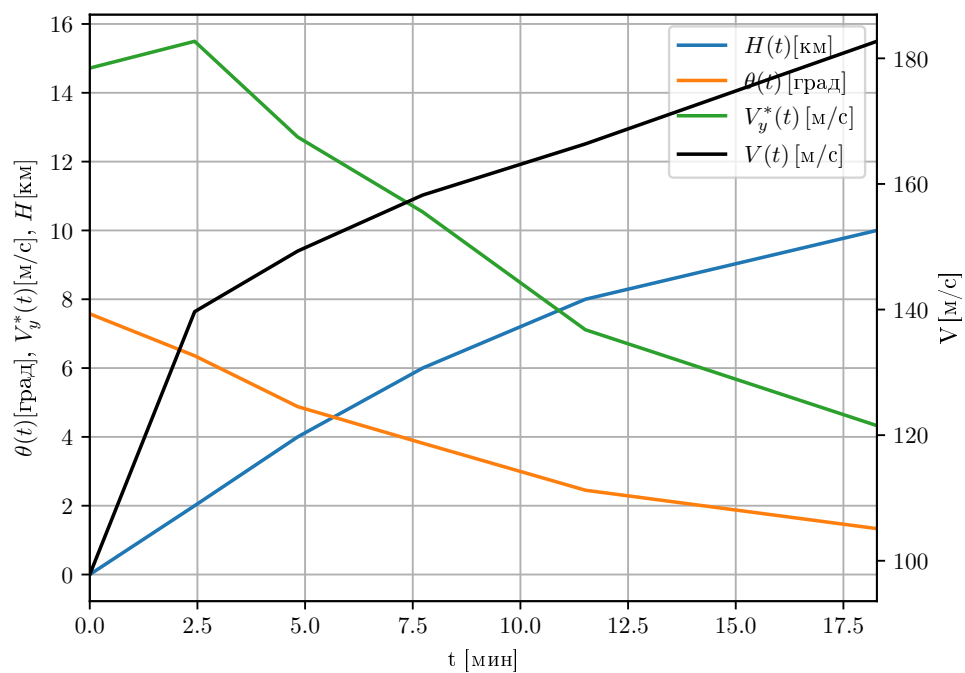


Рисунок 1.38 — График зависимости  $H(t)$ ,  $\theta(t)$ ,  $V_y^*(t)$ ,  $V(t)$  в наборе высоты

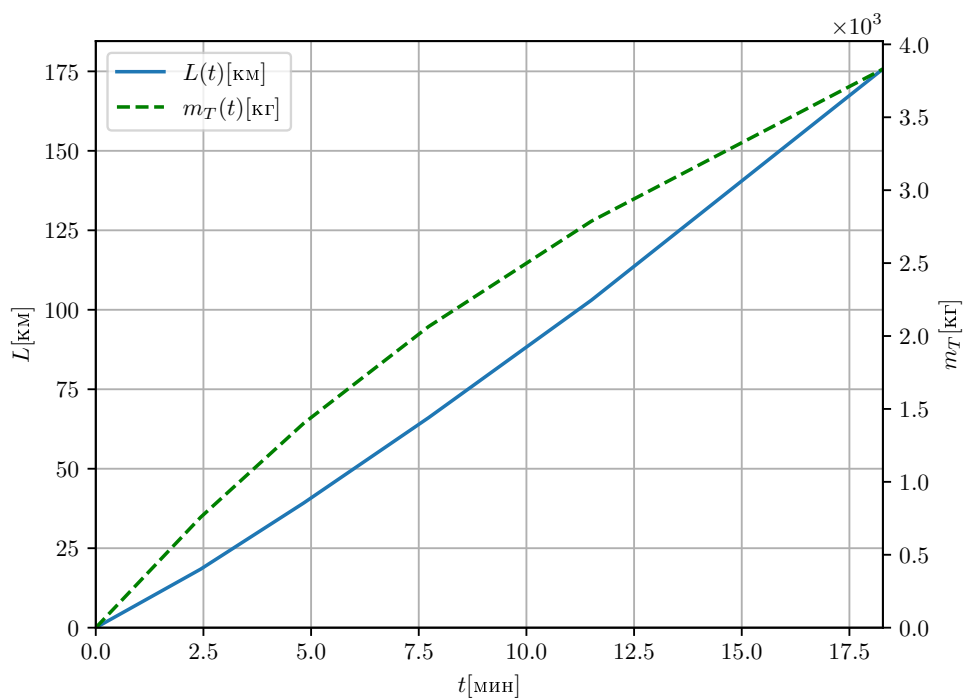


Рисунок 1.39 — График зависимости  $L(t)$ ,  $m_T(t)$  в наборе высоты

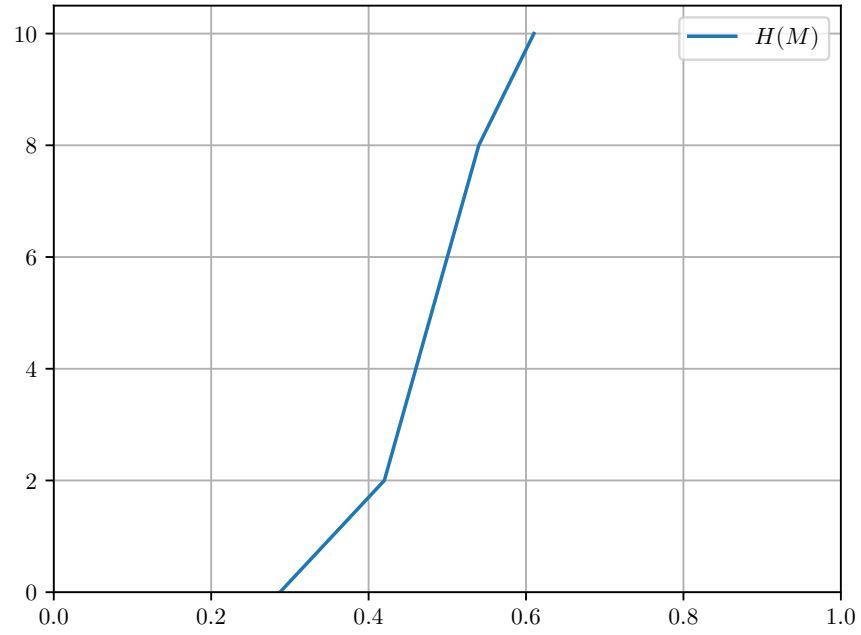


Рисунок 1.40 — Программа набора высоты

### 1.3.2. Расчет характеристик крейсерского полета

Для расчета времени  $T_{кр}$  и дальности  $L_{кр}$  крейсерского полета:

$$T_{кр} = \frac{60K_{ГП}}{gCe} \ln \frac{1 - \bar{m}_{T_{наб}} - \bar{m}_{T_{пр}}}{1 - \bar{m}_{T_{кр}} - \bar{m}_{T_{наб}} - \bar{m}_{T_{пр}}}, \quad [\text{мин}] \quad (1.25)$$

$$L_{кр} = \frac{36VK_{ГП}}{gCe} \ln \frac{1 - \bar{m}_{T_{наб}} - \bar{m}_{T_{пр}}}{1 - \bar{m}_{T_{кр}} - \bar{m}_{T_{наб}} - \bar{m}_{T_{пр}}}, \quad [\text{км}] \quad (1.26)$$

где  $\bar{m}_{T_{кр}} = 1 - \bar{m}_{сн} - \bar{m}_{цн} - \bar{m}_{T_{наб}} - \bar{m}_{T_{снп}} - \bar{m}_{T_{анз}} - \bar{m}_{T_{пр}} = 0.1788$  — относительная масса топлива расходуемая в крейсерском полете,  $K_{ГП} = 13.51$ ,  $V = 183 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ ,  $Ce = 0.063 \frac{\text{кг}}{\text{Н*ч}}$  — удельный расход топлива на высоте крейсерского полета. Параметры  $K_{ГП}$ ,  $V$ ,  $Ce$  определены для режима полета соответствующего минимуму километрового расхода в начале крейсерского полета.

Принимаем:

- $\bar{m}_{сн} = 0.45263$  — относительная масса пустого снаряженного самолета;

- $\bar{m}_{\text{цн}} = 0.24736$  – относительная масса целевой нагрузки;
- $\bar{m}_{T_{\text{наб}}} = \frac{m_{T_{\text{наб}}}}{m_{\text{max}}} = \frac{4505.4 \text{ кг}}{190000 \text{ кг}} = 0.02371$  – относительная масса топлива, расходуемая при наборе высоты;
- $\bar{m}_{T_{\text{сни}}} = 0.015$  - относительная масса топлива, расходуемая при снижении и посадке;
- $\bar{m}_{T_{\text{анз}}} = 0.05$  - аэронавигационный запас топлива;
- $\bar{m}_{T_{\text{пр}}} = 0.01$  - запас топлива для маневрирования по аэродрому, опробования двигателей, взлета.

Высоту  $H_{\text{кр}}$  в конце крейсерского полета можно определить по величине  $\rho_{H_{\text{кр}}}$ , которая определяется по формуле (1.27), сопоставив со значением стандартной атмосферы.

$$\rho_{H_{\text{кр}}} = \frac{2\bar{m}_{\text{ккр}} P s_{10}}{C_{y\text{гп}} V_{\text{к}}^2}, \quad (1.27)$$

где  $\bar{m}_{\text{ккр}} = 1 - \bar{m}_{T_{\text{наб}}} - \bar{m}_{T_{\text{пр}}} - \bar{m}_{T_{\text{кр}}}$ .

Результаты расчетов приведены в таблице 1.12.

Таблица 1.12 — Результаты расчета участка крейсерского полета

$T_{\text{кр}}$	$L_{\text{кр}}$	$\rho_{H_{\text{кр}}}$	$H_{0 \text{ кр}}$	$H_{\text{к кр}}$
мин	км	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	км	км
316.22	3069.0	0.3158	11	11.9

### 1.3.3. Расчет характеристик участка снижения

Расчет аналогичен расчету участка набора высоты (раздел 1.3.1), только в качестве программы снижения принимается зависимость  $M_{\text{сн}}(H)$ , соответствующая минимуму потребной тяги.

Начальные условия:

Скорость соответствует минимуму потребной тяги  $M_1(P_{n \min})$ , высота соответствует  $H_{\text{кр}}$

$$M_0 = 0.580; H_0 = 11 \text{ км}$$

Конечные условия:

Скорость в конце снижения соответствует наивыгоднейшей скорости при  $H = 0$ .

$$M_k = 0.370; H_k = 0.$$

Результаты расчетов приведены в таблице 1.14, по этим данным построили зависимости  $H(t)$ ,  $\theta(t)$ ,  $V_y^*(t)$ ,  $V(t)$ ,  $L(t)$ ,  $m_T(t)$  на рисунках 1.41, 1.42, 1.43. Основные параметры на снижении представлены на рисунке 1.13. Программа снижения представлена на рисунке 1.44.

По результатам программ набора, крейсерского полета и снижения был получен график  $H(L)$  на рисунке 1.44 для всего полета.

Таблица 1.13 — Основные параметры при снижении высоты

$m_{T_{\text{сн}}}$	$L_{\text{сн}}$	$t_{\text{сн}}$
кг	км	мин
443.5	197.3	19.7

Таблица 1.14 — Результаты расчета снижения высоты

$H_{\text{узел}}$	$M_{\text{сн}}$	$V$	$V_{\text{км}}$	$\frac{\Delta V}{\Delta H}$	$n_x$	$V_y^*$	$\theta$	$V_{y\text{сн}}$	$H_y$	$\Delta H_y$	$n_{x\text{ср}}$	$\frac{\Delta H_y}{1000n_x}$
М	-	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\frac{\text{км}}{\text{ч}}$	$\frac{1}{\text{с}}$	-	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	град.	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	М	М	-	КМ
10.0	0.6	179.7	647.0	0.013	-0.064	2.0	-3.0	-3.5	11646.0	-2437.0	-0.063	37.91
8.0	0.5	154.1	554.6	0.007	-0.058	6.3	-3.0	-6.9	9210.0	-2221.0	-0.058	38.09
6.0	0.44	139.2	501.3	0.008	-0.056	11.2	-2.9	-9.3	6988.0	-2213.0	-0.055	39.2
4.0	0.38	123.3	444.0	0.005	-0.055	13.6	-2.9	-11.5	4775.0	-2124.0	-0.054	38.92
2.0	0.34	113.1	407.0	0.005	-0.052	16.6	-2.8	-14.1	2652.0	-2120.0	-0.052	40.41
0.0	0.3	102.1	367.5	0.0	-0.051	17.8	-2.9	-15.7	531.0	-	-	-

Таблица 1.14 — (Продолжение) Результаты расчета снижения высоты

$P$	$\frac{CeP}{V_y^*}$	$(\frac{CeP}{V_y^*})_{\text{ср}}$	$\frac{\Delta H_y}{3600}(\frac{CeP}{V_y^*})_{\text{ср}}$	$L_{\text{сн}}$	$V_{y\text{ср}}^*$	$t_{\text{сн}}$	$Ce$
$H$	-	-	КГ	КМ	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	МИН	$\frac{\text{кг}}{\text{Нч}}$
6779.0	-240.6	-166.0	112.3	38.7	-0.2	7.33	0.124
8629.0	-153.2	-137.5	84.8	38.2	-0.1	4.19	0.122
11614.0	-153.3	-137.6	84.6	39.9	-0.1	3.28	0.123
13687.0	-146.3	-135.6	80.0	39.7	-0.1	2.63	0.123
16476.0	-142.2	-138.7	81.7	40.8	-0.1	2.3	0.122
18370.0	-143.7	-	-	-	-	-	0.123



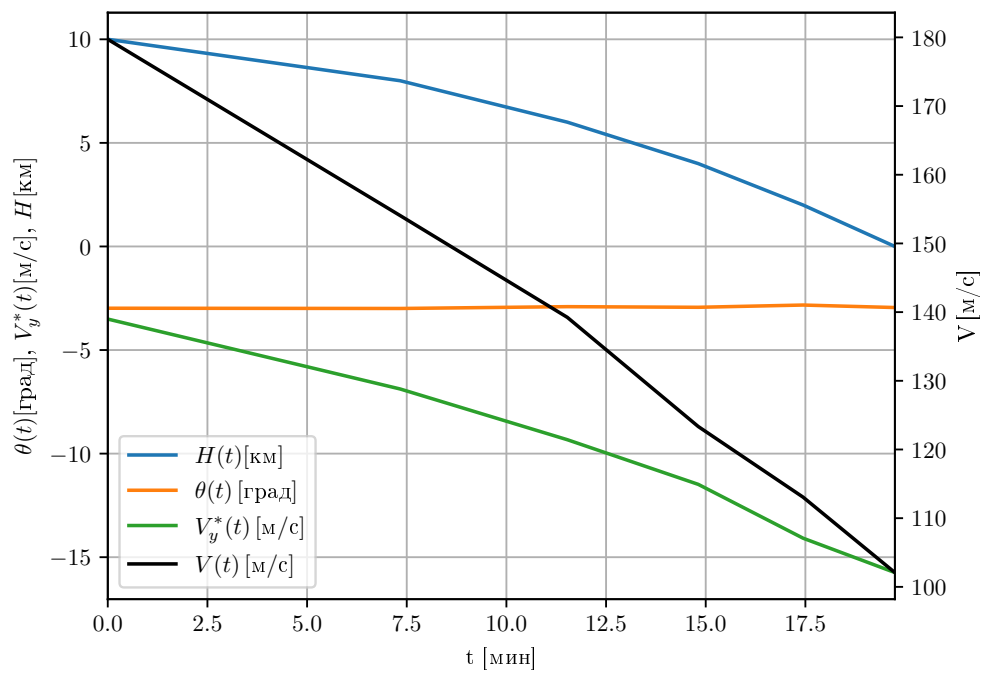


Рисунок 1.41 — График зависимости  $L(t)$ ,  $m_T(t)$

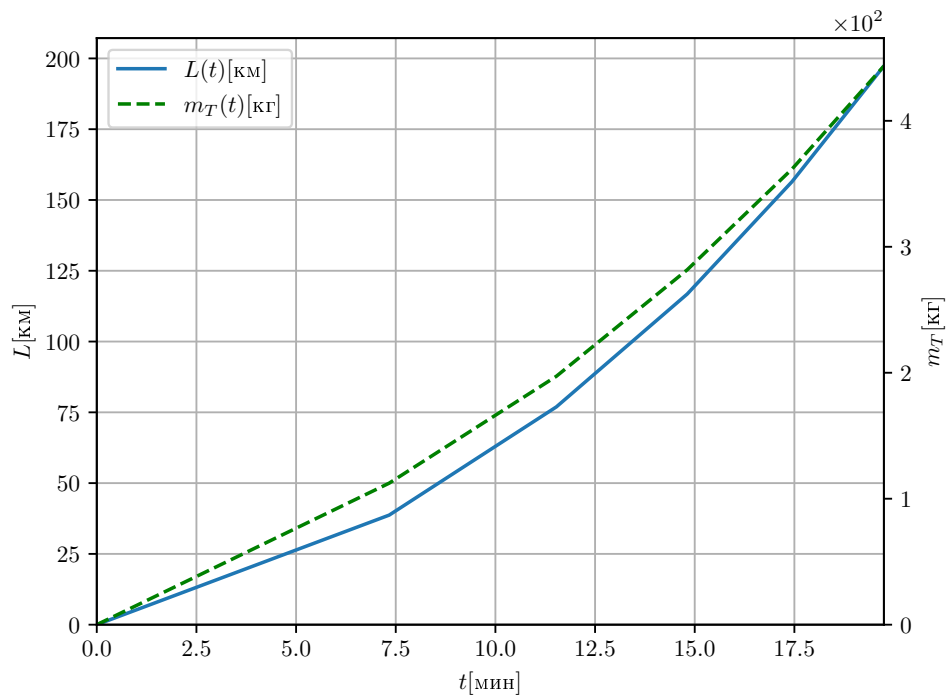


Рисунок 1.42 — График зависимости  $L(t)$ ,  $m_T(t)$

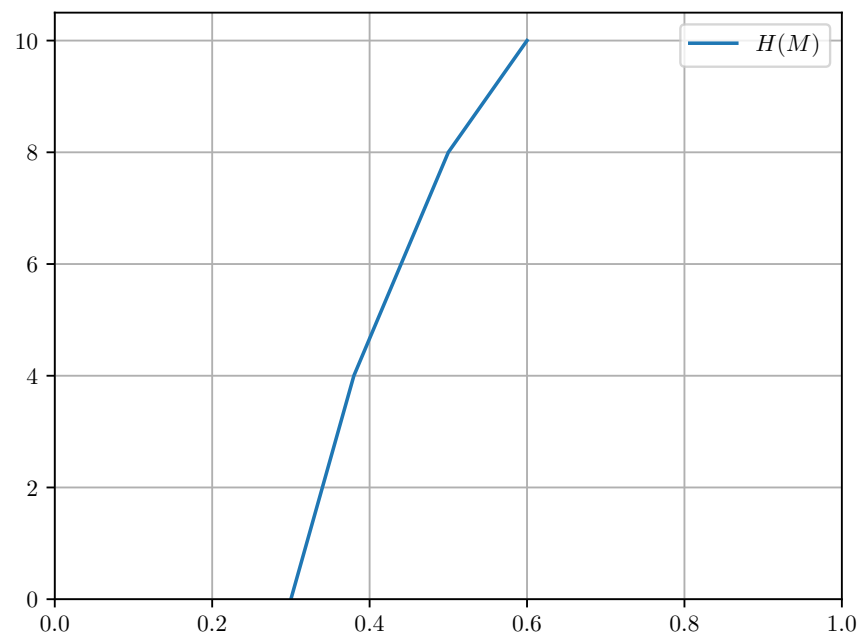


Рисунок 1.43 — Программа снижения

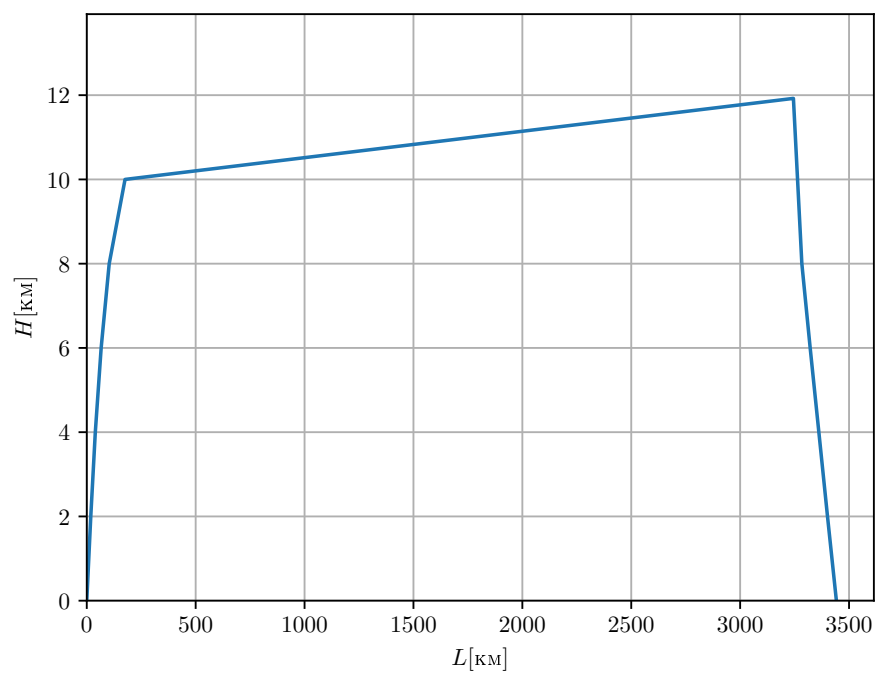


Рисунок 1.44 — Совмещенный график  $H(L)$  для участков набора высоты, крейсерского полета и снижения

## 1.4. Расчет диаграммы транспортных возможностей

Определим зависимость дальности полета от целевой нагрузки самолета  $m_{\text{цн}}(L)$  (Рисунок 1.45). Расчет ведется для трех режимов:

1. Полет с максимальной коммерческой нагрузкой,
2. Полет с максимальным запасом топлива,
3. Полет без коммерческой нагрузки ( $m_{\text{цн}} = 0$ ) с максимальным запасом топлива.

Режим 1:

Для данного режима определили в разделах 1.3.1, 1.3.2, 1.3.3.

$$\bar{m}_{\text{цн}} = \frac{m_{\text{цн}}}{m_{\text{max}}}$$

Режим 2:

$$L = L_{\text{наб}} + L_{\text{кр}} + L_{\text{сн}}$$

Для упрощения дальность полета, расход топлива при наборе и снижении, для всех режимов соответствует первому режиму.

Тогда дальность полета вычисляется как:

$$L_{\text{кр}} = \frac{36VK}{gCe} \ln \frac{\bar{m}_{\text{взл}} - \bar{m}_{T_{\text{наб}}} - \bar{m}_{T_{\text{пр}}}}{\bar{m}_{\text{взл}} - \bar{m}_{T_{\text{кр}}} - \bar{m}_{T_{\text{наб}}} - \bar{m}_{T_{\text{пр}}}}, \quad (1.28)$$

где  $\bar{m}_{\text{взл}} = 1$ ,  $\bar{m}_{T_{\text{кр}}} = \bar{m}_{T_{\text{max}}} - \bar{m}_{T_{\text{наб}}} - \bar{m}_{T_{\text{сн}}} - \bar{m}_{T_{\text{анз}}} - \bar{m}_{T_{\text{пр}}}$ ,  $\bar{m}_{T_{\text{max}}} = 0.4421$ ,

$$\bar{m}_{\text{цн}} = 1 - \bar{m}_{\text{сн}} - \bar{m}_{T_{\text{max}}}.$$

Режим 3:

$$\bar{m}_{\text{взл}} = \bar{m}_{\text{пуст}} + \bar{m}_{T_{\text{max}}}$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 1.15.

Таблица 1.15 — Результаты расчета

Режим	$L$	$m_{\text{цн}}$
№	км	кг
1	3442.0	46998.0
2	6365.0	20001.0
3	7328.0	0.0

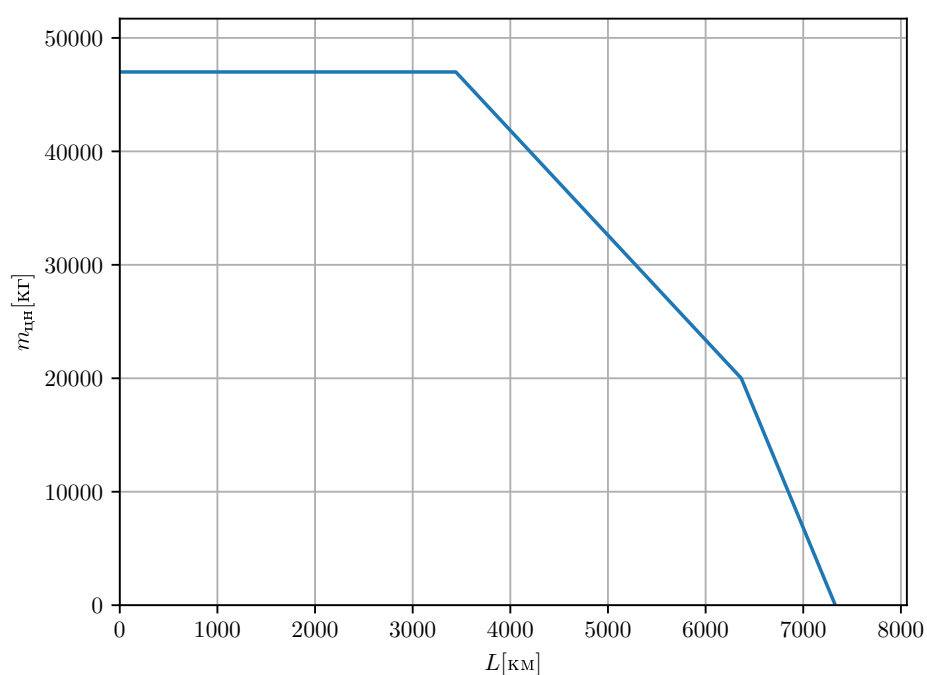


Рисунок 1.45 — График зависимости  $m_{\text{цн}}(L)$

## 1.5. Расчет взлетно-посадочных характеристик самолета

Для расчета: скорости отрыва при взлете  $V_{\text{отр}}$ , длины разбега  $L_{\text{р}}$ , взлетной дистанции  $L_{\text{вд}}$ , скорости касания ВПП при посадке  $V_{\text{кас}}$ , длины пробега  $L_{\text{пр}}$ , посадочной дистанции  $L_{\text{пд}}$ , предполагается, что:

1. Угол атаки при разбеге и пробеге  $\alpha_{\text{р}} = \alpha_{\text{п}} = 2^\circ$ .

2. Угол атаки при отрыве и касании ВПП  $\alpha_{\text{отр}} = \alpha_{\text{кас}} = 6^\circ$ .
3. Безопасная высота пролета препятствий  $H_{\text{взл}} = 10.7 \text{ м}$  и  $H_{\text{пос}} = 15 \text{ м}$ .
4. Тяга двигателей  $P_{\text{взл}} = (1.2...1.3)P$ ,  $C_{e_{\text{взл}}} = (1.03...1.05)C_{e_0}$ .
5. При пробеге по ВПП используется реверс тяги.

Соотношения для расчета:

Скорость отрыва при взлете:

$$V_{\text{отр}} = \sqrt{\frac{20P_s(1 - 0.9\bar{P}_{\text{взл}} \sin \alpha_{\text{отр}})}{\rho_0 C_{y_{\text{отр}}}}} \quad (1.29)$$

Длина разбега:

$$L_p = \frac{1}{2gb_p} \ln \frac{C_p}{C_p - b_p V_{\text{отр}}^2}, \quad (1.30)$$

где  $b_p = (C_{x_p} - f_p C_{y_p}) \frac{\rho_0}{2P_s 10}$ ,  $C_p = 0.9\bar{P}_{\text{взл}} - f_p$ ,  $f_p = 0.02$ .

Воздушный участок взлета:

$$L_{\text{вув}} = \frac{1}{\hat{n}_{x_{\text{ср}}}} \left( \frac{V_2^2 - V_{\text{отр}}^2}{2g} + H_{\text{взл}} \right), \quad (1.31)$$

где  $\hat{n}_{x_{\text{ср}}} = \bar{P}_{\text{взл}} - \frac{C_{x_{\text{отр}}} \rho_0 \hat{V}_{\text{ср}}^2}{P_s 20}$  — тангенциальная перегрузка для среднеквадратического значения скорости  $\hat{V}_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{V_2^2 + V_{\text{отр}}^2}{2}}$ ,  $V_2 = 1.1V_{\text{отр}}$  — безопасная скорость взлета.

Взлетная дистанция:

$$L_{\text{вд}} = L_p + L_{\text{вув}}. \quad (1.32)$$

Скорость касания ВПП на посадке:

$$V_{\text{кас}} = \sqrt{\frac{2\bar{m}_{\text{пос}} P_s 10}{C_{y_{\text{кас}}} \rho_0}}, \quad (1.33)$$

где  $\bar{m}_{\text{пос}} = \bar{m}_{\text{ккр}} - \bar{m}_{T_{\text{снп}}}$  — относительная масса самолета при посадке.

Длина пробега:

$$L_{\text{проб}} = \frac{1}{2gb_n} \ln \frac{a_n - b_n V_{\text{кас}}^2}{a_n}, \quad (1.34)$$

где  $a_n = -\bar{P}_{\text{рев}} - f_n$ ,  $b_n = \frac{\rho_0}{\bar{m}_{\text{пос}} P_s 20} (C_{x_{\text{проб}}} - f_n C_{y_{\text{проб}}})$ ,  $\bar{P}_{\text{рев}} = \frac{P_{\text{рев}}}{m_{\text{пос}} g}$ .

Длина воздушного участка:

$$L_{\text{вуп}} = K_{\text{пос}} \left( H_{\text{пос}} + \frac{V_{\text{пл}}^2 - V_{\text{кас}}^2}{2g} \right), \quad (1.35)$$

где  $K_{\text{пос}} = \frac{C_{y_{\text{пос}}}}{C_{x_{\text{пос}}}}$ ,  $C_{y_{\text{пос}}} = 0.7 C_{y_{\text{кас}}}(\alpha_{\text{кас}})$ ,  $V_{\text{пл}} = \sqrt{\frac{2\bar{m}_{\text{пос}} P_s 10}{C_{y_{\text{пос}}} \rho_0}}$ .

Посадочная дистанция:

$$L_{\text{пд}} = L_{\text{проб}} + L_{\text{вуп}}. \quad (1.36)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 1.16.

Таблица 1.16 — Результаты расчета

$V_{\text{отр}}$	$L_p$	$L_{\text{вд}}$	$V_{\text{кас}}$	$L_{\text{проб}}$	$L_{\text{пд}}$
$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	м	м	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	м	м
90.0	1830.0	2289.0	64.0	790.0	1384.0

## 1.6. Расчет характеристик маневренности самолета

В данном разделе определим характеристики правильного виража. Расчеты ведутся для высоты  $H = 6$  км. Характеристики маневренности рассчитываются при 50%-ом выгорании топлива для массы самолета  $\bar{m}_c = 1 - 0.5\bar{m}_T$ .

Для расчета таблицы 1.17:

1. Максимальная допустимая нормальная перегрузка:

$$n_{y_{\text{доп}}} = \min \{ n_{y_s}, n_y(C_{y_{\text{доп}}}) \},$$

где  $n_{y_s} = 3$  — эксплуатационная перегрузка,  $n_y(C_{y_{\text{доп}}}) = \frac{C_{y_{\text{доп}}}}{C_{y_{\text{гп}}}}$ ,  $C_{y_{\text{гп}}} = \frac{\bar{m}_c P_s 10}{q}$

2. Нормальная перегрузка предельного правильного виража

$$n_{y_{\text{вир}}} = \min \{ n_{y_{\text{доп}}}, n_{y_P} \},$$

$$\text{где } n_{y_P} = \frac{1}{C_{y_{a\Gamma\Pi}}} \left( C_{y_m} + \sqrt{\frac{\bar{P} C_{y_{a\Gamma\Pi}} - C_{x_m}}{A}} \right), \quad \bar{P} = \frac{P_p}{mg}$$

3. Кинематические параметры виража:

$$\omega_{\text{вир}} = \frac{g}{V} \sqrt{n_{y_{\text{вир}}}^2 - 1},$$

$$r_{\text{вир}} = \frac{V}{\omega_{\text{вир}}},$$

$$t_{\text{вир}} = \frac{2\pi r_{\text{вир}}}{V}.$$

4. Узловые точки для расчета:

$$M = [0.4, 0.5, 0.6, 0.7].$$

Таблица 1.17 — Расчет виража

$M$	$V$	$V$	$q$	$C_{y_{\Gamma\Pi}}$	$C_{y_{\text{доп}}}$	$n_{y_{\text{доп}}}$	$K_{\Gamma\Pi}$	$P_n * 10^{-5}$	$P_p * 10^{-5}$
-	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\frac{\text{км}}{\text{ч}}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	-	-	-	-	Н	Н
0.4	127.0	456.	5287.0	0.866	1.112	1.284	14.36	5.801	15.186
0.5	158.0	570.	8262.0	0.554	1.083	1.954	13.97	5.965	14.871
0.6	190.0	684.	11897.0	0.385	1.033	2.684	11.13	7.487	14.471
0.7	222.0	797.	16193.0	0.283	0.977	3.0	8.12	10.262	14.084

Таблица 1.17 — (Продолжение) Расчет виража

$\bar{P}$	$n_{yp}$	$n_{y_{\text{вир}}}$	$\omega_{\text{вир}}$	$r_{\text{вир}}$	$t_{\text{вир}}$
-	-	-	$\frac{1}{c}$	м	с
0.142	1.612	1.284	0.062	2026.7	100.6
0.139	1.865	1.865	0.098	1620.9	64.4
0.135	1.838	1.838	0.08	2383.8	78.9
0.132	1.27	1.27	0.035	6393.1	181.3

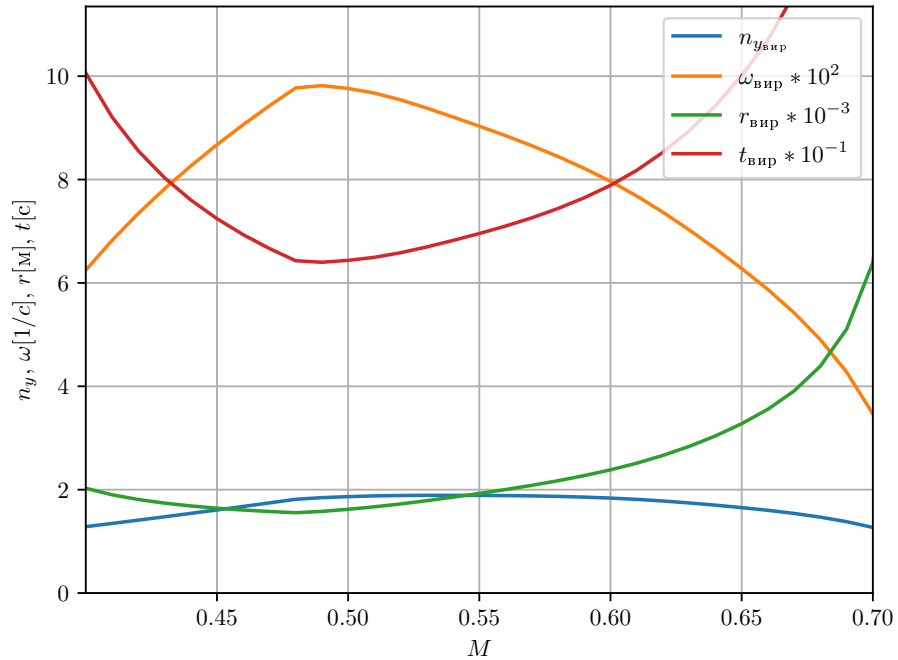


Рисунок 1.46 — График зависимости  $n_{y_{\text{вир}}}(M)$ ,  $\omega_{\text{вир}}(M)$ ,  $r_{\text{вир}}(M)$ ,  $t_{\text{вир}}(M)$

## 1.7. Расчет характеристик продольной статической устойчивости и управляемости

Для расчета продольной статической устойчивости и управляемости необходимо определить безразмерную площадь горизонтального оперения  $\bar{S}_{\text{ГО}}$  из условия устойчивости и балансировки.



Для определения  $\bar{S}_{\text{ГО}}$  рассчитываются предельно передняя  $\bar{x}_{\text{ТПП}}$  для режима посадки ( $H = 0, M = 0.2$ ) и предельно задняя  $\bar{x}_{\text{ТПЗ}}$  центровки:

$$\bar{x}_{\text{ТПП}} = \frac{-m_{Z_0 \text{БГО}} + \bar{x}_{F \text{БГО}} C_{y \text{БГО}} + C_{y \text{ГО}} \bar{S}_{\text{ГО}} K_{\text{ГО}} \bar{L}_{\text{ГО}}}{C_{y \text{БГО}}}, \quad (1.37)$$

где  $C_{y \text{БГО}} = C_{y_0 \text{БГО}} + C_{y \text{БГО}}^\alpha \alpha$ ,  $C_{y \text{ГО}} = C_{y \text{ГО}}^{\alpha_{\text{ГО}}} [\alpha(1 - \varepsilon^\alpha) + \delta_{\text{эф}}] < 0$ ,  $\delta_{\text{эф}} = \delta_{\text{уст}} + n_{\text{в}} \delta_{\text{max}}$ ,  $\delta_{\text{max}} = -25^\circ$ ,  $\delta_{\text{уст}} = -4^\circ$ .

$$\bar{x}_{\text{ТПЗ}} = \bar{x}_H + \sigma_n \min \quad (1.38)$$

$$\bar{x}_H = \bar{x}_F - \frac{m_z^{\bar{\omega}_z}}{\mu}, \mu = \frac{2P_s 10}{\rho g b_a}, m_z^{\bar{\omega}_z} = m_{z \text{БГО}}^{\bar{\omega}_z} + m_{z \text{ГО}}^{\bar{\omega}_z}, m_{z \text{ГО}}^{\bar{\omega}_z} = -C_{y \text{ГО}}^{\alpha_{\text{ГО}}} \bar{S}_{\text{ГО}} \bar{L}_{\text{ГО}} \sqrt{K_{\text{ГО}}}$$

$$\bar{x}_F = \bar{x}_{F \text{БГО}} + \Delta \bar{x}_{F \text{ГО}} \quad (1.39)$$

$$\Delta \bar{x}_{F \text{ГО}} \approx \frac{C_{y \text{ГО}}^{\alpha_{\text{ГО}}}}{C_y^\alpha} (1 - \varepsilon^\alpha) \bar{S}_{\text{ГО}} \bar{L}_{\text{ГО}} K_{\text{ГО}}, \sigma_n \min = -0.1$$

По приведенным формулам для ряда значений  $\bar{S}_{\text{ГО}} = (0.01, 0.2)$  рассчитываются значения  $\bar{x}_{\text{ТПП}}$ ,  $\bar{x}_{\text{ТПЗ}}$ , результаты представлены в таблице 1.18.

Затем графически определяется необходимая площадь ГО (рисунок 1.47) из условия:

$$\bar{x}_{\text{ТПЗ}}(\bar{S}_{\text{ГО}}) - \bar{x}_{\text{ТПП}}(\bar{S}_{\text{ГО}}) = 1.2 \Delta \bar{x}_3,$$

где для маломаневренного самолета  $\Delta \bar{x}_3 \approx 0.15$ .

Далее расчеты характеристик устойчивости и управляемости производятся для средней центровки:

$$\bar{x}_T = 0.5 [\bar{x}_{\text{ТПЗ}}(\bar{S}_{\text{ГО}}^*) + \bar{x}_{\text{ТПП}}(\bar{S}_{\text{ГО}}^*)]$$

Значения величин  $\bar{x}_F$ ,  $\bar{x}_H$ ,  $\bar{x}_{\text{ТПЗ}}$ ,  $\sigma_n$  определяются в узловых точках по  $M$  на высоте  $H = 0$  результаты которого сведены в таблицу 1.19.

$$\sigma_n = \bar{x}_T - \bar{x}_F + \frac{m_z^{\bar{\omega}_z}}{\mu}$$

По результатам получены графики зависимости  $\bar{x}_F$ ,  $\bar{x}_H$ ,  $\bar{x}_{\text{ТПЗ}}$  от числа  $M$  на рисунке 1.48.

Зависимости  $\delta_{\text{бал}}(M)$ ,  $\delta^n(M)$ ,  $n_{y_p}(M)$  для трех значений высот:  $H = (0 \text{ км}, 6 \text{ км}, H_{\text{кр}})$  рассчитываются по формулам:

$$m_z^{C_y} = \bar{x}_T - \bar{x}_F,$$

где  $\bar{x}_F = \bar{x}_{F\text{БГО}} + \Delta\bar{x}_{F\text{ГО}}$ ,  $m_z^{\delta_B} = -C_{y\text{ГО}}^{\alpha_{\text{ГО}}} \bar{S}_{\text{ГО}} \bar{L}_{\text{ГО}} K_{\text{ГО}} n_B$ ,  $C_{y\text{ГО}} = \frac{10P_s \bar{m}}{q}$ ,  $\bar{m} = 1 - 0.5\bar{m}_T$ .

$$m_{Z_0} = m_{Z_0\text{БГО}} - (1 - \varepsilon^\alpha) \bar{S}_{\text{ГО}} \bar{L}_{\text{ГО}} K_{\text{ГО}} C_{y\text{ГО}}^{\alpha_{\text{ГО}}} \alpha_0,$$

$$\delta_{\text{бал}} = -\frac{m_{z_0} m_z^{C_y} C_{y\text{ГП}}}{m_z^{\delta_B} \left(1 + \frac{m_z^{C_y}}{\bar{L}_{\text{ГО}}}\right)} + \frac{\delta_{\text{уст}}}{n_B},$$

$$\delta^n = -57.3 \frac{C_{y\text{ГП}} \sigma_n}{m_z^{\delta_B}},$$

$$n_{y_p} = 1 + \frac{\delta_{\text{max}} + \delta_{\text{уст}} - \delta_{\text{бал}}}{\delta^n}.$$

Результаты расчетов сведены в таблицы 1.20 - 1.22. Графические зависимости  $\delta_{\text{бал}}(M)$ ,  $\delta^n(M)$ ,  $n_{y_p}(M)$  представлены на рисунках 1.49, 1.50, 1.51 соответственно.

Таблица 1.18 — Значения для построения графика на рисунке 1.47

$\bar{S}_{\text{ГО}}$	$\bar{x}_{\text{ТПП}}$	$\bar{x}_{\text{ТПЗ}}$
0.01	0.2629	0.198
0.2	0.0543	0.4849

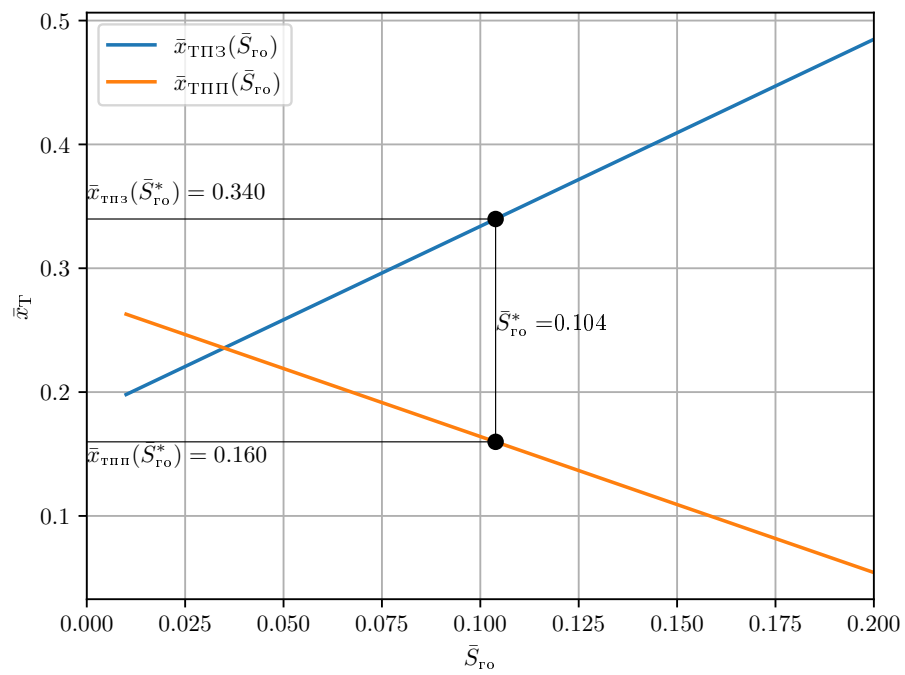


Рисунок 1.47 — График зависимости  $\bar{x}_{\text{ТПП}}(\bar{S}_{\text{го}})$

Таблица 1.19 — Результаты расчетов

$M$	$\bar{x}_F$	$\bar{x}_H$	$\bar{x}_{\text{ТПЗ}}$	$\sigma_n$
0.24	0.4026	0.4398	0.3398	-0.19
0.31	0.4028	0.44	0.34	-0.1902
0.41	0.4095	0.447	0.347	-0.1972
0.51	0.4168	0.4546	0.3546	-0.2048

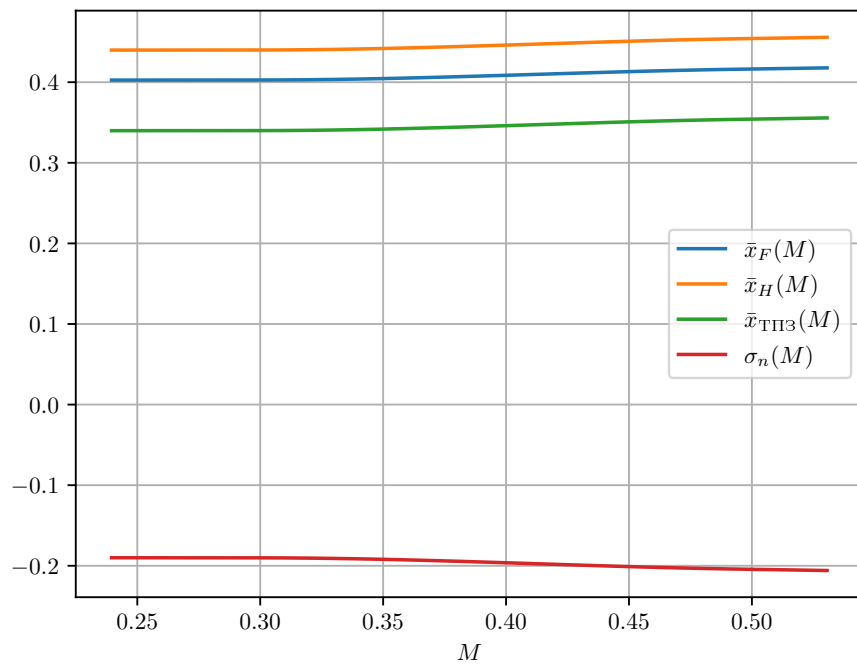


Рисунок 1.48 — График зависимости  $\bar{x}_F(M)$ ,  $\bar{x}_H(M)$ ,  $\bar{x}_{\text{ТПЗ}}(M)$ ,  $\sigma_n(M)$

Таблица 1.20 — Результаты расчетов для балансировочных зависимостей для высоты  $H = 0$  км

$M$	$V$	$\delta_{\text{бал}}$	$\delta^{n_y}$	$n_{y_p}$
-	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	град	$\frac{\text{град}}{\text{ед.перег.}}$	-
0.24	82.0	-1.36	-40.14	1.689
0.31	105.0	-1.12	-24.06	2.159
0.41	139.0	-0.97	-13.79	3.033
0.51	173.0	-0.9	-8.96	4.136

Таблица 1.21 — Результаты расчетов для балансировочных зависимостей для высоты  $H = 6$  км

$M$	$V$	$\delta_{\text{бал}}$	$\delta^{n_y}$	$n_{y_p}$
-	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	град	$\frac{\text{град}}{\text{ед.перег.}}$	-
0.35	111.0	-1.36	-36.43	1.759
0.4	127.0	-1.22	-28.03	1.991
0.5	159.0	-1.06	-18.13	2.541
0.6	190.0	-0.99	-13.01	3.153
0.7	222.0	-0.97	-10.09	3.778

Таблица 1.22 — Результаты расчетов для балансировочных зависимостей для высоты  $H = 11$  км

$M$	$V$	$\delta_{\text{бал}}$	$\delta^{n_y}$	$n_{y_p}$
-	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	град	$\frac{\text{град}}{\text{ед.перег.}}$	-
0.52	153.0	-1.35	-33.76	1.819
0.61	179.0	-1.22	-25.33	2.097
0.71	209.0	-1.16	-19.87	2.402

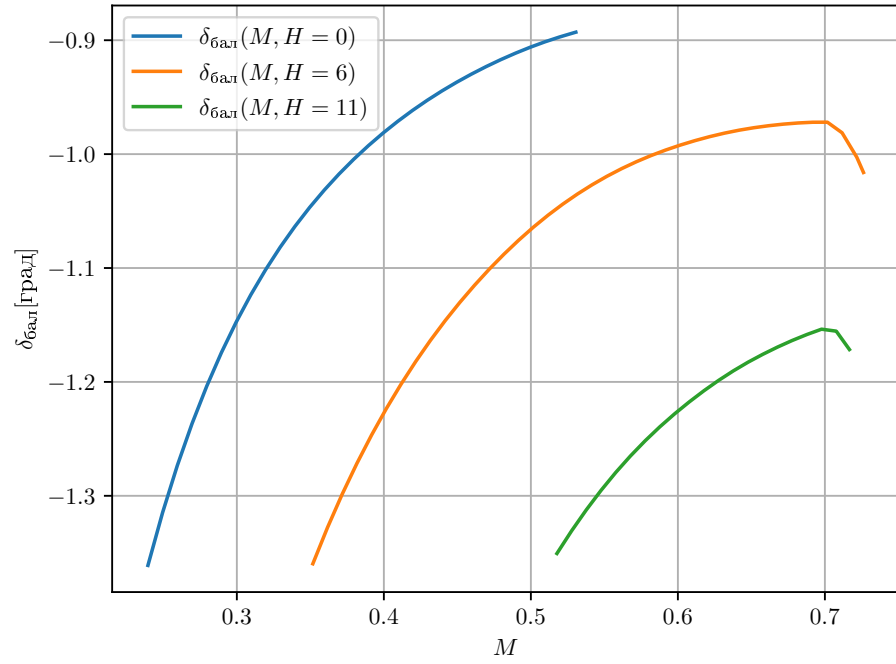


Рисунок 1.49 — График зависимости  $\delta_{ba_l}(M, H = 0, 6, 11 \text{ км})$

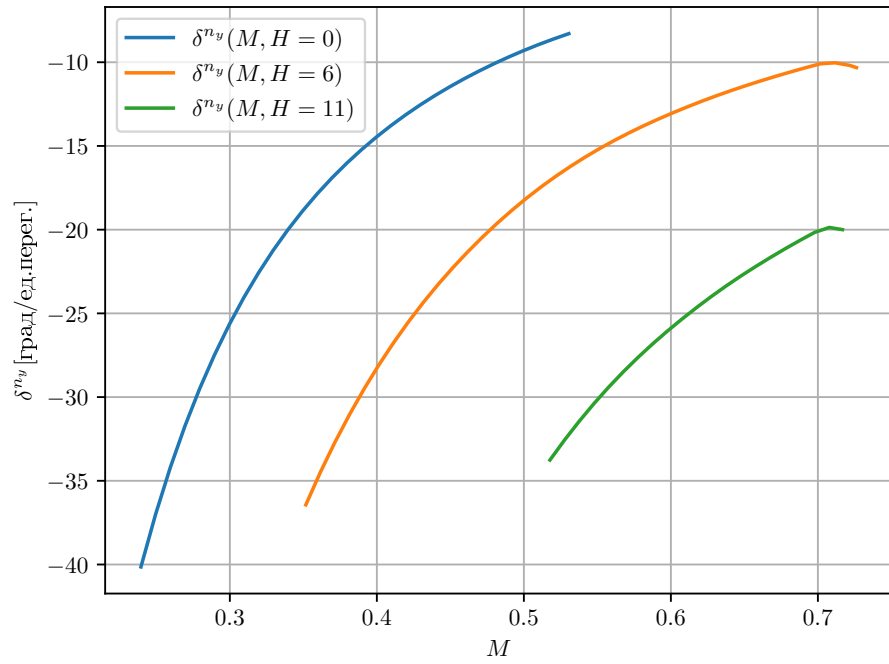


Рисунок 1.50 — График зависимости  $\delta^n(M, H = 0, 6, 11 \text{ км})$

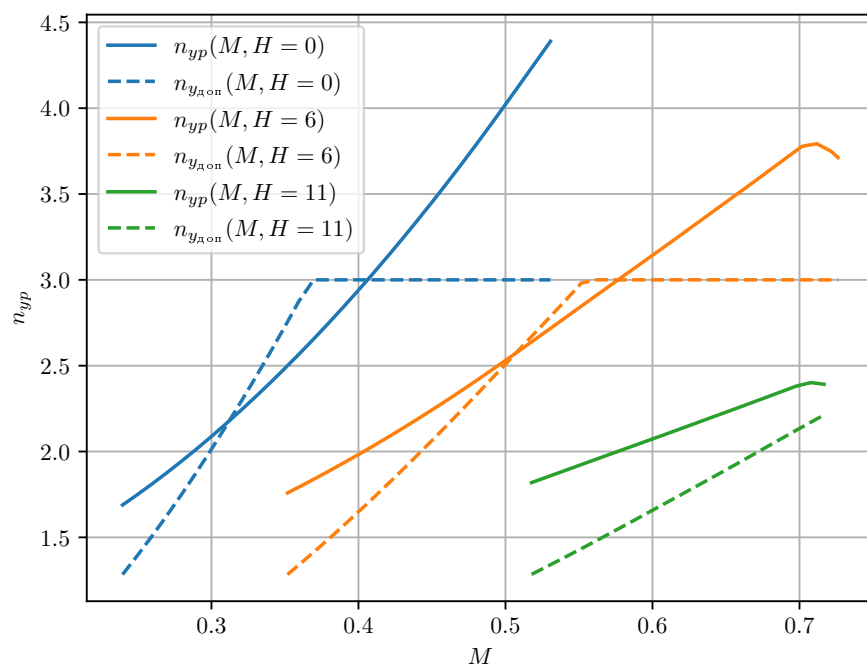


Рисунок 1.51 — График зависимости  $n_{yr}(M, H = 0, 6, 11 \text{ км})$

## 2. Синтез системы автоматического управления

### 2.1. Описание объекта управления

Один из разрабатываемых режимов для САУ – это система автоматической стабилизации высоты, применяемая в системе автоматического пилотирования. Дополнительные данные необходимые для расчетов приведены в таблицах 2.1, 2.2.

Управление самолетом в полете осуществляется отклонением руля высоты, стабилизатора, руля направления, элеронов и спойлеров. Система ручного управления необратимая бустерная, с возможностью перехода на ручное управление.

Самолет оснащен системой автоматического управления САУ-1Т-2Б, которая является частью пилотажно-навигационного комплекса ПК-76. САУ-1Т-2Б обеспечивает: автоматическое и директорное пилотирование по заданному маршруту в диапазонах высот от 400 м до максимальной высоты полета в режимах набора высота, горизонтального полета и снижения, заход на посадку до высоты 60 м в автоматическом и директором режимах.

Таблица 2.1 — Исходные данные самолета Ил-76

Параметр	Значение
$b_a$	6.436 м
$\delta_B$	$15^\circ \dots - 21^\circ$
$\varphi$	$+2^\circ \dots - 8^\circ$
$\bar{x}_T$	0.45
$I_z$	$19 \cdot 10^6 \text{ кг м}^2$



Таблица 2.2 — Значения производных коэффициентов аэродинамических сил и моментов для разных чисел Маха

$M$	$C_y^\alpha$	$\bar{x}_F$	$m_z^{\bar{\omega}_z}$	$m_z^{\bar{\alpha}}$	$m_z^{\delta_B}$
0.3	5.160	0.695	-11.09	-7.75	-2.7215
0.4	5.160	0.690	-11.09	-7.75	-2.7215
0.5	5.160	0.695	-11.09	-7.75	-2.7215
0.6	5.160	0.710	-11.09	-7.75	-2.7215
0.7	5.350	0.728	-11.09	-7.75	-2.7215
0.8	6.150	0.764	-11.09	-7.75	-2.7215

### 2.1.1. Построение области высот и скоростей

Аналогичный расчет был проведен в разделе 1.2. Исходя из области высот и скоростей (рисунок 1.35), найдем узловые точки для расчета коэффициентов обратных связей которые представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 — Узловые точки для расчета

$H, \text{ м}$	$M$					
0	0.240	0.302	0.364	0.426	0.488	0.612
2000	0.270	0.337	0.404	0.471	0.537	0.671
4000	0.307	0.372	0.438	0.503	0.568	0.699
6000	0.352	0.414	0.477	0.539	0.601	0.726
8000	0.406	0.463	0.519	0.575	0.631	0.744
10000	0.475	0.519	0.563	0.607	0.651	0.739
11558	0.544	0.564	0.584	0.604	0.624	0.664

### 2.1.2. Выбор параметров привода

Приближенно привод можно представить как:

$$W_{\text{пр}} = \frac{1}{T_{\text{пр}}^2 p^2 + 2\xi_{\text{пр}} T_{\text{пр}} + 1},$$

где  $\xi_{\text{пр}} = 0.7$ . Для нахождения  $T_{\text{пр}}$  найдем собственные частоты для самолета

$$\omega_c = \sqrt{-\bar{M}_z^\alpha - \bar{M}_z^{\omega_z} \bar{Y}^\alpha},$$

во всех узловых точках. Выберем  $\omega_{\text{max}}$  — максимальное значение  $\omega_c$  из всей рассчитанной области. Найдем  $T_{\text{пр теор}} = \frac{1}{10\omega_{\text{max}}}$ . Из ряда:

$$T_{\text{пр}}^* = [0.02 \ 0.025 \ 0.003 \ 0.035 \ 0.04 \ 0.045 \ 0.05]$$

выберем ближайшее значение к  $T_{\text{пр теор}}$  которое будет  $T_{\text{пр}}$ .

Расчеты по нахождению  $\omega_c$  сведены в таблицу 2.4, откуда:

$$\omega_{\text{max}} = 2.2517, \ T_{\text{пр}} = 0.045.$$

Таблица 2.4 — Результаты расчета  $\omega_c$

$H, \text{ м}$	Значения $\omega_c$ для узловых точек					
0	0.85414	1.07530	1.29070	1.51050	1.74080	2.2517
2000	0.83279	1.03530	1.23460	1.44800	1.67410	2.1879
4000	0.81355	0.98132	1.15520	1.33700	1.53730	1.9895
6000	0.79583	0.93461	1.08250	1.24080	1.40870	1.8298
8000	0.78184	0.89540	1.01380	1.14180	1.28030	1.6339
10000	0.78185	0.86125	0.94614	1.03410	1.13170	1.3725
11558	0.79699	0.83101	0.86535	0.90071	0.93916	1.0177

### 2.1.3. Вывод

В данном разделе были получены узловые точки для расчетов из области высот и скоростей. Также были определены параметры привода, которые равны:

$$\xi_{\text{пр}} = 0.7, \quad T_{\text{пр}} = 0.045.$$

### 2.2. Синтез контуров автоматического управления

Структурная схема регулирования высоты в тангажном варианте представлена на рисунке 2.1

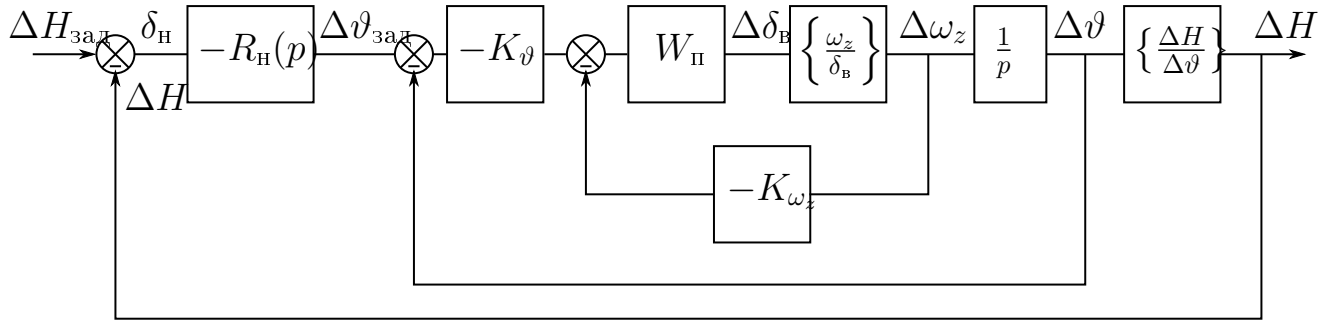


Рисунок 2.1 — Структурная схема стабилизации высоты

Передаточная функция угловой скорости по отклонению руля высоты имеет вид:

$$\left\{ \frac{\Delta \omega_z}{\Delta \delta_v} \right\} = \frac{\bar{M}_z^{\delta_v}(p + \bar{Y}^\alpha)}{p^2 + 2hp + \omega_c^2}, \quad (2.1)$$

где  $\omega_c^2 = -\bar{M}_z^\alpha - \bar{M}_z^{\omega_z} \bar{M}_z^{\omega_z}$ ,  $2h = 2\xi_{\text{к}} \omega_c = \bar{Y}^\alpha - \bar{M}_z^{\omega_z} - \bar{M}_z^{\dot{\alpha}}$ . Подробный вывод в [1, с.498].

Передаточная функция изменения высоты по изменению угла тангажа имеет вид :

$$\left\{ \frac{\Delta H}{\Delta \vartheta} \right\} = \frac{K_{\text{н}}}{p(T_{1c}p + 1)}, \quad (2.2)$$

где  $T_{1c} = \frac{1}{\bar{Y}^\alpha}$ . Подробный вывод в [2, с.61]

### 2.2.1. Расчет ядра системы

Определим коэффициенты обратных связей  $K_\vartheta$ ,  $K_{\omega_z}$  для системы на рисунке 2.2.

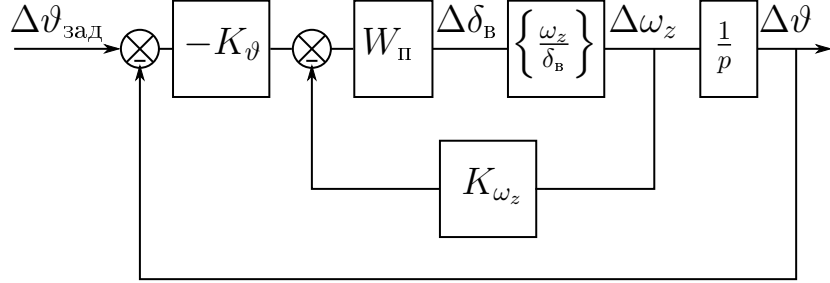


Рисунок 2.2 — Структурная схема стабилизации тангажа

Передаточная функция замкнутой системы имеет вид (при  $W_\Pi = 1$ ):

$$\left\{ \frac{\Delta\vartheta}{\Delta\vartheta_{\text{зад}}} \right\} = \frac{-K_\vartheta \bar{M}_z^{\delta_b} (\bar{Y}^\alpha + p)}{p^3 + \Delta_1 p^2 + \Delta_2 p + \Delta_3}, \quad (2.3)$$

где  $\Delta_1 = 2h + K_{\omega_z} \bar{M}_z^{\delta_b}$ ,  $\Delta_2 = \omega_c^2 - K_\vartheta \bar{M}_z^{\delta_b} + K_{\omega_z} \bar{M}_z^{\delta_b} \bar{Y}^\alpha$ ,  $\Delta_3 = -K_\vartheta \bar{M}_z^{\delta_b} \bar{Y}^\alpha$ .

$$K_{\omega_z} = \varepsilon K_{\omega_{z\text{гп}}}, \quad K_{\omega_{z\text{гп}}} = \frac{1}{|\bar{M}_z^{\delta_b}| T_n},$$

$$K_\vartheta = \nu K_{\omega_z}$$

В первом приближении  $\varepsilon = 0.25$ ,  $\nu = \omega_{0\text{max}} = 2.2517$ .

Результаты расчетов коэффициентов  $K_{\omega_z}$ ,  $K_\vartheta$  приведены в таблице 2.5, для дальнейшего синтеза внешнего контура выберем коэффициенты  $K_{\omega_z}$ ,  $K_\vartheta$  как показано на рисунках 2.3, 2.4.

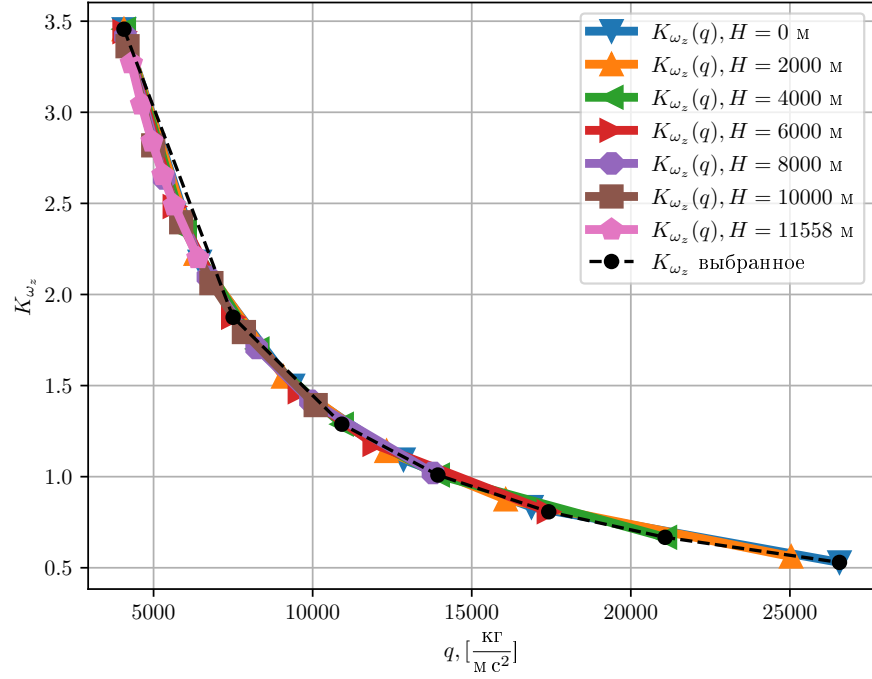


Рисунок 2.3 — Значения  $K_{\omega_z}$  для всех расчетных точек

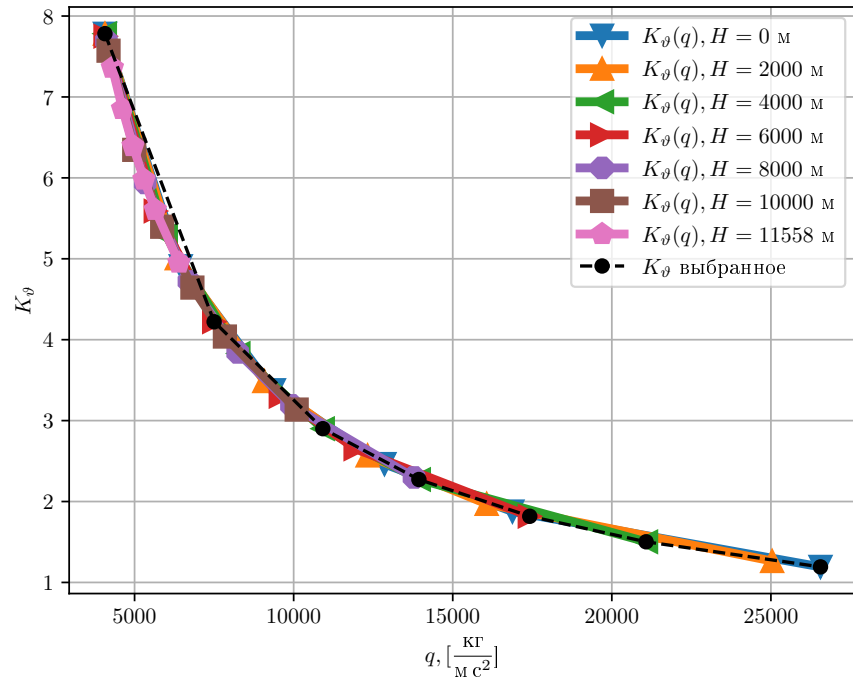


Рисунок 2.4 — Значения  $K_{\vartheta}$  для всех расчетных точек

### 2.2.2. Расчет внешнего контура

Определим коэффициент  $K_H$  и регулятор  $R_H(p)$ , как показано в [2, с.220], внешнего контура (рисунок 2.1):

$$K_H = V$$

$$R_H(p) = i_H = 0.8 \frac{1}{T_{1c} V}$$

Результаты расчетов приведены в таблице 2.5, также графическое представление на рисунке 2.5, 2.6.

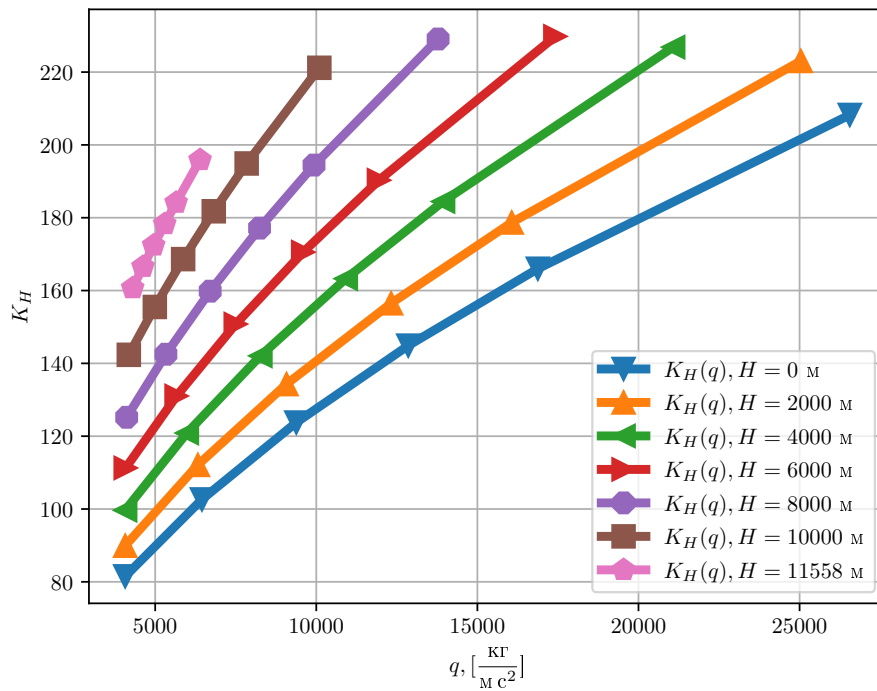


Рисунок 2.5 — Значения  $K_H$  для всех расчетных точек

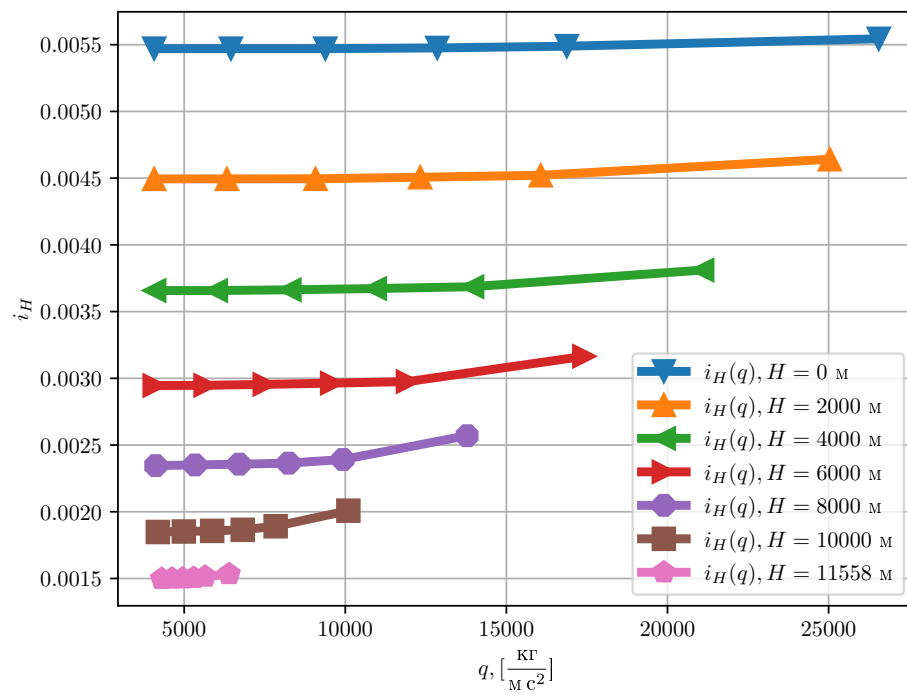


Рисунок 2.6 — Значения  $i_H$  для всех расчетных точек

Таблица 2.5 — Значения коэффициентов передачи

$H, \text{ м}$							
0	$M$	0.240	0.302	0.364	0.426	0.488	0.612
	$K_{\vartheta}$	7.78	4.91	3.38	2.46	1.88	1.19
	$K_{\omega_z}$	3.46	2.18	1.50	1.09	0.83	0.53
	$K_H$	82	103	124	145	166	208
	$i_H$	0.005470	0.005470	0.005470	0.005476	0.005489	0.005544
2000	$M$	0.270	0.337	0.404	0.471	0.537	0.671
	$K_{\vartheta}$	7.78	5.01	3.49	2.57	1.97	1.26
	$K_{\omega_z}$	3.46	2.22	1.55	1.14	0.88	0.56
	$K_H$	90	112	134	156	179	223
	$i_H$	0.004495	0.004495	0.004495	0.004507	0.004522	0.004642
4000	$M$	0.307	0.372	0.438	0.503	0.568	0.699
	$K_{\vartheta}$	7.78	5.29	3.83	2.90	2.27	1.50
	$K_{\omega_z}$	3.46	2.35	1.70	1.29	1.01	0.67
	$K_H$	100	121	142	163	184	227
	$i_H$	0.003658	0.003658	0.003663	0.003673	0.003686	0.003811
6000	$M$	0.352	0.414	0.477	0.539	0.601	0.726
	$K_{\vartheta}$	7.75	5.59	4.22	3.30	2.65	1.82
	$K_{\omega_z}$	3.44	2.48	1.87	1.47	1.18	0.81
	$K_H$	111	131	151	171	190	230
	$i_H$	0.002946	0.002948	0.002955	0.002964	0.002976	0.003165
8000	$M$	0.406	0.463	0.519	0.575	0.631	0.744
	$K_{\vartheta}$	7.69	5.94	4.72	3.84	3.19	2.30
	$K_{\omega_z}$	3.42	2.64	2.10	1.71	1.42	1.02
	$K_H$	125	143	160	177	194	229
	$i_H$	0.002346	0.002351	0.002357	0.002364	0.002392	0.002570
10000	$M$	0.475	0.519	0.563	0.607	0.651	0.739
	$K_{\vartheta}$	7.57	6.35	5.40	4.64	4.04	3.14
	$K_{\omega_z}$	3.36	2.82	2.40	2.06	1.79	1.39
	$K_H$	142	155	169	182	195	221
	$i_H$	0.001848	0.001852	0.001857	0.001865	0.001891	0.002008
11558	$M$	0.544	0.564	0.584	0.604	0.624	0.664
	$K_{\vartheta}$	7.36	6.85	6.39	5.98	5.60	4.95
	$K_{\omega_z}$	3.27	3.04	2.84	2.66	2.49	2.20
	$K_H$	161	167	172	178	184	196
	$i_H$	0.001498	0.001499	0.001501	0.001505	0.001514	0.001533



### 2.2.3. Вывод

В данном разделе были определены все коэффициенты обратных связей для всех контуров, обеспечивающие устойчивость системы.

### 2.3. Частотный анализ

Частотный анализ будет проводится для трех режимов:

1. Минимального скоростного напора  $q_{min} = 4069 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2}$  соответствующий  $H = 4000 \text{ м}$  и  $M = 0.307$ ;
2. Максимального скоростного напора  $q_{max} = 26558 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2}$  соответствующий  $H = 0 \text{ м}$  и  $M = 0.612$ ;
3. Крейсерский режим соответствующий  $q_{кр} = 6886 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2}$  соответствующий  $H = 10000 \text{ м}$  и  $M = 0.610$ ;

Также данные значения приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 — Режимы для частотного анализа

$H, \text{ м}$	$q, \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2}$	$M$
4000	4068.5293	0.3071
0	26557.5546	0.6119
10000	6885.8565	0.6100

#### 2.3.1. Анализ контура демпфирования

Передаточная функция разомкнутого контура демпфирования имеет вид:

$$W_{\text{раз}}^{\text{дем}} = W_{\text{п}} \left\{ \frac{\Delta \omega_z}{\Delta \delta_{\text{в}}} \right\} \quad (2.4)$$

Таблица 2.7 — Передаточные функции разомкнутого контура демпфирования при различных скоростных напорах

$q$	Передаточная функция
$q_{min}$	$-\frac{(1.249p + 0.658)}{0.002p^4 + 0.065p^3 + 1.072p^2 + 1.162p + 0.762}$
$q_{max}$	$-\frac{(7.345p + 10.403)}{0.002p^4 + 0.069p^3 + 1.198p^2 + 3.301p + 4.976}$
$q_{кр}$	$-\frac{(3.034p + 1.829)}{0.002p^4 + 0.065p^3 + 1.079p^2 + 1.328p + 2.206}$

Графики ЛАФЧХ представлены на рисунке 2.7. Запасы по фазе  $\Delta L$ , амплитуде  $\Delta Q$ , частоты среза  $\omega_{ср}$  для различных Махов представлены в таблице 2.8.

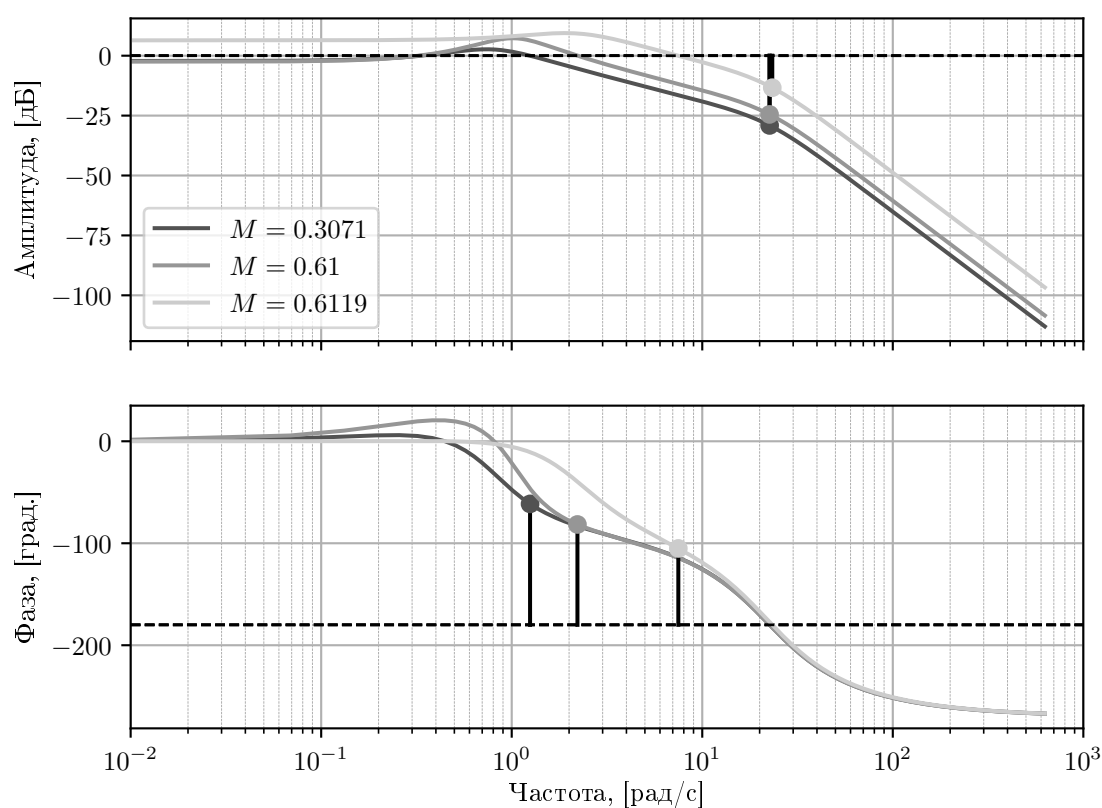


Рисунок 2.7 — ЛАФЧХ для разомкнутого контура демпфирования

Таблица 2.8 — Запасы, частоты среза для разомкнутого контура демпфирования

$M$	$\omega_{\text{ср}}$ , рад/с	$\Delta Q$ , дБ	$\Delta L$ , град.
0.3071	0.335	29.102	118.600
0.61	0.324	24.503	98.414
0.6119	7.489	13.362	74.939

### 2.3.2. Анализ ядра системы

Передаточная функция разомкнутой системы ядра (рисунок 2.2) имеет вид:

$$W_{\text{раз}} = \frac{K_{\vartheta} W_{\text{п}} \left\{ \frac{\Delta \omega_z}{\Delta \delta_{\text{в}}} \right\}}{p(1 + K_{\omega_z})} \quad (2.5)$$

Таблица 2.9 — Передаточные функции разомкнутой системы ядра при различных скоростных напорах

$q$	Передаточная функция
$q_{\min}$	$\frac{12.477 p + 6.576}{0.002 p^5 + 0.065 p^4 + 1.072 p^3 + 6.718 p^2 + 3.691 p}$
$q_{\max}$	$\frac{12.477 p + 17.672}{0.002 p^5 + 0.069 p^4 + 1.198 p^3 + 8.857 p^2 + 12.845 p}$
$q_{\text{кр}}$	$\frac{12.644 p + 7.619}{0.002 p^5 + 0.065 p^4 + 1.079 p^3 + 6.958 p^2 + 5.599 p}$

Графики ЛАФЧХ представлены на рисунке 2.8. Запасы по фазе, амплитуде, частоты среза для различных Махов представлены в таблице 2.10

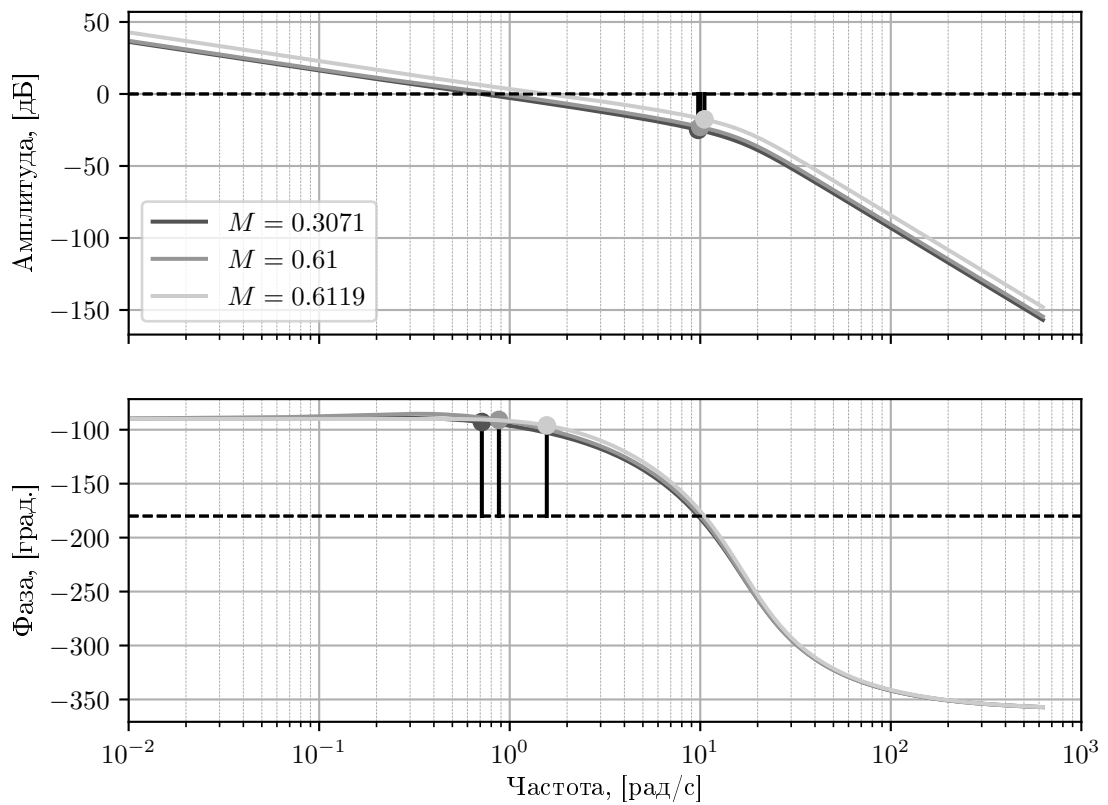


Рисунок 2.8 — ЛАФЧХ для разомкнутой системы ядра

Таблица 2.10 — Запасы, частоты среза для разомкнутого ядра

$M$	$\omega_{\text{ср}}, \text{ рад/с}$	$\Delta Q, \text{ дБ}$	$\Delta L, \text{ град.}$
0.3071	0.715	24.900	87.115
0.61	0.878	22.855	89.076
0.6119	1.565	17.607	83.986

Передаточная функция замкнутой системы ядра (рисунок 2.2) имеет вид:

$$\left\{ \frac{\Delta \vartheta}{\Delta \vartheta_{\text{зад}}} \right\} = \frac{-K_{\vartheta} \left\{ \frac{\Delta \omega_z}{\Delta \delta_b} \right\} W_{\Pi}}{p - K_{\vartheta} \left\{ \frac{\Delta \omega_z}{\Delta \delta_b} \right\} W_{\Pi} + K_{\omega_z} p} \quad (2.6)$$

Виды передаточных функций (2.6) замкнутой системы для ядра пред-

ставлены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 — Передаточные функции ядра при различных скоростных напорах

$q$	Передаточная функция
$q_{min}$	$\frac{12.477 p + 6.576}{0.002 p^5 + 0.065 p^4 + 1.072 p^3 + 6.718 p^2 + 16.167 p + 6.576}$
$q_{max}$	$\frac{12.477 p + 17.672}{0.002 p^5 + 0.069 p^4 + 1.198 p^3 + 8.857 p^2 + 25.322 p + 17.672}$
$q_{кр}$	$\frac{12.644 p + 7.619}{0.002 p^5 + 0.065 p^4 + 1.079 p^3 + 6.958 p^2 + 18.243 p + 7.619}$

Графики ЛАФЧХ представлены на рисунке 2.9. Запасы по фазе, амплитуде, частоты среза для различных Махов представлены в таблице 2.12

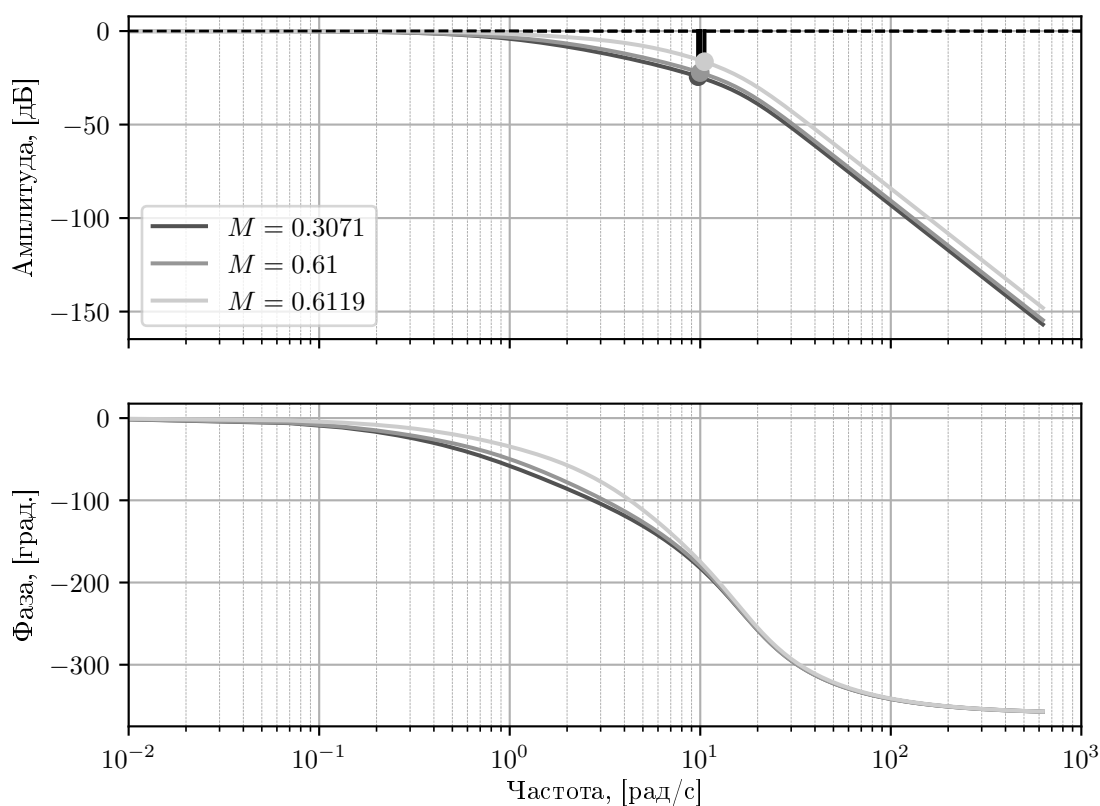


Рисунок 2.9 — ЛАФЧХ для ядра системы

Таблица 2.12 — Запасы, частоты среза для ядра системы

$M$	$\omega_{\text{ср}}, \text{ рад/с}$	$\Delta Q, \text{ дБ}$	$\Delta L, \text{ град.}$
0.3071	-	24.383	-
0.61	-	22.200	-
0.6119	-	16.380	-

### 2.3.3. Анализ внешнего контура

Передаточная функция разомкнутого внешнего контура с замкнутым ядром имеет вид:

$$W_{\text{раз}}^{\text{внеш}} = -R_H(p) \left\{ \frac{\Delta \vartheta}{\Delta \vartheta_{\text{зад}}} \right\} \left\{ \frac{\Delta H}{\Delta \vartheta} \right\} \quad (2.7)$$

Виды передаточных функций (2.7) разомкнутого внешнего контура представлены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 — Передаточные функции разомкнутого внешнего контура при различных скоростных напорах

$q$	Передаточная функция
$q_{\min}$	$\frac{5.261 p + 2.773}{0.004 p^7 + 0.126 p^6 + 2.099 p^5 + 13.817 p^4 + 37.391 p^3 + 28.644 p^2 + 6.576 p}$
$q_{\max}$	$\frac{14.138 p + 20.025}{0.001 p^7 + 0.051 p^6 + 0.915 p^5 + 7.451 p^4 + 26.734 p^3 + 37.799 p^2 + 17.672 p}$
$q_{\text{кр}}$	$\frac{6.096 p + 3.673}{0.003 p^7 + 0.111 p^6 + 1.857 p^5 + 12.626 p^4 + 37.232 p^3 + 30.887 p^2 + 7.619 p}$

Графики ЛАФЧХ представлены на рисунке 2.10. Запасы по фазе, амплитуде, частоты среза для различных Махов представлены в таблице 2.14

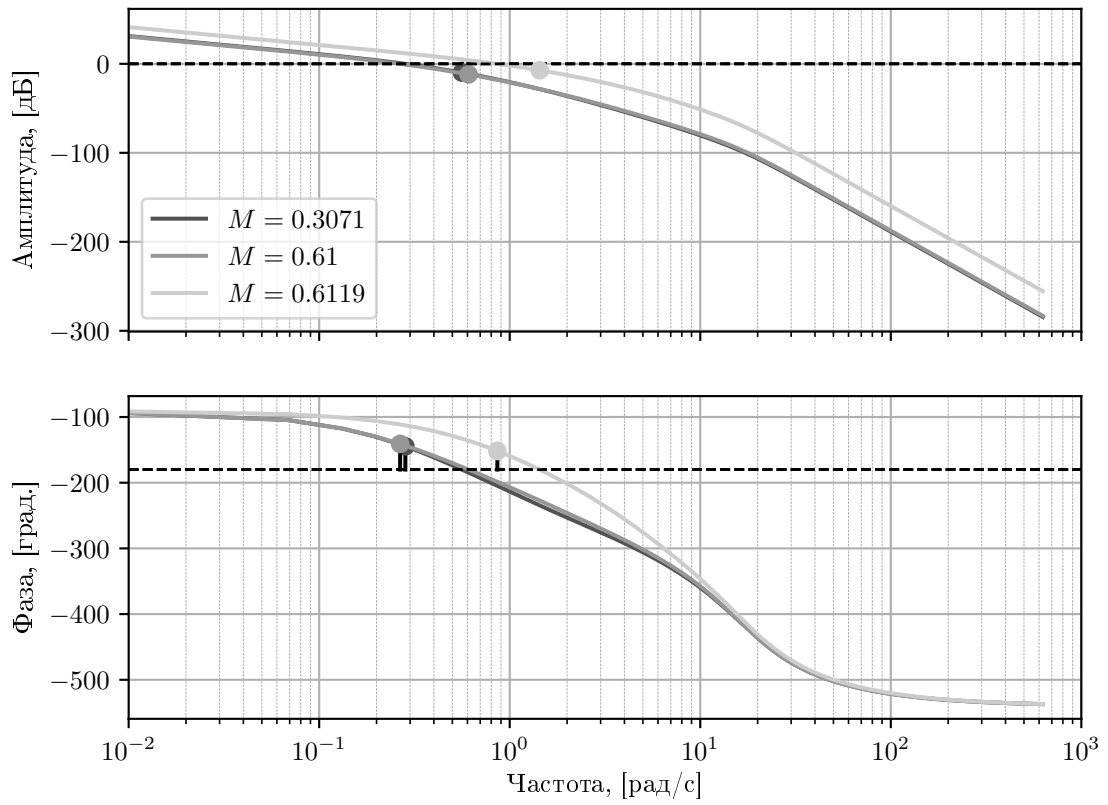


Рисунок 2.10 — ЛАФЧХ для разомкнутого траекторного контура при различных числах Маха

Таблица 2.14 — Запасы, частоты среза для разомкнутого траекторного контура

$M$	$\omega_{\text{ср}}, \text{ рад/с}$	$\Delta Q, \text{ дБ}$	$\Delta L, \text{ град.}$
0.3071	0.284	9.813	35.362
0.61	0.267	11.866	39.075
0.6119	0.862	7.198	28.364

Передаточная функция всей системы имеет вид:

$$\left\{ \frac{\Delta H}{\Delta H_{\text{зад}}} \right\} = \frac{R_H(p) \left\{ \frac{\Delta \vartheta}{\Delta \vartheta_{\text{зад}}} \right\} \left\{ \frac{\Delta H}{\Delta \vartheta} \right\}}{R_H(p) \left\{ \frac{\Delta H}{\Delta \vartheta} \right\} \left\{ \frac{\Delta \vartheta}{\Delta \vartheta_{\text{зад}}} \right\} - 1} \quad (2.8)$$

Виды передаточных функций (2.8) замкнутого внешнего контура представлены в таблице 2.15.

Таблица 2.15 — Передаточные функции замкнутого внешнего контура при различных скоростных напорах

$q$	Передаточная функция
$q_{min}$	$\frac{5.261 p + 2.773}{0.004 p^7 + 0.126 p^6 + 2.099 p^5 + 13.817 p^4 + 37.391 p^3 + 28.644 p^2 + 11.838 p + 2.773}$
$q_{max}$	$\frac{14.138 p + 20.025}{0.001 p^7 + 0.051 p^6 + 0.915 p^5 + 7.451 p^4 + 26.734 p^3 + 37.799 p^2 + 31.81 p + 20.025}$
$q_{кр}$	$\frac{6.096 p + 3.673}{0.003 p^7 + 0.111 p^6 + 1.857 p^5 + 12.626 p^4 + 37.232 p^3 + 30.887 p^2 + 13.715 p + 3.673}$

Графики ЛАФЧХ представлены на рисунке 2.11. Запасы по фазе, амплитуде, частоты среза для различных Махов представлены в таблице 2.16

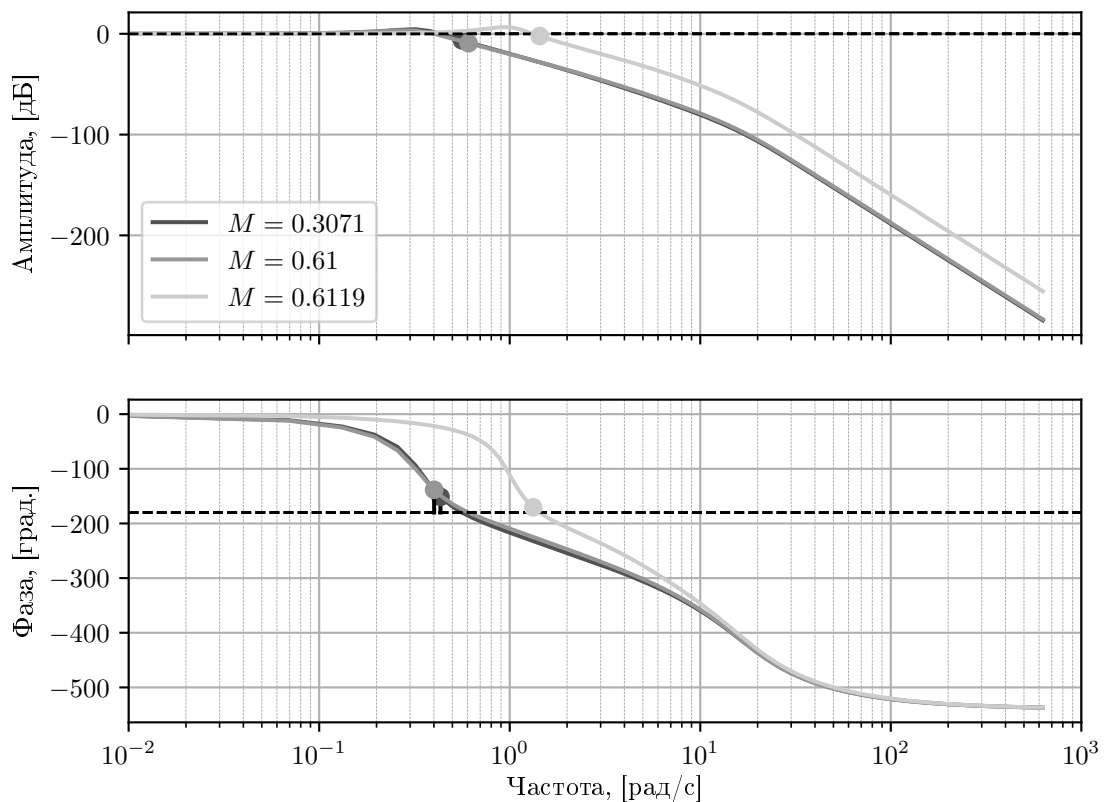


Рисунок 2.11 — ЛАФЧХ для системы автоматической стабилизации высоты



Таблица 2.16 — Запасы, частоты среза системы для автоматической стабилизации высоты

$M$	$\omega_{\text{ср}}$ , рад/с	$\Delta Q$ , дБ	$\Delta L$ , град.
0.3071	0.433	6.442	28.683
0.61	0.401	9.308	41.570
0.6119	1.328	2.223	9.530

#### 2.3.4. Вывод

По результатам частотного анализа ядра:

Разомкнутая система ядра имеет запас по амплитуде 22.8 дБ для крейсерского режима, 17.6 дБ для режима соответствующего максимальному  $q_{\max}$  и 24.9 дБ для режим минимального  $q_{\min}$ , запасы по фазе 89 град., 83 град., 87 град., соответственно. Имея положительные запасы замкнутая система будет устойчива (см. рисунок 2.9).

По результатам частотного анализа контура стабилизации высоты:

Разомкнутая система имеет запасы по амплитуде 11.8 дБ, 9.8 дБ, 7.1 дБ для крейсерского,  $q_{\min}$ ,  $q_{\max}$  режимов соответственно, по фазе 39 град., 35 град., 28 град.. Замыкая контур система стала устойчива (см. рисунок 2.11).

#### 2.4. Нелинейное моделирование САУ

Нелинейное моделирование будет проводится для скоростного режима  $M_{\text{кр}}$  на крейсерской высоте  $H = 10000$  м для двух максимальных скоростей отклонения руля высоты  $\dot{\delta}_{\text{в max}} = 15 \frac{\text{град.}}{\text{сек.}}$ ,  $60 \frac{\text{град.}}{\text{сек.}}$ . Также будут введены ограничения на:

- Диапазон отклонения руля высоты  $\delta_{\text{в}} = -21^\circ \dots 15^\circ$ .

- Диапазон угла тангажа в наборе  $\vartheta = -6.5^\circ \dots 6.5^\circ$ .

Схема нелинейной модели из «Simulink» представлена на рисунке 2.12. Блок с названием «i\_H» соответствует коэффициенту  $i_H$ , «K\_theta\_int» —  $K_\vartheta$ , «W\_p» —  $W_\Pi$ , «d\_w\_d\_v» —  $\left\{ \frac{\Delta \omega_z}{\Delta \delta_B} \right\}$ , «K\_omega\_z\_int» —  $K_{\omega_z}$ , «W\_H\_theta» —  $\left\{ \frac{\Delta H}{\Delta \vartheta} \right\}$ .

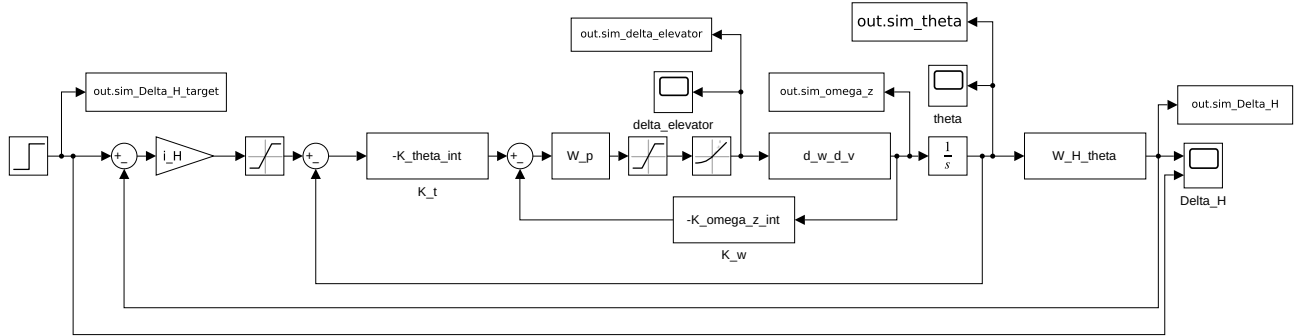


Рисунок 2.12 — Схема нелинейной модели

#### 2.4.1. Сравнение для разных максимальных скоростей отклонения руля высоты

Графики изменения  $\Delta H$ ,  $\delta_B$ ,  $\omega_z$ ,  $\vartheta$  для  $\dot{\delta}_{B \max} = 15 \frac{\text{град.}}{\text{сек.}}$ ,  $60 \frac{\text{град.}}{\text{сек.}}$  представлены на рисунках 2.13, 2.14, 2.15, 2.16.

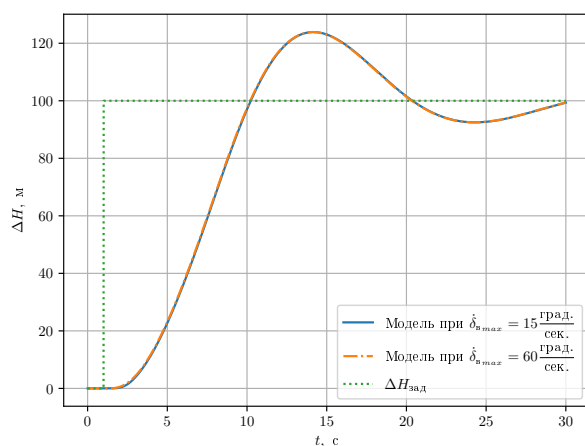


Рисунок 2.13 — Изменение высоты для различных  $\dot{\delta}_{в max}$

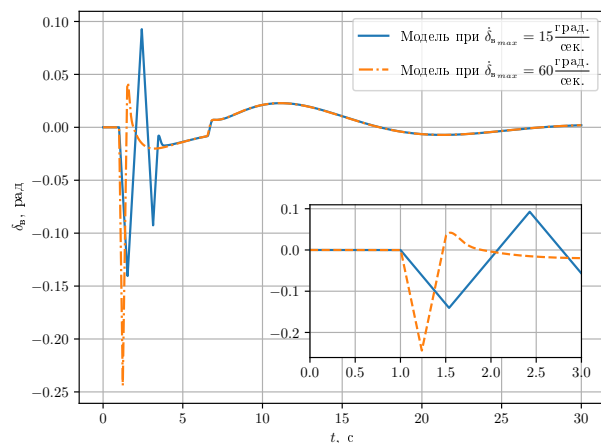


Рисунок 2.14 — Изменение положения руля высоты для различных  $\dot{\delta}_{в max}$

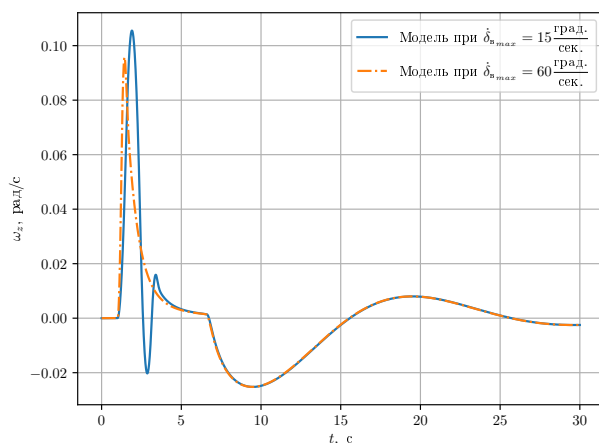


Рисунок 2.15 — Изменение угловой скорости для различных  $\dot{\delta}_{в max}$

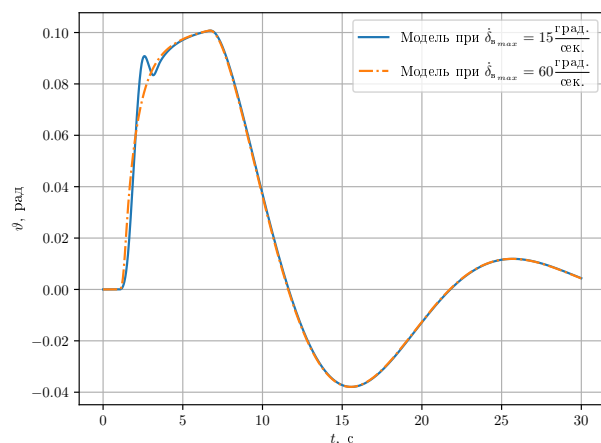


Рисунок 2.16 — Изменение угла тангажа для различных  $\dot{\delta}_{в max}$

Таблица 2.17 — Сравнение параметров переходного процесса  $\Delta H(t)$  при различных  $\dot{\delta}_B$

	Модель при $\dot{\delta}_{Bmax} = 15 \frac{\text{град.}}{\text{сек.}}$	Модель при $\dot{\delta}_{Bmax} = 60 \frac{\text{град.}}{\text{сек.}}$
$t_{\text{пер}}, \text{ с}$	26.70	26.69
$\sigma, \%$	24.73	24.66

## 2.4.2. Сравнение линейной и нелинейной модели

Графики изменения  $\Delta H$ ,  $\delta_B$ ,  $\omega_z$ ,  $\vartheta$  для линейной и нелинейной модели представлены на рисунках 2.17, 2.18, 2.19, 2.20. Моделирование нелинейной модели проводилось при  $\dot{\delta}_{B \max} = 60 \frac{\text{град.}}{\text{сек.}}$ .

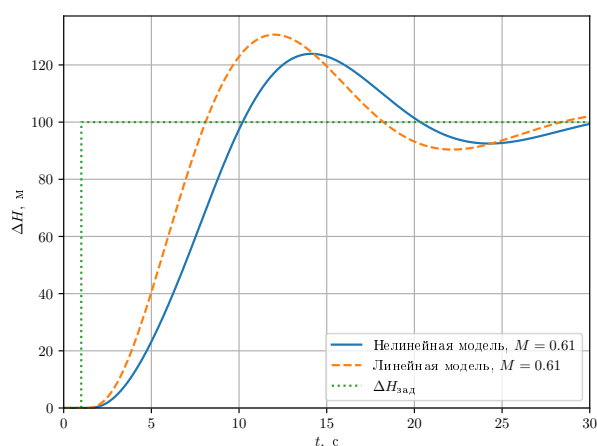


Рисунок 2.17 — Изменение высоты для линейной и нелинейной модели

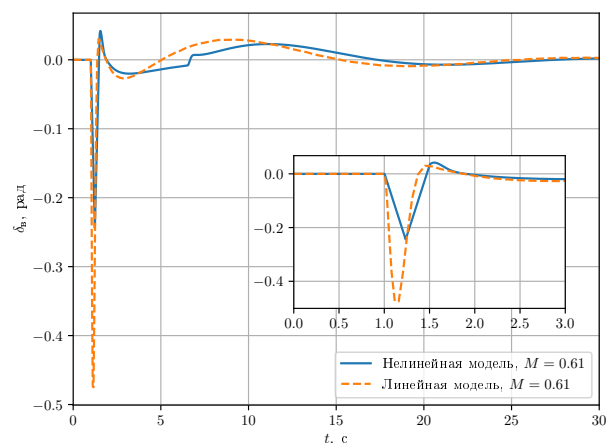


Рисунок 2.18 — Изменение положения руля высоты для линейной и нелинейной модели

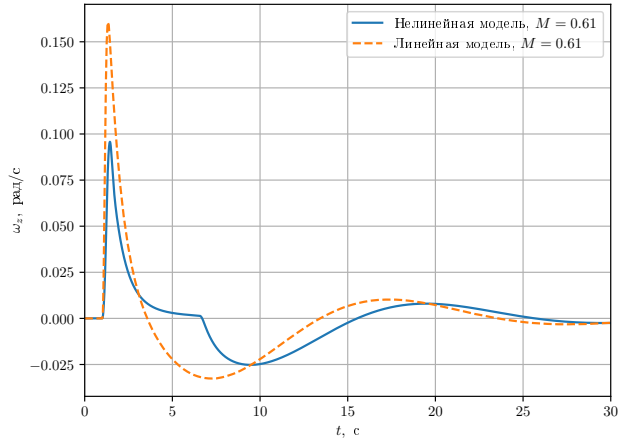


Рисунок 2.19 — Изменение угловой скорости для линейной и нелинейной модели

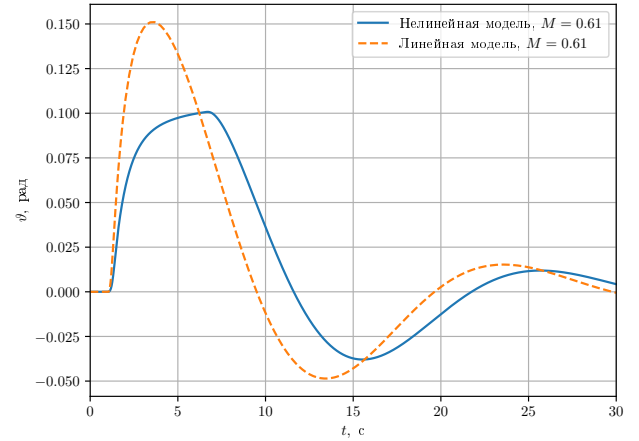


Рисунок 2.20 — Изменение угла тангажа для линейной и нелинейной модели

Таблица 2.18 — Сравнение параметров переходного процесса  $\Delta H(t)$

	Линейная модель	Нелинейная модель
$t_{\text{рег}}, \text{ с}$	26.67	26.69
$\sigma, \%$	28.00	24.66

### 2.4.3. Вывод

При моделировании различных скоростей отклонения руля высоты, переходный процесс практически не изменился (см. рисунок 2.13), время регулирования привода с наибольшей максимальной скоростью отклонения было меньше на  $\approx 0.01$  с, что незначительно. Максимальное отклонение руля высоты в случае с  $\dot{\delta}_{\text{вmax}} = 15 \frac{\text{град.}}{\text{сек.}}$  было меньше на 40% (см. рисунок 2.14). Максимальная угловая скорость тангажа равна  $\approx 0.115$  рад/с у модели с  $\dot{\delta}_{\text{вmax}} = 15 \frac{\text{град.}}{\text{сек.}}$  (см. рисунок 2.15). Характер изменения угла тангажа имеет различие до 5 секунды моделирования (см. рисунок 2.16).

Разница во времени регулирования между линейной и нелинейной моделью в  $\approx 0.03$  с (см. таблицу 2.18), но разница во времени срабатывания порядка  $\approx 1.8$  с. У линейной модели максимальное отклонение руля высоты имеет недопустимое значение  $\max(\delta_v) > -21^\circ$  (см. рисунок 2.18). В следствии этого максимальная угловая скорость тангажа  $\approx 0.16$  рад/с (см. рисунок 2.19). Изменение угла тангажа у нелинейной модели ограничено 0.11 рад, что примерно равно  $6.5^\circ$  (см. рисунок 2.20).

## 2.5. Вывод по разделу

В ходе работы была составлена модель системы стабилизации высоты в тангажном варианте. Проведен линейный и нелинейный анализ системы, вычислены значения коэффициентов обратных связей, коэффициентов стабилизации (см. таблицу 2.5). При синтезировании данной системы были получены результаты:

1. Параметры привода:

$$\xi_{\text{пр}} = 0.7, \quad T_{\text{пр}} = 0.045.$$

2. Разомкнутый контур стабилизации высоты имеет удовлетворительные запасы.
3. Переходные процессы нелинейной и линейной модели имеют различный характер изменения.

### 3. Специальная часть

#### 3.1. Исследование характеристик транспортного самолета при выполнении эшелонирования

##### 3.1.1. Постановка задачи

В работе исследуется задача минимизации километрового расхода топлива в крейсерском полете на заданную дальность путем оптимизации вертикальной траектории и скоростного режима.

##### 3.1.2. Расчетные формулы

$$q_{\text{ч}} = P_{\text{p}} C_e, \quad q_{\text{км}} = \frac{q_{\text{ч}}}{3.6V}, \quad L_{\text{кс}} = \int_{m_{\text{к}}}^{m_{\text{н}}} \frac{dm}{q_{\text{км}}}, \quad T_{\text{кс}} = \int_{m_{\text{к}}}^{m_{\text{н}}} \frac{dm}{q_{\text{ч}}}, \quad (3.1)$$

$$P_{\text{п}}(M, H) = \frac{mg}{K} \quad (3.2)$$

$$P_{\text{р}}(M, H) = P_{\text{р11}} \frac{p_H}{p_{H=11}}, \quad (3.3)$$

$$P_{\text{р}}(M, H) = \bar{P}_0 mg \tilde{P}(H, M), \quad (3.4)$$

$$C_e = C_{e0} \tilde{C}_e(H, M) \hat{C}_{e_{\text{др}}}(R), \quad (3.5)$$

$$L_{\text{кс}} = \frac{3.6}{\bar{P}_0 C_{e0} g} \int_{m_{\text{к}}}^{m_{\text{н}}} \frac{V}{m \tilde{P}(H, M) \tilde{C}_e(H, M) \hat{C}_{e_{\text{др}}}(\bar{R})} dm, \quad (3.6)$$

$$T_{\text{кс}} = \frac{1}{g} \int_{m_{\text{к}}}^{m_{\text{н}}} \frac{1}{m \tilde{P}(H, M) \tilde{C}_e(H, M) \hat{C}_{e_{\text{др}}}(\bar{R})} dm \quad (3.7)$$

#### 3.2. Исходные данные для расчетов

$m_{\text{пуст}} = 86000$  кг,  $m_{\text{топл}} = 60000$  кг,  $m_{\text{цн}} = 34000$  кг. При интегрировании по формулам (3.1)  $m_{\text{к}} = 120000$  кг,  $m_{\text{н}} = 180000$  кг. Остальные параметры были приведены в разделе 1.1. Полет будет осуществляться на дальность  $L_{\text{кр}} = 3000$  м.

### 3.2.1. Задачи

По мере уменьшения массы из-за выгорания топлива в крейсерском полете будет уменьшаться  $P_{\text{п}}$  из формулы (3.2), что ведет к изменению расхода топлива.

Проведем такие количественные анализы:

1. Влияние массы на изменение экономической скорости.
2. Оптимальную траекторию с учетом выгорания топлива.
3. Найти моменты смены эшелона для перехода на экономически выгодный эшелон.
4. Разница в расходах топлива при полете на постоянной высоте и со сменной высоты.

### 3.3. Результаты

#### 3.3.1. Результаты расчета при постоянной высоте и оптимальной скорости полета

Таблица 3.1 — Полученные параметры

$q_{\text{км ср}}, \frac{\text{кг}}{\text{км}}$	$L, \text{ м}$	$m_{\text{изр}}, \text{ кг}$	$t_{\text{кр}}, \text{ мин}$
10.427	3000	31281.73	278.15



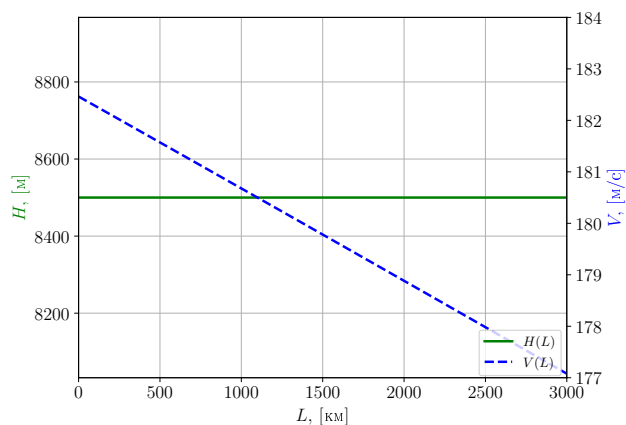


Рисунок 3.1 — График зависимости  $H(L)$  и  $V(L)$

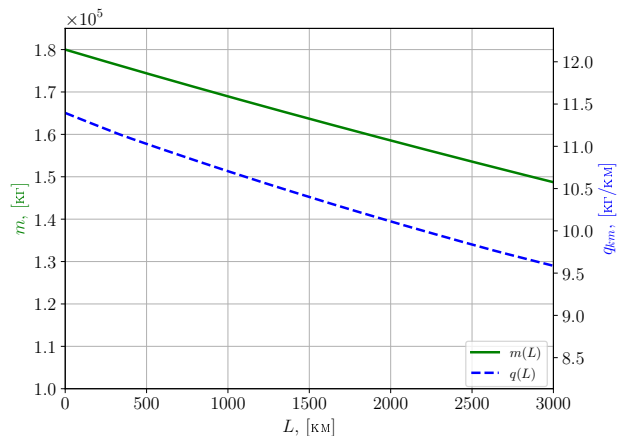


Рисунок 3.2 — График зависимости  $q(L)$  и  $m(L)$

### 3.3.2. Результаты расчета при оптимальном изменении высоты и скорости полета

Таблица 3.2 — Полученные параметры

$q_{\text{км ср}}, \frac{\text{кг}}{\text{км}}$	$L, \text{ м}$	$m_{\text{изр}}, \text{ кг}$	$t_{\text{кр}}, \text{ мин}$
10.305	3000	30915.00	276.80

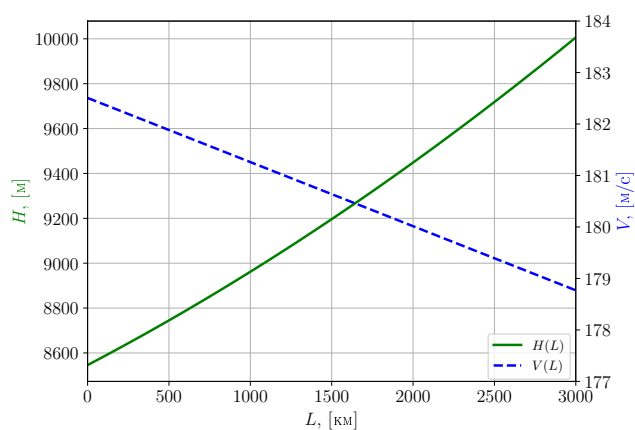


Рисунок 3.3 — График зависимости  $H(L)$  и  $V(L)$

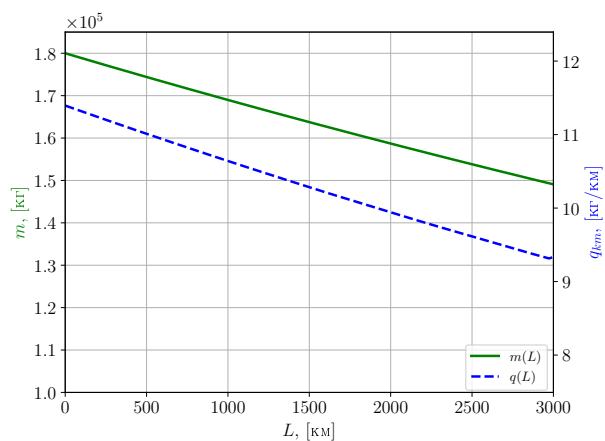


Рисунок 3.4 — График зависимости  $q(L)$  и  $m(L)$

### 3.3.3. Эшелонированный полет, высота меняется ступенчато с шагом 300 м.

Таблица 3.3 — Полученные параметры

$q_{\text{км ср}}, \frac{\text{кг}}{\text{км}}$	$L, \text{ м}$	$m_{\text{изр}}, \text{ кг}$	$t_{\text{кр}}, \text{ мин}$
10.317	3000	30949.65	276.87

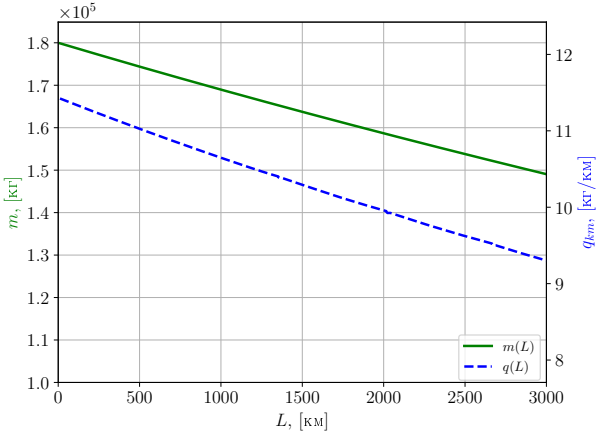
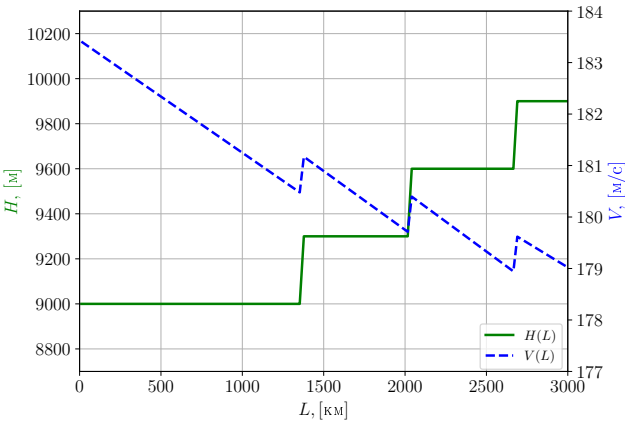


Рисунок 3.5 — График зависимости  $H(L)$  и  $V(L)$

Рисунок 3.6 — График зависимости  $q(L)$  и  $m(L)$

$m$ , тонн		$H$ , м											
		7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000	11500	12000	12500
100.0	$M$	0.522	0.53	0.538	0.544	0.551	0.557	0.563	0.568	0.574	0.58	0.586	0.593
	$q_{km}$	9.1	8.633	8.193	7.781	7.399	7.048	6.73	6.446	6.198	5.987	5.816	5.685
	$V$	162.887	164.565	165.788	166.669	167.322	167.86	168.397	169.046	169.921	171.135	172.802	175.035
110.0	$M$	0.531	0.54	0.547	0.553	0.56	0.565	0.571	0.576	0.582	0.588	0.594	0.602
	$q_{km}$	9.37	8.933	8.511	8.11	7.737	7.4	7.104	6.856	6.664	6.534	6.473	6.488
	$V$	165.694	167.441	168.643	169.436	169.962	170.357	170.762	171.316	172.157	173.424	175.257	177.794
120.0	$M$	0.54	0.548	0.555	0.561	0.567	0.572	0.578	0.583	0.589	0.596	0.603	0.61
	$q_{km}$	9.703	9.257	8.835	8.444	8.092	7.787	7.538	7.353	7.241	7.209	7.266	7.42
	$V$	168.489	170.031	171.068	171.738	172.178	172.523	172.912	173.481	174.366	175.705	177.634	180.29
130.0	$M$	0.548	0.555	0.561	0.567	0.573	0.579	0.585	0.591	0.597	0.603	0.61	-
	$q_{km}$	10.087	9.595	9.166	8.801	8.5	8.263	8.088	7.977	7.93	7.945	8.023	-
	$V$	170.852	172.198	173.117	173.73	174.161	174.533	174.969	175.592	176.525	177.892	179.815	-
140.0	$M$	0.555	0.561	0.567	0.574	0.58	0.586	0.591	0.597	0.603	0.61	-	-
	$q_{km}$	10.461	9.95	9.537	9.215	8.975	8.808	8.706	8.661	8.663	8.705	-	-
	$V$	173.032	174.089	174.902	175.54	176.07	176.56	177.079	177.695	178.476	179.491	-	-
150.0	$M$	0.56	0.567	0.574	0.58	0.586	0.592	0.598	0.604	0.61	-	-	-
	$q_{km}$	10.814	10.355	9.985	9.703	9.506	9.39	9.352	9.391	9.501	-	-	-
	$V$	174.976	175.946	176.746	177.414	177.992	178.518	179.032	179.575	180.185	-	-	-
160.0	$M$	0.567	0.573	0.58	0.586	0.592	0.598	0.604	0.61	-	-	-	-
	$q_{km}$	11.22	10.821	10.493	10.243	10.081	10.017	10.059	10.215	-	-	-	-
	$V$	176.935	177.858	178.597	179.208	179.745	180.265	180.822	181.47	-	-	-	-
170.0	$M$	0.572	0.579	0.586	0.591	0.597	0.603	0.61	-	-	-	-	-
	$q_{km}$	11.664	11.324	11.035	10.82	10.705	10.714	10.871	-	-	-	-	-
	$V$	178.694	179.698	180.418	180.96	181.43	181.934	182.577	-	-	-	-	-
180.0	$M$	0.578	0.585	0.591	0.597	0.602	0.609	-	-	-	-	-	-
	$q_{km}$	12.123	11.864	11.617	11.437	11.382	11.509	-	-	-	-	-	-
	$V$	180.396	181.448	182.111	182.568	183.003	183.598	-	-	-	-	-	-
190.0	$M$	0.583	0.59	0.596	0.602	0.607	-	-	-	-	-	-	-
	$q_{km}$	12.598	12.448	12.24	12.098	12.146	-	-	-	-	-	-	-
	$V$	182.047	183.132	183.71	184.086	184.564	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 3.4 — Оптимальные параметры крейсерского полета

### 3.3.4. Анализ результатов

Таблица 3.5 — Результаты расчетов

Режим	$m_{\text{изр}}, \text{ км}$	$T$	$q_{\text{кмср}}, \frac{\text{кг}}{\text{км}}$
Полет на $H = 8500 \text{ м}$	31281.73	4 ч. 38 мин.	10.427
Полет по оптимальной траектории	30915	4 ч. 37 мин.	10.305
Полет эшелонированный полет $\Delta H = 300 \text{ м}$	30949.65	4 ч. 36 мин.	10.317

Результаты расчетов по нахождению  $q_{\text{км}_{\min}}$  минимального километрово-го расхода топлива сведены в таблицу 3.4.

1. Исходя из расчетов по мере уменьшения массы скорость уменьшается, а высота для поддержания  $q_{\text{км}_{\min}}$  увеличивается.
2. Оптимальная траектория набора представлена на рисунке 3.3.
3. Моменты смены эшелона выбрали, если между оптимальной высотой и текущей будет разница в 300 м., тогда производим набор высоты на  $\Delta H = H_{\text{опт}} - H_{\text{кр}} = 300 \text{ м}$ .

### 3.4. Вывод

В данном разделе была получена траектория эшелонированного полета для обеспечения минимального расхода топлива. Такая траектория с исходными данными самолета прототипа дает разницу в 0.11 % по сравнению с оптимальной траекторией в количестве израсходованного топлива. Что дает разницу в избытке топлива на 10 полетов равной в 346.5 кг. К сравнению при

полете на одной высоте разница составляет 1.19 %, что дает избыток топлива на 10 полетов равный 3667 кг.

Отсюда следует, что экономически выгодно выполнять крейсерский полет на эшелоне, который обеспечивает минимум километрового расхода топлива.

## Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были определены:

1. Область располагаемых высот и скоростей;
2. Практический и статической потолок;
3. Определена траектория полета;
4. Транспортные возможности самолета;
5. Взлетно-посадочные характеристики;
6. Параметры правильного виража;
7. Характеристики продольной устойчивости и управляемости.

В разделе по расчету летно-технических характеристик.

Также была синтезирована система стабилизации высоты в тангажном варианте. Добились устойчивости системы на всем диапазоне скоростных напоров. И выполнили линейный и нелинейный анализ системы.

Проведено исследование характеристик эшелонированного полета. Были получены результаты расхода топлива на протяжении всего крейсерского полета для различных программ полета с учетом выгорания топлива.

## Список литературы

1. Динамика полета: Учебник для студентов высших учебных заведений / А.В. Ефремов, В.Ф. Захарченко, В.Н. Овчаренко и др.; под ред. Г.С. Бюшгенса. М.: Машиностроение, 2011. - 776с.
2. Управление полетом самолета: Учебное пособие для студентов высших технических учебных заведений / Ю.П. Гуськов, Г.И. Загайнов Г.И. М.: Машиностроение, 1991. - 272с.
3. Самолет Ил-76. Аэродинамика и динамика полета: Учебное пособие / Д.В. Верещиков, С.Н. Салтыков. Иркутск. ИВАИИ, 2002. - 102с.