AVION-50
Электрический БЛА самолётного типа грузоподъёмностью 50 кг

Расчётная записка (автоматически из src/calc_avion.py)

MTOW 121.0 кг; пустой 71.0 кг; S 3.03 м²; размах 6.03 м
V крейсер 26.7 м/с; V сваливания 20.5 м/с; K max 15.4
АКБ 0.01 кВт·ч, 30.7 кг; время 97 мин; дальность 155 км
Разбег+15 м 191 м; запас устойчивости 10.4 % САХ

Типы данных: ФАКТ — паспорт/источник; ПРИНЯТО — допущение;
РАСЧЁТ — вычислено; ВЫБОР — проектное решение.
Методы: Raymer [1], Anderson [3], McCormick [5], Егер [6], Knacke [11],
NeuralFoil/AeroSandbox [12,13]. Нумерация — по literature.md.

Параметр	Значение	Ед.	Тип	Комментарий
m_pay	50	кг	ТЗ	Полезная нагрузка = сбрасываемая единица (груз+тара+парашют) ИЛИ [...]
AR	12	—	ПРИНЯТО	Удлинение 12: компромисс индуктивного сопротивления и массы [...]
WS	40	кг/м²	ПРИНЯТО	Нагрузка на крыло 40 кг/м² → Vs≈17–19 м/с для грунтовой ВПП [...]
airfoil	Selig SD7062 (t	—	ПРИНЯТО	Сравнение 10 профилей NeuralFoil при Re≈9·10⁵ [...]
cell	21700 класс 4,	—	ОЦЕНКА	Ячейка 16,2 Вт·ч, 70 г (≈231 Вт·ч/кг) — по даташиту [...]
NS	24	S	ПРИНЯТО	24S: 86,4 В ном., 100,8 В макс.; токи ≤140 А при 12 кВт
k_pack	1.22	—	ОЦЕНКА	Масса пакета/масса ячеек (BMS, корпус, шины) [9]
NP	15	P	РАСЧЁТ	Минимальное число параллелей, при котором t≥95 мин (85% DoD) — [...]
n_cells	360	шт	РАСЧЁТ	
E_bat	5.832	кВт·ч	РАСЧЁТ	Энергия АКБ (номинал)
m_bat	30.74	кг	РАСЧЁТ	Масса АКБ с BMS
e_pack	189.7	Вт·ч/кг	РАСЧЁТ	Удельная энергия пакета
MTOW	121	кг	РАСЧЁТ	Взлётная масса = пустой с АКБ + 50 кг (итерация S↔масса)
m_empty	71.04	кг	РАСЧЁТ	Масса пустого с АКБ
payload_frac	0.4131	—	РАСЧЁТ	Весовая отдача по грузу
S	3.026	м²	РАСЧЁТ	Площадь крыла = MTOW / (W/S)
b	6.026	м	РАСЧЁТ	Размах
c_root	0.6016	м	РАСЧЁТ	Хорда центроплана (прямоуг. до y=±0,80 м)
c_tip	0.3309	м	РАСЧЁТ	Концевая хорда (λ=0,55 консоли)
MAC	0.5182	м	РАСЧЁТ	САХ
y_MAC	1.354	м	РАСЧЁТ	Положение САХ по размаху
e_Oswald	0.706	—	РАСЧЁТ	Raymer (12.48): e=1,78(1−0,045A^0,68)−0,64 [1]
CD0	0.02795	—	РАСЧЁТ	Компонентный метод Raymer гл.12 (Cf турб., FF, Q), V=27 м/с
K_ind	0.03757	—	РАСЧЁТ	K=1/(πAe)
LD_max	15.43	—	РАСЧЁТ	Аэродин. качество макс. = 1/(2√(CD0·K))
CL_LDmax	0.8625	—	РАСЧЁТ	
Re_cruise	9.581e+05	—	РАСЧЁТ	Re по САХ на 27 м/с
clmax_2d	1.69	—	РАСЧЁТ	NeuralFoil SD7062 [8, 19]
clmax_2d_flap	1.993	—	РАСЧЁТ	С щелевым-простым закрылком 20°, шарнир 72% хорды (NeuralFoil, ОЦЕНКА)
CLmax	1.521	—	РАСЧЁТ	Крыло без механизации: 0,9·cl_max (Raymer 12.15 для A>8)
CLmax_flap	1.676	—	РАСЧЁТ	С закрылками 20° на 62% размаха, Kλ=0,92 [1, гл.12.4]
V_stall	20.52	м/с	РАСЧЁТ	Скорость сваливания, без закрылков
V_stall_flap	19.55	м/с	РАСЧЁТ	Скорость сваливания, закрылки 20°
CLalpha_VLM	5.606	1/рад	РАСЧЁТ	VLM AeroSandbox [19]: крыло+ГО, 0…6°

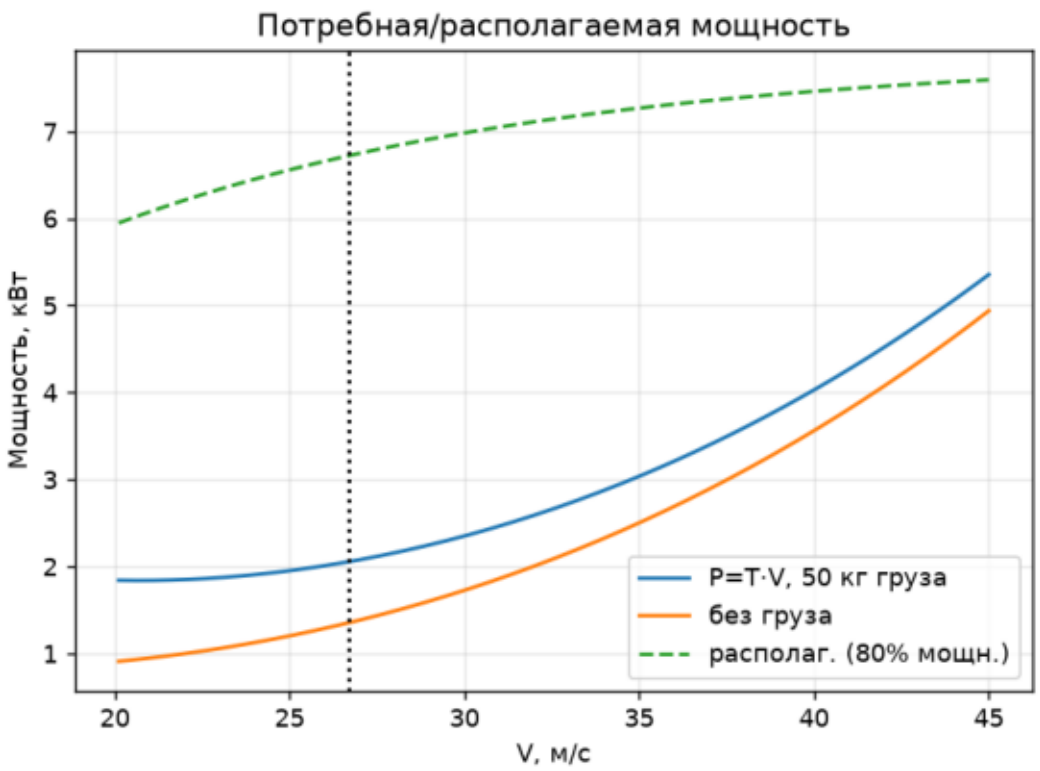
Параметр	Значение	Ед.	Тип	Комментарий
VLM_points	[(0, 0.391), (2,	α°,CL	РАСЧЁТ	Точки VLM
V_minP	20.74	м/с	РАСЧЁТ	Скорость наименьшей мощности (макс. продолжительность)
V_maxLD	27.24	м/с	РАСЧЁТ	Скорость макс. качества (макс. дальность в штиль)
V_cruise	26.7	м/с	ПРИНЯТО	Крейсерская = max(1,25·V_minP; 1,3·Vs) — запас по сваливанию в [...]
CL_cruise	0.8984	—	РАСЧЁТ	
D_cruise	76.99	Н	РАСЧЁТ	Потребная тяга на крейсере
P_req_cruise	2056	Вт	РАСЧЁТ	Потребная (полезная) мощность T·V
eta_prop_cruise	0.7807	—	РАСЧЁТ	КПД винта: идеальный (импульсная теория) × профильный 0,83 [5]
P_shaft_cruise	2633	Вт	РАСЧЁТ	
P_el_cruise	3071	Вт	РАСЧЁТ	Электрич. мощность (ηмот 0,92, ηESC 0,97, ηпров 0,98) + 60 Вт авионика
DoD	0.85	—	ПРИНЯТО	Используемая глубина разряда (резерв 15% на посадку/уход)
t_cruise	96.85	мин	РАСЧЁТ	Время полёта на крейсере с грузом 50 кг (весь полёт с грузом — [...]
Range	155.2	км	РАСЧЁТ	Дальность в штиль на крейсере с грузом
P_shaft_max	1.2e+04	Вт	ПРИНЯТО	Макс. мощность на валу (взлёт ≤2 мин); класс мотора 12 кВт
T_static	541.3	Н	РАСЧЁТ	Статическая тяга (актуатор-диск, ηv=0,83 ~ FM)
T_W_static	0.456	—	РАСЧЁТ	
mu_ground	0.08	—	ПРИНЯТО	Грунт с короткой травой [1, табл.17.1]
V_LO	21.5	м/с	РАСЧЁТ	Скорость отрыва 1,1·Vs(закр.)
s_ground	92.19	м	РАСЧЁТ	Разбег (численное интегрирование, грунт μ=0,08, закрылки 20°)
s_TO15	190.6	м	РАСЧЁТ	Взлётная дистанция до h=15 м (Raymer гл.17)
gamma_climb	11.81	°	РАСЧЁТ	Угол набора после отрыва
V_app	25.41	м/с	РАСЧЁТ	Заход 1,3 Vs
s_land	286.4	м	ОЦЕНКА	Посадочная дистанция с 15 м: глиссада 5°, задержка 1,5 с, [...]
ROC_0	3.939	м/с	РАСЧЁТ	Макс. скороподъёмность у земли на 80% мощности (продолжит.)
H_service	6000	м	РАСЧЁТ	Практический потолок (ROC=0,5 м/с), 80% мощности, МСА; [...]
V_max	51.68	м/с	РАСЧЁТ	Макс. горизонтальная скорость у земли, 80% мощности
D_prop	0.914	м	ПРИНЯТО	Винт 36×20" (Ø0,914 м, шаг 0,508 м), 2 лопасти, CFRP; зазор до [...]
rpm_cruise	3063	об/мин	ОЦЕНКА	Из баланса мощности Cp(J)·ρn³D⁵=P, Cp0=0,052, J0=0,80 (ОЦЕНКА по [5])
rpm_TO	3996	об/мин	РАСЧЁТ	Взлётные обороты; Vtip=191 м/с (M≈0.56)
Kv	51.71	об/мин/В	РАСЧЁТ	Kv мотора: обороты взлёта / (24S×3,5 В под нагрузкой ×0,92)
Q_TO	28.68	Н·м	РАСЧЁТ	Момент на валу на взлёте
I_TO	164.8	А	РАСЧЁТ	Ток АКБ на взлёте (24S, 3,4 В/яч под нагрузкой)
C_rate_TO	2.441	С	РАСЧЁТ	Токовая нагрузка на ячейку (P45B допускает ~45 А = 10C [17])
I_cruise	35.54	А	РАСЧЁТ	

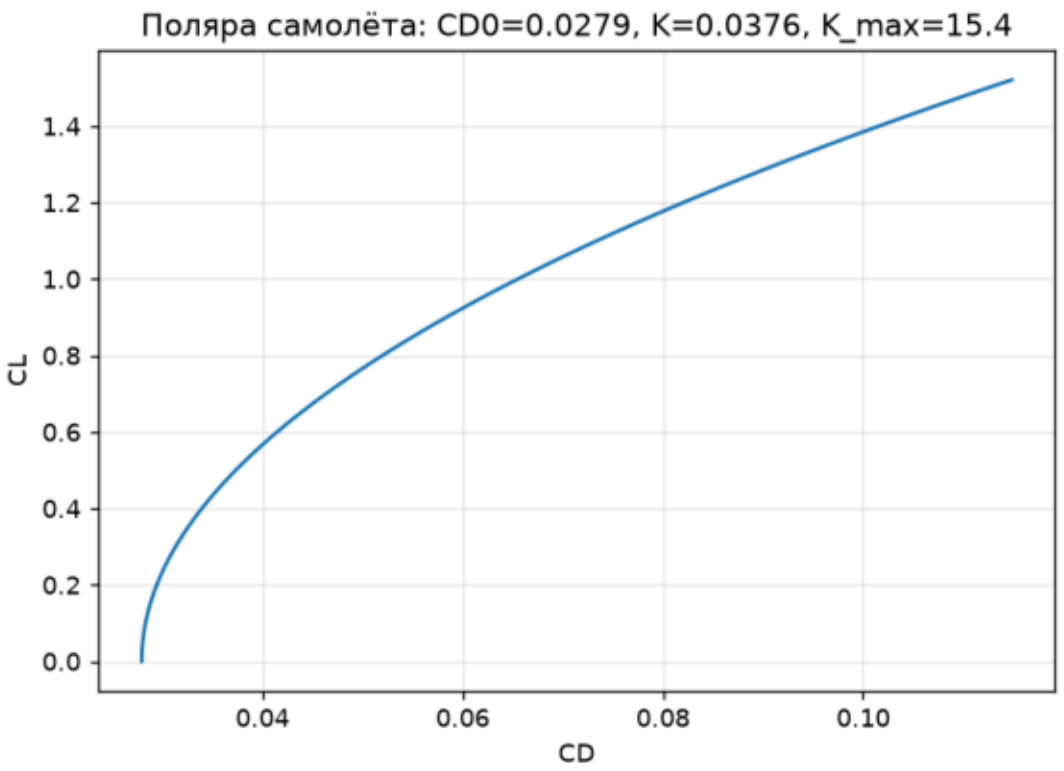
Параметр	Значение	Ед.	Тип	Комментарий
E_mission	3022	Вт·ч	РАСЧЁТ	Миссия: радиус 45 км, сброс 50 кг на 150 м, возврат, 5 мин […]
mission_margin	1.64	—	РАСЧЁТ	Запас энергии миссии (>1 — выполнимо)
R_radius_max	81.64	км	РАСЧЁТ	Макс. радиус доставки (туда с грузом, обратно пустым, резерв 15% […]
t_mission	66.18	мин	РАСЧЁТ	
t_empty_endurance	158.5	мин	РАСЧЁТ	Продолжительность без груза (аэросъёмка на 0,9·Vcr)
CLa_wing	5.098	1/рад	РАСЧЁТ	DATCOM/Helmbold [1, 12.6]
x_LE	0.95	м	ПРИНЯТО	Передняя кромка крыла от носа
S_h	0.3329	м²	РАСЧЁТ	ГО: 11% S (подбор под SM≈10–15% САХ с грузом)
b_h	1.9	м	ПРИНЯТО	Размах ГО (между балками 1,60 м + законцовки)
c_h	0.1752	м	РАСЧЁТ	Хорда ГО
deps_da	0.2705	—	РАСЧЁТ	Скос потока dε/dα=2CLα/(πA) [1, 16.3]
Cma_fus	0.208	1/рад	РАСЧЁТ	Фюзеляж, Raymer 16.25, Kf=0,012 (крыло на 40% длины)
x_NP	1.194	м	РАСЧЁТ	Нейтральная точка (от носа)
x_NP_MAC	47.05	% САХ	РАСЧЁТ	
V_h	0.4289	—	РАСЧЁТ	Коэф. статич. момента ГО (типично 0,5–0,7 [1, табл.6.4])
S_v	0.227	м²	РАСЧЁТ	Два киля суммарно
V_v	0.02577	—	РАСЧЁТ	Коэф. статич. момента ВО (типично 0,02–0,04 [1])
cg_source	ЦМ агрегатов		РАСЧЁТ	
x_cg_empty	1.098	м	РАСЧЁТ	ЦМ пустого (с АКБ) по положениям агрегатов из 3D-модели
x_cg_empty_MAC	28.48	% САХ	РАСЧЁТ	
x_bat	0.72	м	ПРИНЯТО	ЦМ АКБ (салазки, регулировка ±50 мм для балансировки)
x_payload	1.2	м	ПРИНЯТО	ЦМ контейнера (отсек x=0,975…1,425 м, сразу за АКБ); после […]
H_service_note	≥6000 м — вер		ОЦЕНКА	
CG_table	(таблица)		РАСЧЁТ	Центровка и запас устойчивости
SM_design	10.41	% САХ	РАСЧЁТ	Статический запас с грузом по центру (норма 5–15% [1, 16.3])
payload_cg_window	-145 … +67	мм	РАСЧЁТ	Допустимое смещение ЦМ груза 50 кг (SM 5…22% САХ)
Cm0_wing	-0.07394	—	РАСЧЁТ	Cm_0 крыла (NeuralFoil ×0,9)
CL_h_trim	0.08185	—	РАСЧЁТ	Балансировочный CL ГО на крейсере (отриц. — вниз); |CLh|<0,5 — […]
n_max	3.8	—	ПРИНЯТО	Эксплуатационная перегрузка (АП-23 норм. категория для W>…: 3,8) [13]
n_min	-1.5	—	ПРИНЯТО	
f_safety	1.5	—	ПРИНЯТО	Коэф. безопасности 1,5 [13]
V_D	37.38	м/с	ПРИНЯТО	Расчётная предельная скорость 1,4·Vcr
n_gust	3.347	—	РАСЧЁТ	Порыв Ude=15,24 м/с на Vc (Pratt, АП-23.341) [13]; меньше 3,8 → […]
V_A	40	м/с	РАСЧЁТ	Манёвренная скорость

Параметр	Значение	Ед.	Тип	Комментарий
M_root_ult	4162	Н·м	РАСЧЁТ	Расч. изгибающий момент в корне полукрыла (n=5,7, Шренк, [...]
Q_root_ult	3167	Н	РАСЧЁТ	Перерезывающая сила в корне
M_joint_ult	2040	Н·м	РАСЧЁТ	Момент в разъёме центроплан–консоль (y=0,80 м)
E_UD	115	ГПа	ОЦЕНКА	Модуль UD-полки (Vf 55%, лента 12K T700 инфузия) [16]
sigma_allow_c	520	МПа	ОЦЕНКА	Допускаемое сжатие UD с учётом ударного/влаги (B-база ×0,7 [...]
spar_cap_root	2.5	мм	РАСЧЁТ	Толщина полки в корне (10 слоёв UD по 0,25 мм), ширина 45 мм
spar_cap_joint	1.25	мм	РАСЧЁТ	Толщина полки в разъёме
spar_web	0.6	мм	РАСЧЁТ	Стенки ±45° (2 шт), корень
spar_h_root	77	мм	РАСЧЁТ	Строит. высота лонжерона в корне
EI_root	3.728e+04	Н·м²	РАСЧЁТ	Изгибная жёсткость лонжерона в корне
sigma_max_ult	515.3	МПа	РАСЧЁТ	Макс. напряжение в полке при расчётной нагрузке (≤520)
RF_spar	1.009	—	РАСЧЁТ	Резерв прочности полки при n_ult
tip_defl_1g	75.97	мм	РАСЧЁТ	Прогиб конца крыла, 1g
tip_defl_ult	433.1	мм	РАСЧЁТ	Прогиб при расчётной нагрузке (14.4% полуразмаха)
m_spar	1.543	кг	РАСЧЁТ	Масса лонжерона (оба полукрыла, без вклеек) — входит в массу крыла
joiner	труба CFRP Ø5		ПРИНЯТО	Соединение консоль–центроплан + 2 болта M6 (задний узел, кручение)
sigma_joiner	331	МПа	РАСЧЁТ	Напряжения в трубе-шпильке при n_ult (допуск. ~600 МПа для [...]
F_wing_bolt	2059	Н	РАСЧЁТ	Растяжение на болт крепления крыла (фюзеляж+груз висят на [...]
RF_bolt_M8	17.28	—	РАСЧЁТ	Болт M8 кл.12.9: As=36,6 мм², Rp0,2=1080 МПа ×0,9
bearing_wing	32.17	МПа	РАСЧЁТ	Смятие во втулке (Al D16 Ø8, длина 8 мм) — допускаемое для CFRP [...]
boom	труба CFRP Ø6		ПРИНЯТО	E_x≈90 ГПа (ОЦЕНКА)
boom_mass	2.016	кг	РАСЧЁТ	Масса двух балок (без узлов)
L_h_max	128.2	Н	РАСЧЁТ	Макс. нагрузка ГО на балку на V_D (CLh 0,9) — эксплуат.
M_boom_ult	500.6	Н·м	РАСЧЁТ	Расч. изгибающий момент в корне балки (вертик.+боков.)
sigma_boom	127.3	МПа	РАСЧЁТ	Напряжения изгиба (допуск. 400 МПа для [0/±45])
tau_boom	3.889	МПа	РАСЧЁТ	Касательные от кручения (киль, плечо 0,30 м)
f_boom	8.322	Гц	РАСЧЁТ	1-я изгибная частота балки с оперением
f_prop_1P	51.05	Гц	РАСЧЁТ	Частота вращения винта (крейсер); 2P = 102 Гц — отстройка ≥20% [...]
boom_defl	48.95	мм	РАСЧЁТ	Прогиб конца балки при эксплуат. нагрузке ГО
M_gyro	13.11	Н·м	РАСЧЁТ	Гироскопический момент винта при ωтангажа 1 рад/с
F_motor_bolt	1406	Н	РАСЧЁТ	Макс. растяжение болта M5 (4 шт на R35) моторамы: тяга, вес×n, [...]
RF_M5	9.091	—	РАСЧЁТ	Болт M5 кл.10.9 As=14,2 мм²
F_main_gear_ult	2671	Н	РАСЧЁТ	Расч. нагрузка на одну основную стойку (n_пос=3, k=1,5)
frame_W_req	1202	мм³	РАСЧЁТ	Потребный момент сопротивления узла шпангоута-рессоры (σ=400 МПа)

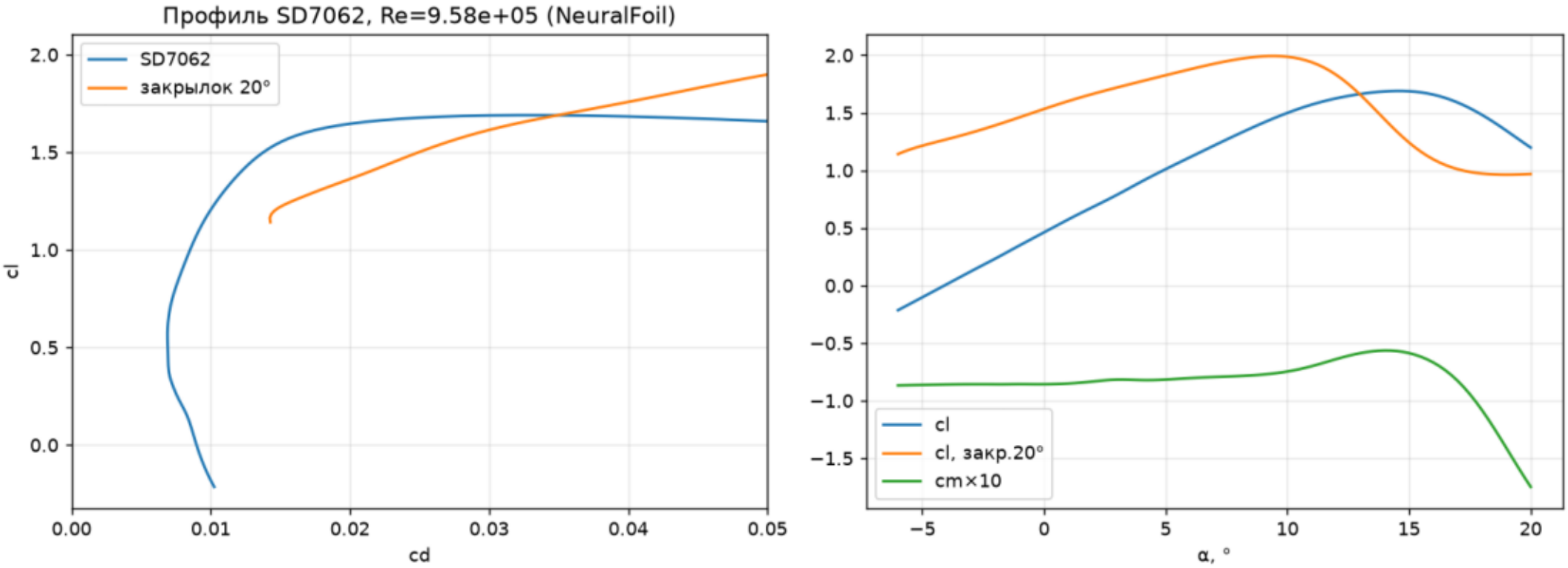
Параметр	Значение	Ед.	Тип	Комментарий
v_descent	5.5	м/с	ПРИНЯТО	Скорость снижения у земли 5,5 м/с (≈прыжок с 1,5 м) — тара с […]
Cd_canopy	0.8	—	ПРИНЯТО	Купол плоский круглый (flat circular), CD0≈0,75–0,80 по S0 [11]
S0_canopy	33.08	м²	РАСЧЁТ	Площадь купола S0=2mg/(ρv²CD)
D0_canopy	6.49	м	РАСЧЁТ	Номинальный диаметр
N_lines	24	шт	ПРИНЯТО	Число строп = число клиньев (кратно 4)
L_lines	6.49	м	ПРИНЯТО	Длина строп Ls=1,0·D0 [11]
V_drop	26.7	м/с	ПРИНЯТО	Скорость сброса = крейсерская (возможно снижение до 1,3·Vs с […]
F_open	6067	Н	ОЦЕНКА	Сила раскрытия: q·CD·S0·Cx(1,5)·X1(0,35) — конечная масса [11]
F_line_req	758.3	Н	РАСЧЁТ	Потребная прочность стропы (k=1,5×2,0 неравномерность/износ)
line_choice	Шнур Kevlar/Dy		ПРИНЯТО	≥ F_line_req с запасом
m_chute	2.673	кг	РАСЧЁТ	Масса купола (ткань 40 г/м² ×1,2) + стропы + звено
V_pack	5.94	л	РАСЧЁТ	Объём укладки (плотность 450 кг/м³)
drop_t_fall	26.09	с	РАСЧЁТ	Время спуска со 150 м (штиль)
drop_x_throw	49.88	м	РАСЧЁТ	Вынос по курсу в штиль (сброс 150 м)
drop_x_wind5	171.6	м	РАСЧЁТ	Вынос при попутном ветре 5 м/с
drop_x_head5	-73.4	м	РАСЧЁТ	Вынос при встречном ветре 5 м/с
h_drop_min	50	м	РАСЧЁТ	Мин. высота сброса (купол наполнен + ≥4 с установившегося […]
v_land	5.485	м/с	РАСЧЁТ	Вертикальная скорость касания со 150 м
F_hook_ult	2795	Н	РАСЧЁТ	Расчётная нагрузка замка (n_ult=5,7)
F_servo_release	69.87	Н	РАСЧЁТ	Усилие на тяге серво для открытия (трение 0,15, рычаг 1:6)
servo_torque_req	16.03	кгс·см	РАСЧЁТ	Потребный момент сервопривода (плечо 15 мм, запас 1,5)
GSD_150	1.611	см/пкс	РАСЧЁТ	GSD на 150 м: H·p/f, полнокадр. 61 Мп, p=3,76 мкм, f=35 мм […]
GSD_300	3.223	см/пкс	РАСЧЁТ	GSD на 300 м: H·p/f, полнокадр. 61 Мп, p=3,76 мкм, f=35 мм […]
GSD_500	5.371	см/пкс	РАСЧЁТ	GSD на 500 м: H·p/f, полнокадр. 61 Мп, p=3,76 мкм, f=35 мм […]
swath_300	306	м	РАСЧЁТ	Ширина полосы на 300 м
t_exp_max	0.0006035	с	РАСЧЁТ	Макс. выдержка для смаза ≤0,5 GSD на 300 м
vib_req	≤0,5 g СКЗ в 2		ПРИНЯТО	Демпферы подвеса с собственной частотой ≤ 1/√2·1Р

Поляра и потребная мощность от скорости

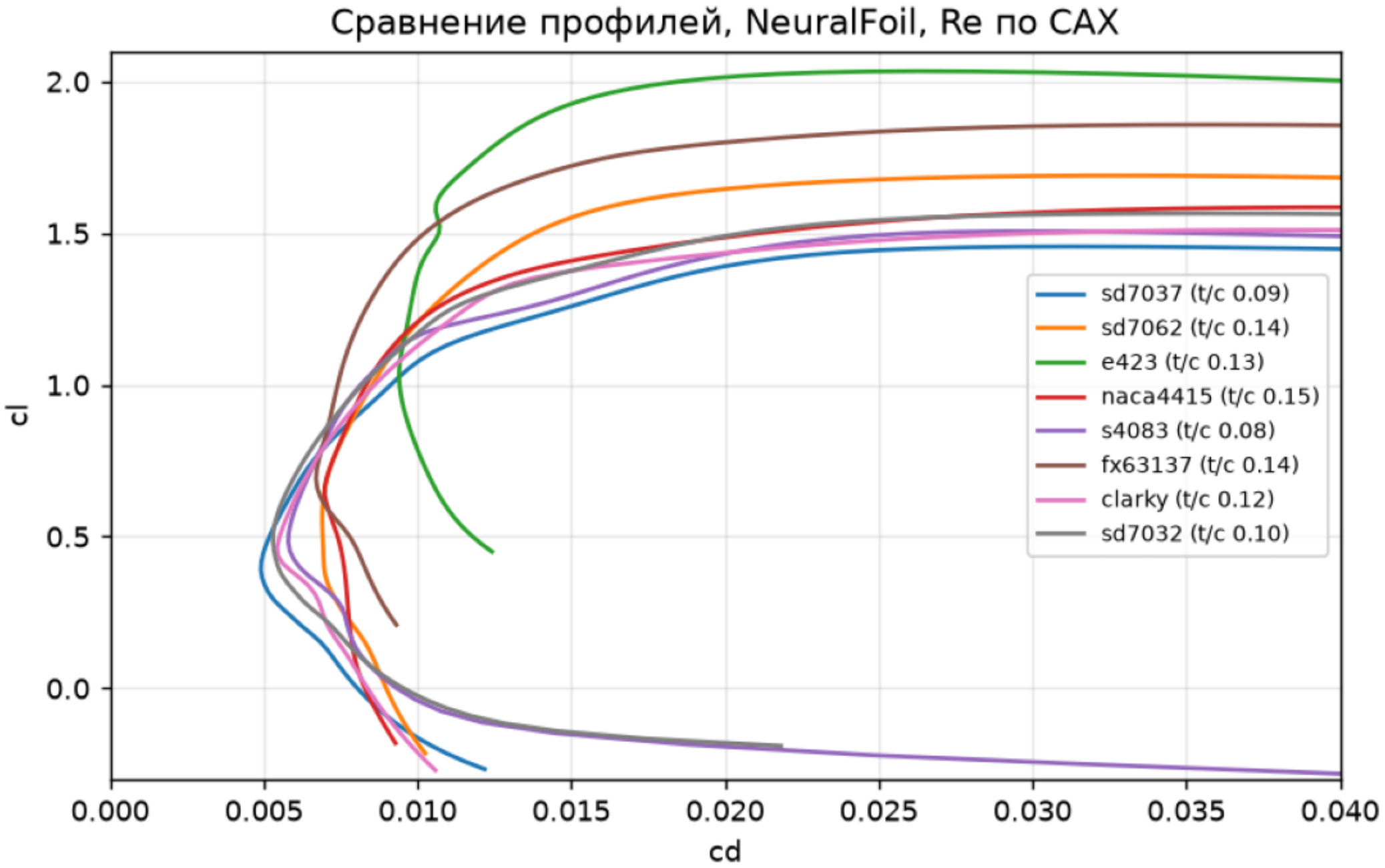




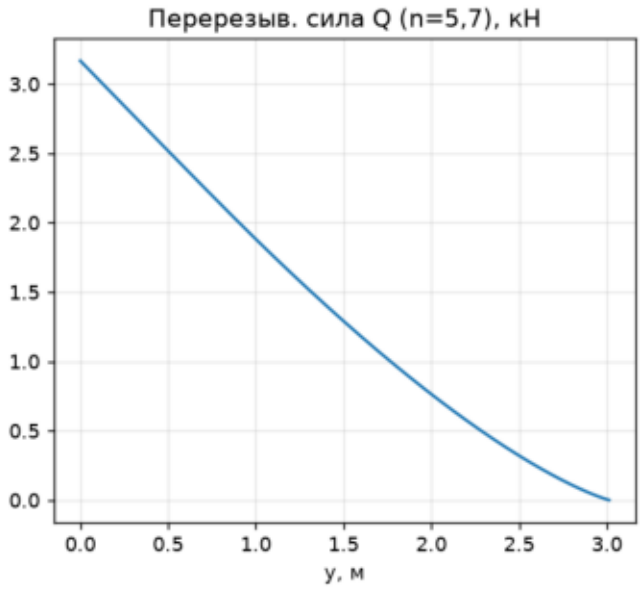
Профиль SD7062 (UIUC), характеристики NeuralFoil

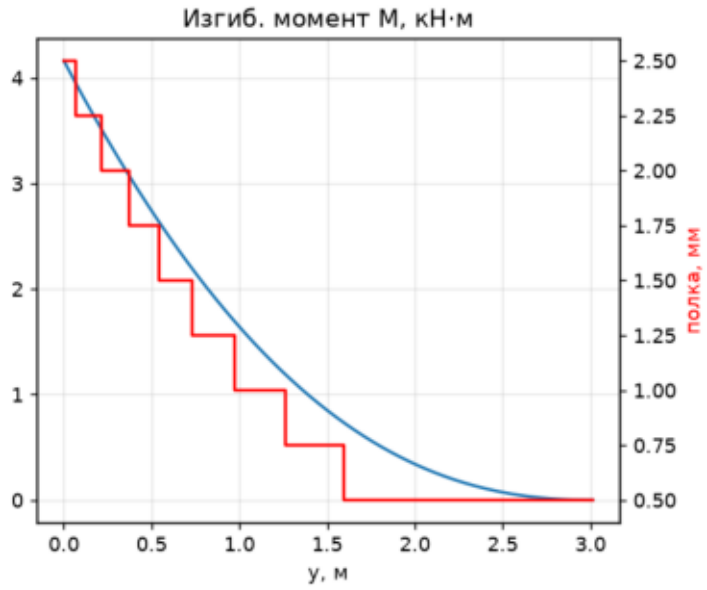


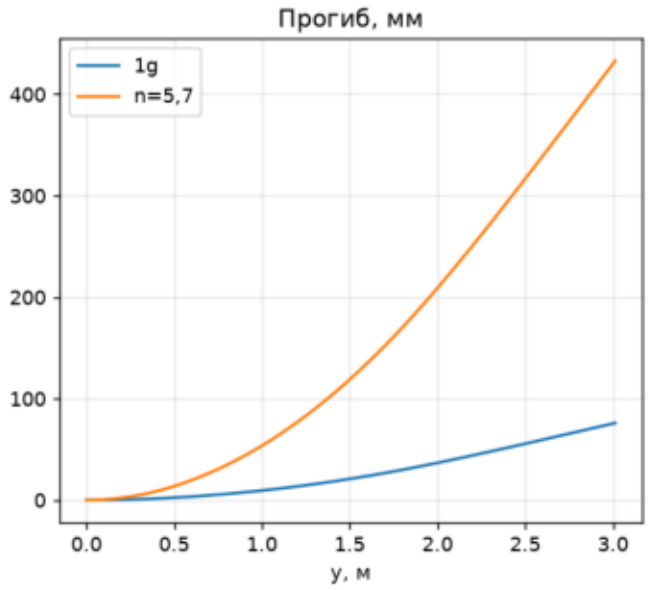
Сравнение профилей



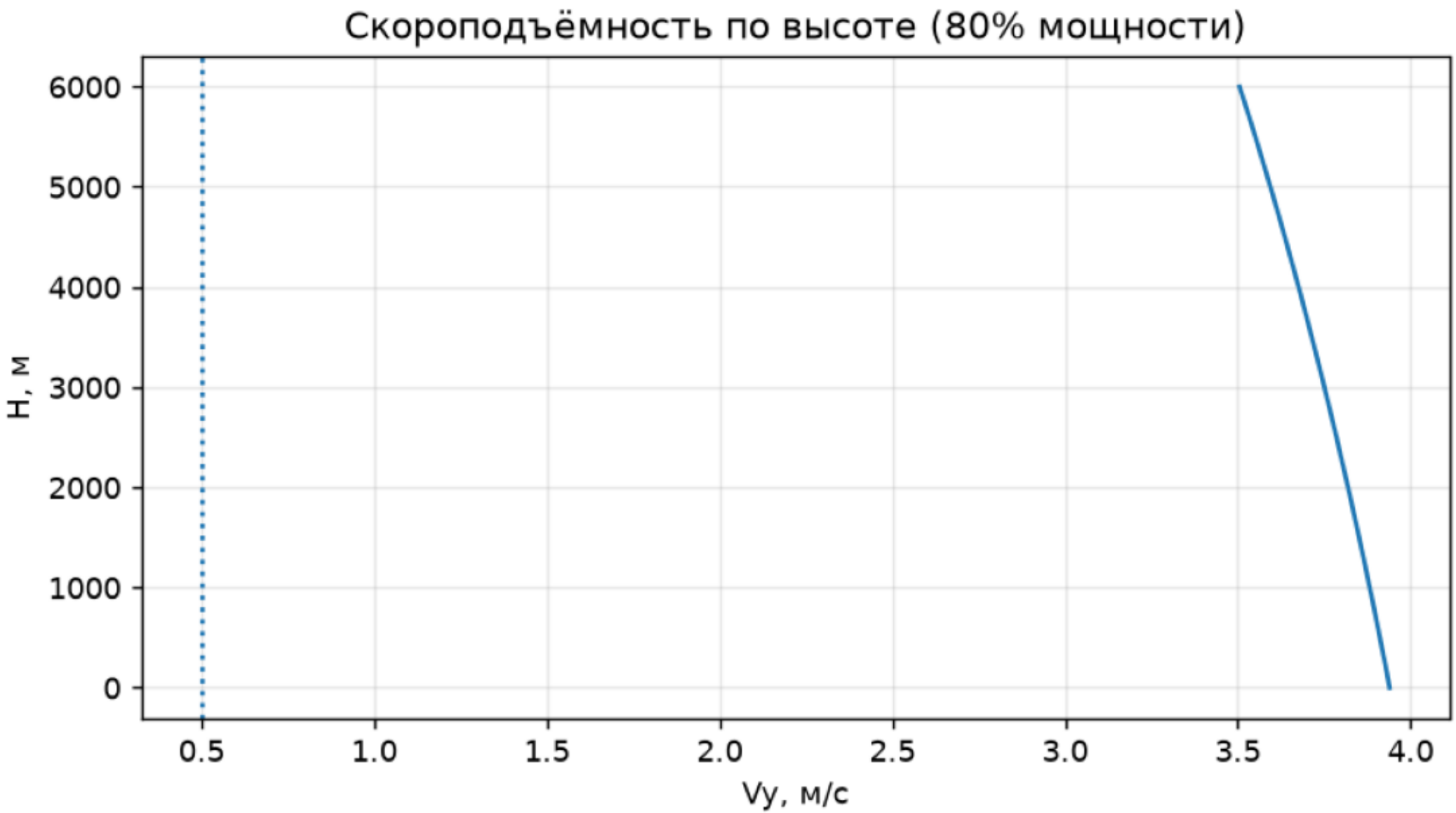
Нагрузки и лонжерон крыла (n=+3,8·1,5)



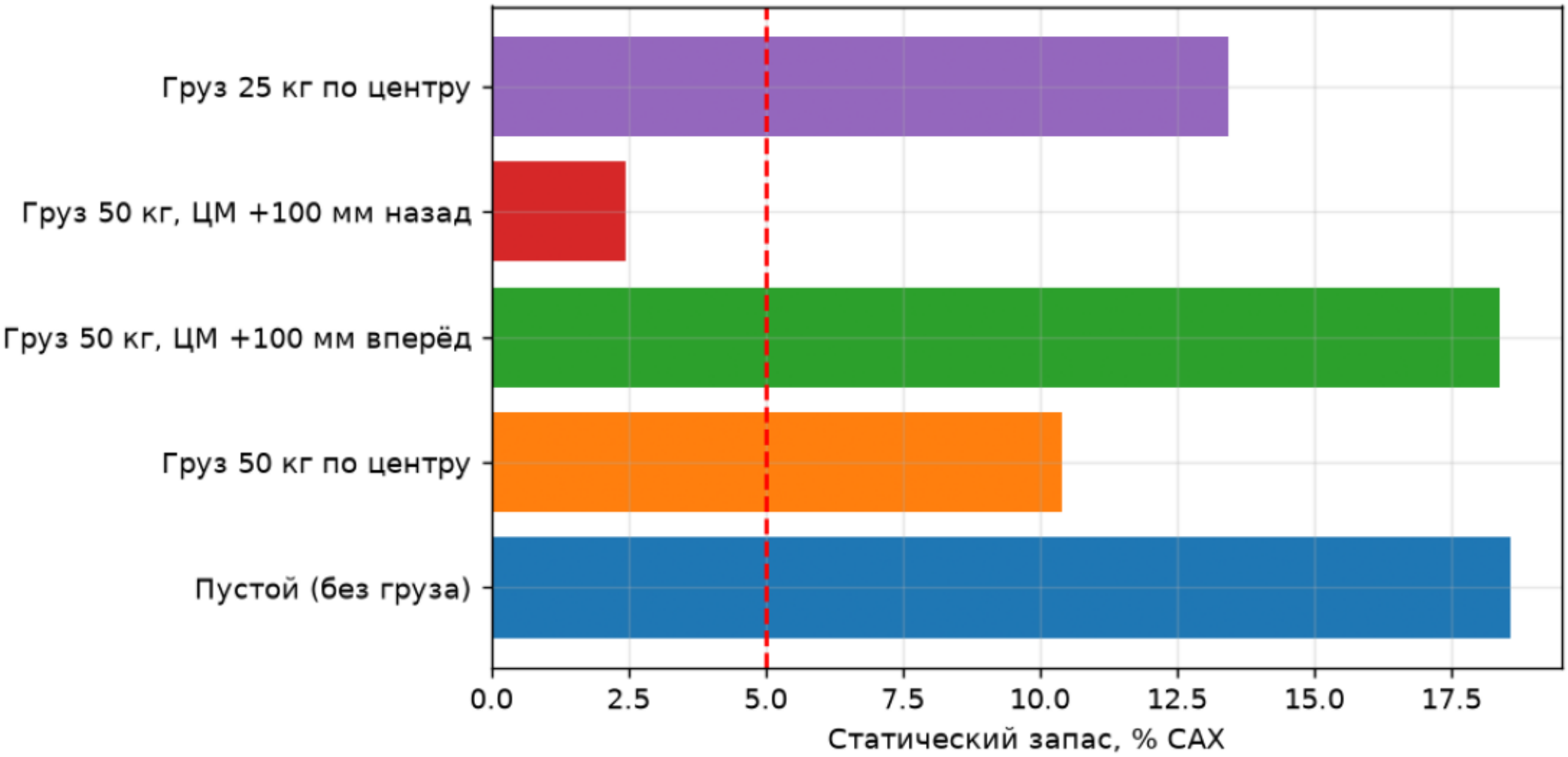




Набороподъёмность и потолок



Центровка и запас устойчивости



Траектория сброса груза на парашюте

