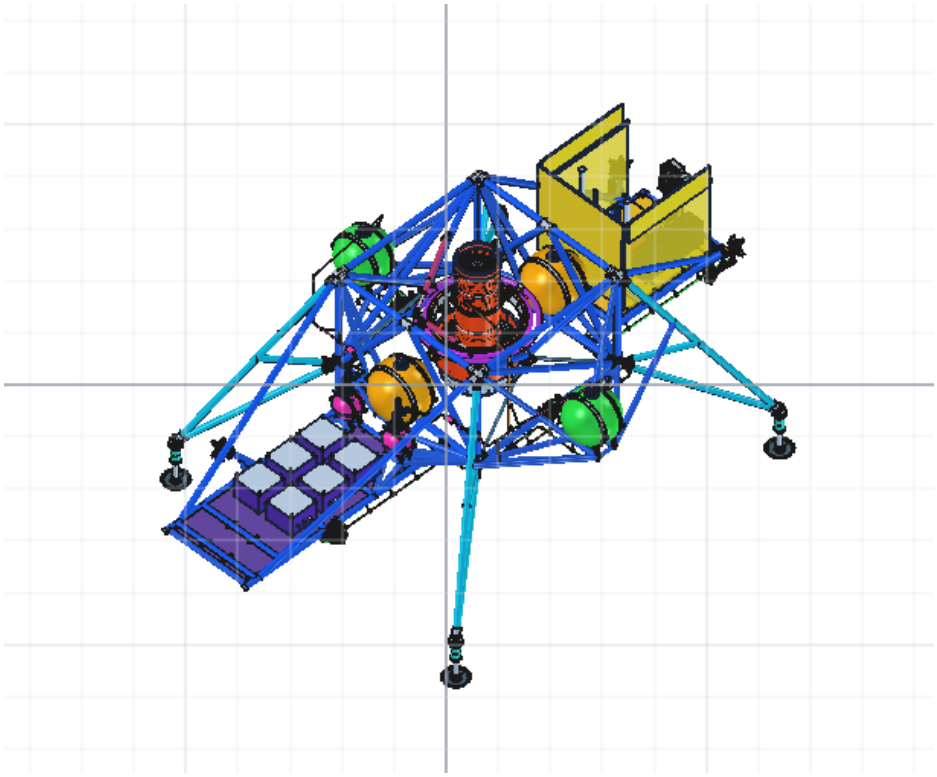
РЕЗУЛЬТАТ ВЫПУСКА

LLTV: от геометрии к проверяемой динамике

Реконструкция NASA 952. Численные проверки выполнены; точность воспроизведения исторического полёта остаётся открытой.



Архивный снимок нативной R4D.1 от 06.11.2026. Кадрированы пустые поля; геометрия и цвета сохранены. Это свидетельство формы, а не испытание.

Геометрия	Масса для расчётов	Статика	Траектории
19 каналов	1 768,418 кг / R4C	80 случаев	4 режима / 2 с

Что доказано: согласованы знаки и единицы, проверены ограничения и численные эталоны. **Что ещё нужно:** собственная массовая ревизия R4D.1, измеренные карты агрегатов, аэродинамика, жидкости, контакт и независимая запись полёта.

FCStd SHA-256: 7dc381fa76287df3a95466836f0e7f981ef8f78d9f5dce02485e6b42af4cce7d

Исходная CAD R4D.1 / полный архивный вид

УРОВЕНЬ 1 / ИНВЕНТАРИЗАЦИЯ

Силы, плечи и условные импульсы

В inventory извлечены CF700, два подъёмных и 16 RCS. Проверки: **64, все PASS**. Масса 1 768,418 кг содержит допущения R4C; это не новое взвешивание D1.

Корпусные оси: X вперёд, Y вправо, Z вниз; правая система. Сила аппарата направлена против истечения. $M = (r - r_{CG}) \times F$; $J = F \cdot \Delta t$ только для принятого прямоугольника.

Канал	F, Н	J за 0,1 с, Н·с	Момент относительно ЦТ, Н·м
CF700	18 680,000	1 868,000	-22,56; -36,67; -0,00
LIFT_L	2 220,000	222,000	2 217,32; -4,36; 0,00
LIFT_R	2 220,000	222,000	-2 222,68; -4,36; -0,00
THRUSTER_AL_1	266,893	26,689	202,52; -721,14; -0,00
THRUSTER_AL_2	266,893	26,689	0,00; 38,40; 202,52

Вертикаль не отменяет остаточный момент

При весе 17 342,260 Н идеальный CF700 компенсирует 14 451,883 Н. Установка линии тяги относительно ЦТ порождает моменты даже при земной вертикали двигателя. Поэтому три суммы сил и три суммы моментов проверяются совместно.

Природа величины	Допустимая интерпретация
Условные номиналы	CF700 ≤ 18 680 Н; каждый подъёмный 440…2 220 Н; RCS 266,893 Н. Нет установленной карты по режиму и атмосфере.
Импульс 0,1 с	Прямоугольный численный интеграл. Не измерены нарастание, спад и минимальный импульс клапана.
Полная инерция	Использована матрица R4C с внедиагональными членами; фиксированная масса и центровка.

Все 19 каналов и компоненты в СИ / channels.csv

Источник: inputs.json + результаты инвентаризации

Проверки единиц, отражения осей, импульсов и инерции

УРОВЕНЬ 2 / ИДЕАЛЬНЫЕ НЕПРЕРЫВНЫЕ СИЛЫ

80 статических случаев

HiGHS: **20 из 80** сочетаний имеют нулевой баланс всех шести компонент. STANDARD и TEST решаются отдельно, по восемь RCS. Оба подъёмных работают в заданных границах.

Поза	STANDARD: CF on	TEST: CF on	CF off
Ровное	ДА	ДА	НЕТ
Крен +2°	НЕТ	ДА	НЕТ
Крен -2°	НЕТ	ДА	НЕТ
Тангаж +2°	ДА	НЕТ	НЕТ
Тангаж -2°	ДА	НЕТ	НЕТ
Крен +5°	НЕТ	ДА	НЕТ
Крен -5°	НЕТ	ДА	НЕТ
Тангаж +5°	ДА	НЕТ	НЕТ
Тангаж -5°	ДА	НЕТ	НЕТ
Крен +2°, тангаж +2°	НЕТ	НЕТ	НЕТ

В STANDARD нет поперечной силы, в TEST нет продольной. Запрет неподвижной наклонённой позы не доказывает невозможность динамического прохода через неё. Полный JSON содержит также случаи по одному отказавшему каналу.

Банк / чистый момент	Крен, Н·м	Тангаж, Н·м	Рыскание, Н·м
STANDARD	-2 031,5 … 1 989,6	-1 475,3 … 1 407,2	-405,7 … 405,7
TEST	-2 031,5 … 1 989,6	-1 475,3 … 1 407,2	-1 441,2 … 1 441,2

Отрицательный контроль: все 40 случаев с CF700 off неразрешимы. Даже завышенная оценка всей подъёмной силы 6 575,146 Н ниже веса 17 342,260 Н. Отказ одного RCS сохраняет ровный trim, но уменьшает часть запасов.

Максимальная невязка: 1,53e-12 Н/Н·м; нарушение границ: 0 Н. Запасы осей получены разными LP и не реализуются одновременно. Предел кардана и динамическая устойчивость этой проверкой не установлены.

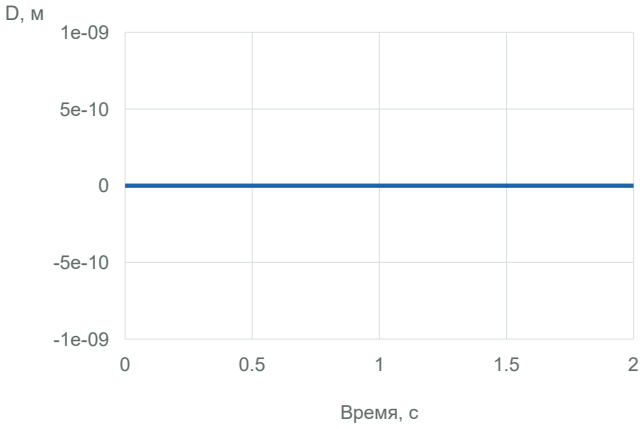
80 решений, ограничения, команды и 375 проверок / JSON + CSV

УРОВЕНЬ 3 / КВАТЕРНИОН И ПОЛНАЯ ИНЕРЦИЯ

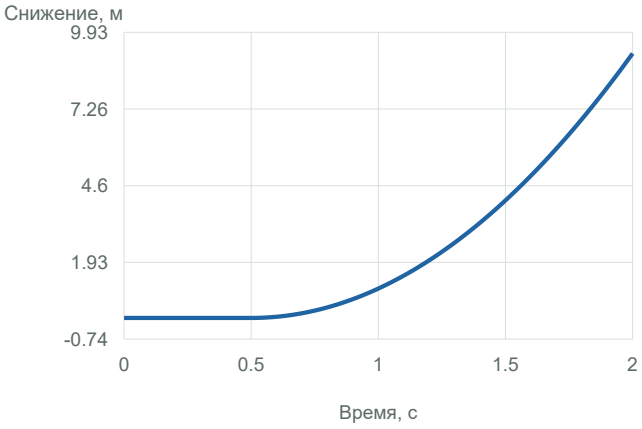
Четыре связанные траектории LLTV

13 состояний; DOP853; сила CF700 вертикальна в Земле, её момент относительно ЦТ учтён. STANDARD активен, TEST подавлен. Это новый расчёт по D1/R4C, не повтор R4B.

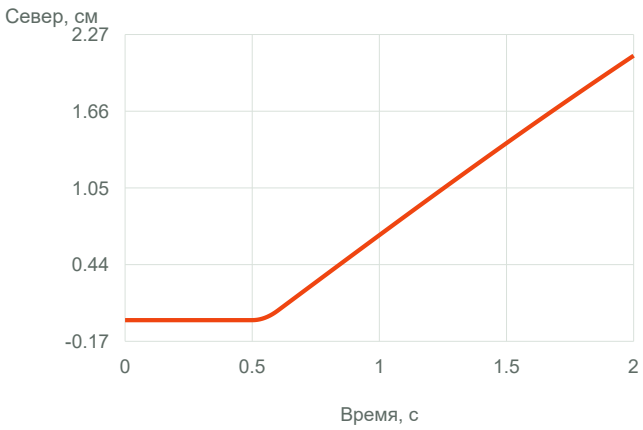
Ровный trim: D, м



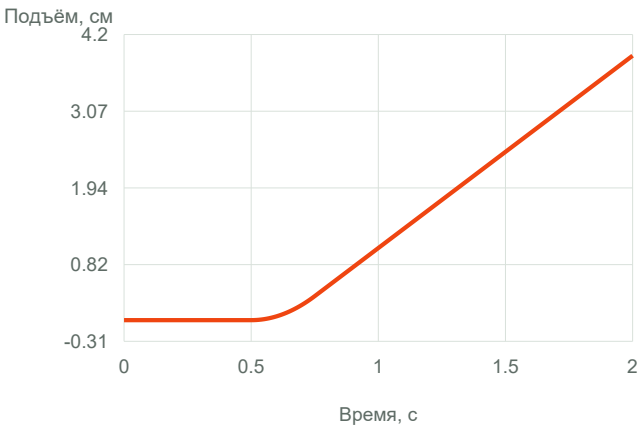
CF700 off с 0,5 с



RCS: 0,5…0,6 с



Lift: +100 Н на каждый



Режим / 2 с	N, м	E, м	D, м	vD, м/с
Trim	0,00000	-0,00000	-0,00000	-0,00000
CF700 off	-0,00291	0,00359	9,19375	12,25837
RCS pulse	0,02104	-0,00024	-0,00000	0,00000
Lift pulse	0,00002	-0,00002	-0,03888	-0,02827

40 проверок PASS. Максимум различия координат при шаге 0,02 → 0,01 с: 3,34e-15 м. Высота старта условно 20 м; контакта нет. Вертикальная команда задана разомкнуто, без регулятора. Численная точность не означает точность полёта.

804 строки: время, NED, скорость, quaternion xyzw, угловые скорости и команды

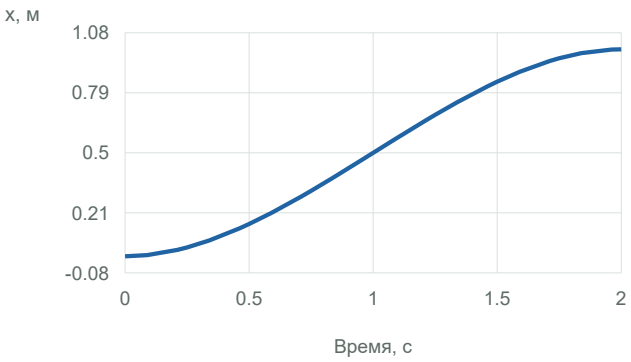
ВЕРИФИКАЦИЯ УРАВНЕНИЙ / НЕ КАЛИБРОВКА LLTV

Численные эталоны и оптимизатор

Исполнение	Проверенный результат	Что этим не доказано
SciPy 1.16.3	DOP853: max ошибка 4,44e-15; аналитический импульс и смещённый момент.	Физическая модель двигателя или самолёта.
MuJoCo 4.0.1	9 случаев RK4: ошибка позиции ≤ 5,77e-14 м, шаги 2/1/0,5 мс.	Контакт шасси LLTV; в эталоне контакта нет.
JSBSim 1.3.3	Jx = 1,000000 lbf·s; JMz = -1,000000 lbf·ft·s.	Внешняя сила задана на синтетическом теле.
NASA SimuPy Flight	Пакет 0.1.0; функциональная проверка F/m и M/I, callback и геометрии Земли: PASS.	Общая полётная точность и конкретный LLTV.
R4B replay	4 старых open-loop случая, 1 с; контрольный JSON воспроизведён.	Масса и геометрия новой R4D.1.

Dymos / OpenMDAO: отдельная задача движения

На 1 м за 2 с, из покоя в покой



Идеальный двойной интегратор. Минимизируется $\int a^2 dt$, **это не энергия**.

Численный J = 1,500000000; аналитический минимум 1,5.
Независимая ошибка конечной позиции: 2,23e-07 м.

Успешная оптимизация подтверждает решение этой постановки. Неудача нелинейного оптимизатора сама по себе не доказывает невозможность манёвра LLTV. У эталона нет атмосферы, ориентации, двигателя и контакта.

Аналитический эталон: SciPy DOP853

Аналитический эталон: MuJoCo, 9 случаев

Внешние сила и момент: JSBSim

Исторический R4B: результат повтора

Функциональный тест SimuPy Flight / commit и происхождение пакета

Dymos: исходная задача, ограничения и независимое интегрирование

ПРИМЕНИМОСТЬ ИСТОЧНИКОВ

NASA: историческая кривая и эталон

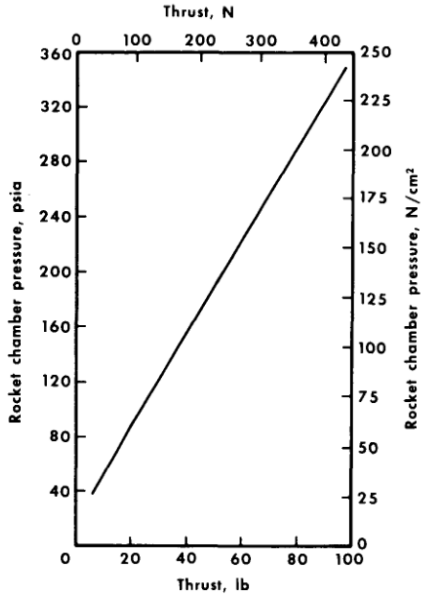


Figure 32.— Variation of attitude-rocket thrust with chamber pressure.

TN D-3023, рис. 32
Ранний LLRV; типовая статическая кривая, не синхронная запись полёта NASA 952.

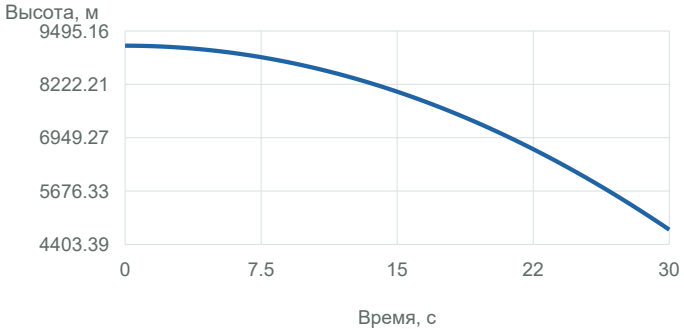
Для условных 60 lbf: около 222,0 ± 7,4 psia камеры. Граница - оценка чтения графика, не неопределённость измерений NASA. Давление абсолютное.

В fixture нет измеренного давления: парное сравнение тяги с кривой **непроверяемо**.

Табл. IV: hot-start response 40 мс для RCS и 55 мс для подъёмного. Порог отсчёта не определён. Эти числа нельзя без данных превращать в задержку или постоянную времени. Принятый импульс 100 мс не воспроизводит переходный процесс.

NESC Atmosphere Case 01: независимая поступательная проверка

Сфера без сопротивления / 30 с



Шесть опубликованных расчётных историй. Вращение Земли, WGS84 и J2.

Наибольшее расхождение высоты: **0,503 мм**. Локальные критерии выполнены. Ориентация, двигатель и LLTV этим не валидированы.

NASA TN D-3023 / рис. 32 и таблицы III-IV

NASA TN D-3689 / первые 20 полётов, рис. 19-22: рыскание, тяга и посадка

NESC Case 01 / постановка и опубликованные решения

Оцифровка, статусы NOT_VALIDATED и ограничения источника

СРАВНЕНИЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВ / ИСХОДНЫЕ МОДЕЛИ НЕ ОБЪЕДИНЯЮТСЯ

Четыре проекта: что переносится

Сопоставление относится к найденным файлам и конкретным конфигурациям. Отрицательный инженерный результат сохраняется даже при успешном воспроизведении.

Проект	Выполнено и ограничение	Польза для LLTV
Tesla Roadster	Массово-инерционные состояния, два способа суммы тензора; непрерывная проверка дверей. F03 воспроизводится, но само развёртывание остаётся отрицательным.	Отделить PASS повтора от успеха изделия; собственная массовая ревизия и непрерывный кардан.
ARGON	Связанный 6DoF MuJoCo, ресурсы и проверки шага; CFD запускался, но acceptance gates не пройдены. Контакт/мягкая посадка не закрыты.	Общая шкала времени и ресурсов; не использовать непринятую CFD-карту.
IMPULSE	Семь отдельных расчётных сценариев, LP и независимый повтор. Их набор не образует автоматически связанную миссию.	Единый SHA массы/инерции, отрицательные контроли, проверка шага и отказов.
VEKTOR	Логика, состояния, порты; раздельные наземная, вертикальная и угловая модели. Единого подтверждённого перехода/контакта нет.	Команда ≠ подтверждённое состояние. Связать ресурсы и аппаратные статусы.

Полное сравнение: точные локальные свидетельства, SHA и проверка ссылок

Пакет решает свой класс задачи

Класс	Сейчас исполнено	Следующий кандидат / предел
EOM и эталоны	SciPy, MuJoCo, JSBSim, SimuPy Flight	Общий движок не создаёт авиационные коэффициенты и карты двигателя.
Поиск траектории	Dymos / OpenMDAO, идеальный эталон	Нужна собственная модель ограничений LLTV.
Механика / контакт	Для LLTV связанная посадка открыта	Chrono / PyChrono; параметры стоек и трения требуются отдельно.
Системы / CFD / связь	В этом LLTV комплекте не связаны	OpenModelica + FMI; OpenFOAM / SPH; preCICE для связи полей.

Project Chrono / многотельная механика

OpenModelica / системные блоки и FMI

preCICE / сопряжение независимых решателей, не самостоятельная физика

СЛЕДУЮЩИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ РУБЕЖ

Приоритет T08 и воспроизводимость

T08 / P0-08: связать массу, центровку, инерции, расход, движение кардана и управление в одной версии. T01 задаёт конфигурацию; T06 - двигатель и кардан; T11/T12 - отказы, исполнительные каналы и систему управления.

Очередь	Что закрыть	Требуемое доказательство
1. Данные	Массы D1, CG/I, уровни жидкостей, подвижные части.	Источники по каждой массе; независимая сумма тензора и измерение.
2. Агрегаты	Установленные карты CF700, RCS/lift, общий тракт, отклик кардана.	Синхронные команды, давление, сила и расход; применимая конфигурация.
3. Среда	Аэродинамика кабины, ветер, земля/струи, плескание и четыре опоры.	Продувка/стенд, верификация сетки/шага и диапазон применимости.
4. Управление	Датчики, задержки, логика банков, насыщения, отказы.	HIL, затем независимая запись команды и отклика исторического аппарата.

Данные для идентификации и независимой проверки разделяются. Без размеченной записи NASA 952 нельзя публиковать ошибку его траектории. Ни статический LP, ни успешный оптимизатор не устанавливают бочку, петлю или инверсию.

Индекс доказательств и повтор

Общий запуск: run_checks.py (отдельные среды, журнал и выпуск)

Программа испытаний и матрица режимов

T3 и трек полётного моделирования

Инвентаризация: входы, SHA, 19 каналов

80 статик: решения, границы и отказы

4 траектории: модель, уравнения, команды и проверки

NASA NESC: шесть сравнений и локальные допуски

NASA: пять первичных отчётов и SHA

Четыре проекта и обзор всех решателей

Команды PowerShell из каталога B (рядом с run_checks.py):
& F:\LLTV\.venv\Scripts\python.exe run_checks.py --calculations-only
& F:\LLTV\.venv-report\Scripts\python.exe publication/make_pdf.py
Полные пути раскрываются по ссылкам. Числа и графики собираются из JSON/CSV автоматически.