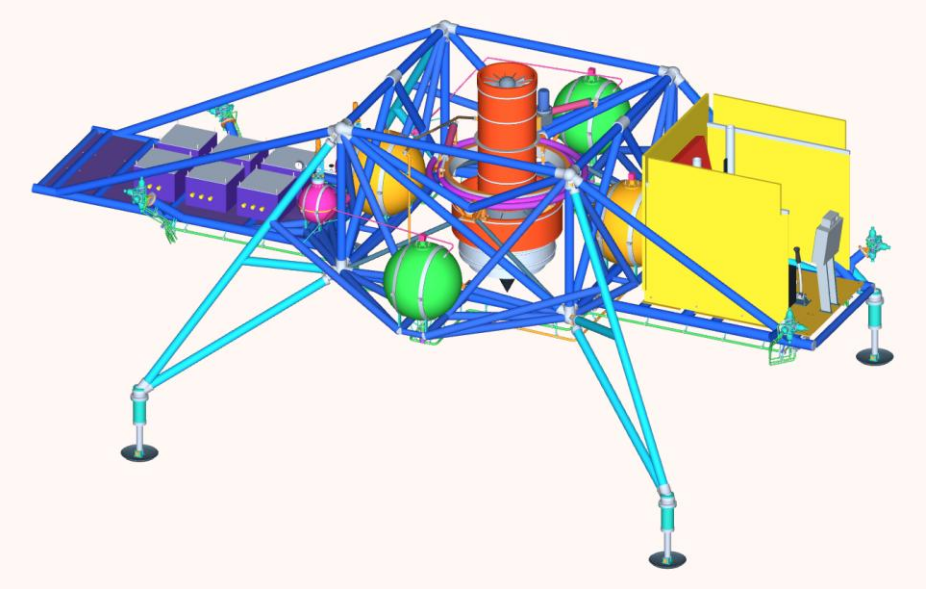
Методика проектирования летающих стендов

Как я реконструировал LLTV и как применять этот опыт к пяти другим экспериментальным аппаратам. Руководство для конструктора, расчётчика и ведущего проекта.



LLTV R4D.1. Общий вид сохранённой сборки. Положение кабины задаёт перед аппарата.

С чего начинать

Первый результат — ответ на три вопроса: какую машину восстанавливаем, откуда берётся подъёмная сила и чем пилот создаёт момент вокруг каждой оси. Пока эти ответы зависят от фотографии другого борта или от неизвестной массы, детальное моделирование крепежа только увеличивает объём переделки.

Прочтение: сначала уроки LLTV и расчётный пример, затем карточка выбранного стенда. В конце — порядок доводки, три рабочих навыка и указатель источников.

Что было сделано в проекте LLTV

От источника к отдельному узлу

За основу я взял NASA 952. Для центральной ручки и приборной колонки отдельно использовал раннюю кабину LLRV-1 на снимке E-13115. В SP-4535 я сопоставил подписи к фотографиям с периодом испытаний. Блок рулевых двигателей на PDF-странице 58 и аварийные двигатели на странице 59 выполняли разные задачи. Это изменило и дерево сборки, и схему подачи рабочего тела. [1–3]

Какие замечания меняли конструкцию

Сначала сферические баки имели ленты, но по сцене было трудно проследить, куда уходила нагрузка. Я связал ленты с опорами и опоры с рамой. Затем замкнул контур фермы, привязал трассы к реальным ответным деталям, разделил силовые опоры двигателя и исполнительные приводы кардана. Для настила проверил проникновение в трубы. Для кормовой поперечины построил сопряжение торца и проверил выступ снаружи.

В кабине я разнёс напольную ручку, кольцо покидания и приборную стойку по отдельным объектам. У двигателя нашёл и закрепил два ранее подвешенных агрегата. Для каждой правки сохранял прежнюю ревизию, фиксировал идентификаторы затронутых тел, делал общий и изолированный виды. Так новый снимок можно проверить в той же позе и с теми же видимыми деталями.

Результат этой работы — цифровая реконструкция конкретной компоновки. Для изготовления пилотируемого экземпляра остаются открытыми заводские интерфейсы, эксплуатационные нагрузки и квалификация.

Как разобрать источники и восстановить размеры

Паспорт конфигурации

Запишите изделие, борт, дату или событие, режим и систему осей. Разведите строки «музейный экземпляр», «на привязи» и «свободный полёт». У каждого утверждения должны быть объект, источник, рисунок или страница, статус и действие, которое снимет неопределённость. Например, фото E-13115 подтверждает наличие ручки на раннем LLRV-1. В модели NASA 952 та же ссылка обосновывает только заимствование. [1, 3]

Размер с фотографии

Сначала исправьте перспективу по точкам одной плоскости, когда для этого есть геометрическая база. Затем используйте отношение L = B·p/P: B — известная длина, P — её проекция в пикселях, p — измеряемый отрезок той же плоскости. При учебных B = 1 000 мм, P = 500 px и p = 150 px выходит 300 мм. Ошибка ±2 px на p даёт ±4 мм только от этого отсчёта. Добавьте погрешности базы, перспективы и второй точки, а затем проверьте независимый размер.

Если независимый размер не сходится, вернитесь к выбранной плоскости и варианту борта. Не растягивайте всю раму, чтобы совместить одну проекцию. Для частично закрытой детали сохраните допустимый диапазон и перечислите зависимые сопряжения. Особенно это важно для высоты кресла, точек подвеса и линии тяги.

Выход этапа: реестр DOCUMENTED / ANALOG / ASSUMED / OPEN, схема баз и список размеров, которые нужно измерить. Скрипт навыка evidence проверяет разметку реестра, а истинность ссылки проверяет автор.

Компоновка и силовые интерфейсы

Сначала оси и жёсткие точки

Задайте плоскость земли, ось двигателя, плоскости симметрии, центр шарниров, координаты опор и кресла. Сведите их в один параметрический эскиз. Привяжите к нему оболочки двигателя и баков, предельные положения кардана и область пилота. В компоновке должно быть видно, что вращается вместе с двигателем, что закреплено на раме и где линия пересекает подвижную границу.

Три проверяемые цепочки

Силовая: агрегат → площадка → проушина → палец или болт → ответная деталь → узел фермы. Поток: бак → регулятор или клапан → линия → подвижная вставка, если требуется → вход потребителя. Управление: орган пилота → датчик и логика → привод или клапан → сила и момент. В таблице интерфейсов укажите ID обеих сторон, ось, среду, ход, нагрузку и источник. Отдельно внесите крепление и возможность извлечения детали.

Как моделировать до болта без ложной точности

Сначала задайте сопряжённые поверхности и ось отверстия у обеих деталей. Затем покажите палец, две проушины, шайбу и стопорение или соответствующий болтовой комплект. Проверьте пространство для инструмента и снятия. Если сорт материала, посадка или момент затяжки не документированы, оставьте их отдельными требованиями подрядчику. Для чистой картинки ориентация геометрического ребра цилиндра допустима только при сохранении оси, посадок и настоящих стыков.

Проверка на экономию времени: изменение положения опоры должно обновлять обе ответные детали и порт трассы. Если правка требует ручного сдвига десятков болтов, переделайте зависимость до детализации.

Масса тяга и управляющие моменты

Единицы и расчётная точка

Выберите правую систему с +Z вверх. Для каждой массы храните m_i и положение r_i в метрах. Центр масс $rG = \Sigma m_i r_i / \Sigma m_i$. Рассмотрите пустую машину, пилота, начало и конец выработки, несимметричный остаток. Массу двигателя в LLTV учитывали сводной строкой 285 кг; учебные тела его внутренностей не должны повторно увеличивать сумму. Масса по каталогу, масса установленного узла и масса оболочки по CAD — разные исходные данные. [2]

Для сил, действующих на аппарат, $Fnet = \Sigma F_i + (0,0,-mg)$, $M_G = \Sigma[(r_i - rG) \times F_i + C_i]$. C_i — заданная свободная пара. При статическом висении обе суммы близки к нулю с допуском, соответствующим исходным данным. Вертикальная тяговооружённость сама по себе не определяет возможность управления по всем осям.

Численный контроль знака

Учебный аппарат имеет 60 кг в x = −0,4 м и 40 кг в x = +0,6 м; y = z = 0. Получается xG = 0. Две равные вертикальные силы по 490,3325 Н на x = ±0,5 м уравновешивают вес и взаимно гасят моменты. Перенос 20 Н с левого выхода на правый сохраняет сумму тяги, но создаёт My = −20 Н·м. Если программа показывает +20, проверьте порядок векторного произведения и то, в какую сторону направлены силы.

Для динамики отдельно нужны тензор инерции, зависимость силы от команды и режима, задержки и пределы. Проверяйте чувствительность моментов при смещении ЦМ; в простом случае $\Delta M = \Delta r \times F$ с учётом выбранного знака плеча.

Расчёты подсистем и пределы применимости

Контуры управления и питания

Для каждого независимого входа изменяйте команду на ±δ в одной рабочей точке. Пересчитывайте силы и моменты всех изменившихся выходов. Столбец матрицы управления — разность этих шестикомпонентных результатов, делённая на 2δ. Укажите единицы команд, диапазоны и насыщение. Повторите на нескольких уровнях тяги. Управляемое направление с нулевой чувствительностью или противоположным знаком требует проверки оси, плеча и логики клапана.

Для отбора воздуха укажите расход на входе и каждом ответвлении, температуру, перепад давления и соответствующее уменьшение основной тяги. Для ракетного контура учитывайте отдельно газ наддува и жидкий рабочий компонент. Для эжектора определите границу контрольного объёма, подсасываемый воздух и условия у земли. Раздельно оценивайте установившийся режим и переходный расход.

Локальная прочность и посадка

В проекте LLTV стенка гелиевой сферы принята 9 мм номинально и 8,5 мм минимум. Расчёт при 20 МПа в минимальной стенке дал 191,6 МПа по Мизесу на внутренней поверхности. Это результат для сферы. Горловина, шов, затяжка и уплотнение требуют своих моделей нагрузки, допуска и материала. Для посадки уравнение энергии ½mv² даёт масштаб поглощаемой энергии; проверьте касание одной опорой, остаточную тягу, жёсткость, демпфирование и ограничитель хода.

Храните рядом с каждым результатом режим, единицы, допущения, версию входа и критерий. Прочность при статической нагрузке, устойчивость полёта и ресурс остаются разными проверками.

Как я проверял исправления в FreeCAD

Скриншот превращается в воспроизводимую проверку

Запишите ID детали, её соседа, позу, камеру и видимые группы. В сохранённой сборке вычислите глобальные положения, проверьте валидность тел, измерьте расстояние и объём пересечения. Нулевое расстояние соответствует и нормальному контакту, и ошибочному взаимному проникновению: их различает объём общей части. Для шкворня или подшипника дополнительно проверьте оси, опорные поверхности и требуемый зазор.

На заднем роторе CF700 я заменил условные элементы 54 отдельными цельными лопатками. Каждая входит хвостовиком в свой паз. Я проверил соседние перья и диск, устранил местное пересечение, а учебный вид разделил: слева пустой паз, справа целая лопатка. Нейтральная проверка охватила 154 внутренних объекта и 17 существующих объектов двигателя; пар с объёмом пересечения выше 0,05 мм³ не обнаружено. Проверка углов дала +27°, −27° и 0° для двух роторов и статора.

Когда считать цифровую правку законченной

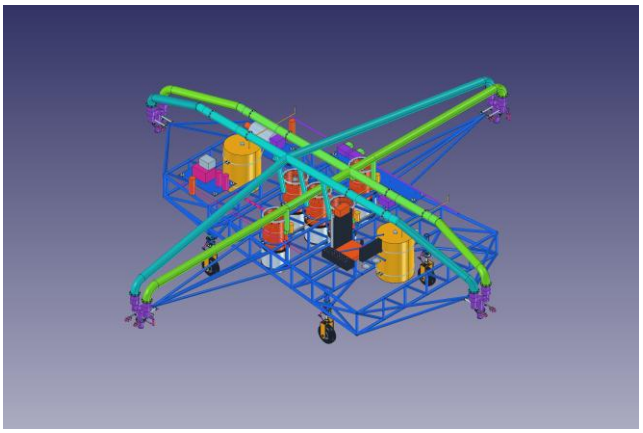
Закройте файл, откройте его заново и повторите выборку. Сверьте рабочую сборку, статический разрез и учебное разнесение. В R4D.1 зарегистрированы 3 711 видимых вхождений и 4 651 твёрдое тело. При переводе цветного STEP в AP242 повторный импорт сохранил число тел, объём, габариты и палитру. В комплект вложены отчёты о позе, допуске и SHA256. Совпадение хешей проверяет целостность уже выпущенного комплекта.

Для движения сохраняйте минимальный зазор и позу, где он достигнут. Несколько статических углов и проверка фаз роторов не доказывают непрерывный горячий зазор, вибропрочность или пригодность к полёту.

Германия · SG 1262

Что воспроизводил стенд

VFW исследовала управление будущего VAK 191B на открытой ферме с пятью вертикальными RB.108. Три центральных двигателя имитировали вертикальную составляющую подъёмно-маршевого двигателя будущего самолёта, передний и задний — его подъёмные двигатели. Управляющие струи составляли отдельную часть системы. Это функциональное подобие: планер и силовая установка самолёта имели иную компоновку. [4, лист 39]



Действительная модель SG 1262 R3 из каталога проекта. Положение узлов является реконструкцией.

В CAD задайте каждому из пяти агрегатов собственный ID, ось, массу, площадки и ветвь отбора. Отдельными телами храните наземную оснастку. Для первого расчёта сформируйте матрицу «команда → изменения тяг и струй → момент». Проверьте отказ одного агрегата и смещение нагрузки при выработке топлива. Замораживать геометрию можно после сверки результирующей тяги и момента, включая потери от отбора.

В локальной поставке SG R3 есть отчёт о повторном открытии, непрерывности воздушных трасс и шести положениях хода. Начинайте с идентификации FCStd по хешу. Эти результаты относятся к R3 и к записанным положениям.

Подъём	RB.108 × 5 → вертикальные силы
Управление	Команды → двигатели и управляющие струи → моменты

СССР · Турболёт

Выхлопная струя и вынесенные рули

Для программы 1956–1959 годов возьмите две отдельные карточки: лётная машина и сохранившийся экспонат. Свидетель описывает вертикальный двигатель, кабину, фермы и два газовых руля за соплом; их отклонение меняло направление основной струи. Струйный руль обеспечивал управление по направлению. В музейном описании фигурирует РД-9БП и показ Юрия Гарнаева в Тушине 20 июля 1958 года. Индекс двигателя конкретного раннего вылета требует отдельной привязки. [5, 6]

Как восстановить цепочку управления

Сначала постройте ось двигателя и выходную плоскость сопла. Затем задайте отдельные исполнительные элементы: отклоняемую поверхность в горячей струе и вынесенное сопло со своим плечом. Для каждого укажите вход, выход, подвижную часть и реакцию на раму. Сравните направление силы с осью вращения на фотографии. Если источники расходятся в распределении крена и тангажа, оставьте две схемы управления и запросите чертёж приводов.

Что проверить до детализации

Отдельно оцените эффективную тягу при отклонении руля и расход отбираемого воздуха. При малой высоте исследуйте воздействие отражённой струи на воздухозаборник и кабину. В воспоминаниях отмечены поднятые струёй пыль и посторонние предметы. Геометрическая видимость входа не определяет температуру газа или запас устойчивости компрессора. [5]

Запрос на обмер: оси подвески рулей, тяги приводов и их конечные положения; происхождение поздних элементов оперения. До подтверждения эти детали остаются гипотезами выбранного периода.

Подъём	Вертикальный ТРД → подъёмная сила
Управление	Газовые рули за соплом; отдельное струйное управление

Великобритания · Thrust Measuring Rig

Два двигателя и три выходных сопла

На этапе 1953–1957 годов различайте привязной отрыв 1953 года, свободный полёт 1954 года и машину в испытательной конфигурации RAE. Два Nene установлены встречно. Газоход переднего двигателя раздваивается и заканчивается по сторонам центрального выхода заднего двигателя. Результирующая тяга каждого двигателя проходила через расчётный ЦМ. Четыре вынесенных управляющих направления следует разбирать по схеме воздушного управления. [7, разделы 2.1–2.2, рис. 3–4; 8]

Проверка на числах из отчёта

RAE приводит около 7 600 фунтов веса и 8 100 фунтов максимальной тяги с учётом управляющих струй. Отношение равно 1,066, что согласуется с округлённым 1,07 в отчёте. При одинаковом переводе числителя и знаменателя в ньютоны отношение сохранится. Не добавляйте тягу управляющих струй повторно. При старте рециркуляция горячего газа снижала фактический запас. [7, раздел 2.1]

Сделайте два независимых расчёта отказа. При отключении двигателя проверьте момент относительно фактического ЦМ и отдельно остаточную вертикальную силу. Отсутствие большого опрокидывающего момента не означает сохранения висения. Для шасси рассмотрите вертикальную скорость, оставшуюся тягу и запас хода; для стабилизации используйте диапазоны параметров, измеренные RAE, с привязкой к испытательной конфигурации.

Первый CAD-объект для проверки: совмещённый вид двух осей двигателей, трёх срезов сопел, силовых рам и ЦМ. Первый расчёт: векторы двух результирующих, затем реакции двух ветвей переднего газохода.

Подъём	Два Nene → три выхода → две результирующие
Управление	Отбор → воздушные рули на периферии

Франция · SNECMA C 400 P 2

Какой вариант нужен

Цель — пилотируемый P.2 в свободном полёте Огюста Мореля 14 мая 1957 года. Сверьте вертикальный Atar 101 DV, кресло наверху, четыре колёсные опоры, отклонение струи и газоструйную стабилизацию. Музей указывает высоту 8,34 м и диаметр 1,50 м. В пользовательских материалах и подписи музейного снимка фигурирует F-ZWUZ, у AAMS — F-ZWWZ. Сохраните оба написания с отдельными источниками; датированная регистрационная запись нужна для окончательного выбора. [9–11]

Что меняет вертикальная компоновка

Привяжите кресло, массу пилота, бак и ось двигателя к одной вертикальной базе. Проверьте проекцию ЦМ на опорный многоугольник и изменение при наклоне или сжатии одной опоры. Рассмотрите отдельно вращение вокруг вертикальной оси и вращение вокруг двух поперечных осей. У вертикального двигателя исторические названия каналов не всегда совпадают с привычными осями горизонтального самолёта. В матрице управления используйте явно нарисованные оси.

Вначале представьте отклонение тяги функциональным узлом: заданное изменение направления даёт поперечную силу и момент относительно ЦМ. Внешняя форма кожуха не раскрывает внутреннюю конструкцию этого узла. Перед моделированием привода нужны разрез и данные конкретного P.2. Не переносите конструкцию P.1, кабину P.3 или кольцевое крыло C.450.

Приёмка первой компоновки: общий вид с системой осей, граница кресла, четыре опоры, ЦМ и линия тяги при двух направлениях отклонения. Портал и страховка относятся к отдельному наземному режиму.

Подъём	Вертикальный Atar 101 DV → основная тяга
Управление	Отклонение струи и отдельные газовые каналы

Франция · SA 610 Ludion

Аппарат 002 и конкретный полёт

Для программы 1967–1968 годов выбираю Ludion 002, последний свободный полёт 20 декабря 1968 года. По Ротмунду в период 18–20 декабря выполнены пять свободных полётов. Для последнего указаны 190 м за 32 с, скорость 59 км/ч и встречный ветер 20 км/ч. Простое деление даёт среднюю путевую скорость около 21,4 км/ч. Это причина занести значения в разные поля: вид скорости 59 км/ч и участок её измерения источником не определены. [12]

Что ставить в дерево CAD

Начните с массы и положения пилота, компактной рамы и двух эжекторных каналов. Разведите первичный газ от газогенератора и вторичный воздух, который всасывают эжекторы. Покажите узлы подвижного блока, нагрузки на его опоры и расстояние от входов и выходов до земли. Геометрия второго канала должна иметь собственный ID и направление, даже если создаётся зеркальной копией первого. [12, 13]

Для расчёта тяги очертите границу вокруг полной эжекторной сборки. Если используете измеренную суммарную тягу, отдельное слагаемое первичного сопла уже в ней учтено. Запрашивайте карту тяги в зависимости от расхода, высоты и наклона, тепловую защиту и ограничения подвижности. Для проверки управления нужна реакция установки на изменение команды, а не простое умножение тяги генератора на постоянный коэффициент.

Отдельные конфигурации: наземный имитатор с внешним воздухом, привязная машина, свободный полёт 002. Сходство кадров не доказывает одинаковые расход, массу и способ удержания.

Подъём	Первичный газ + подсос воздуха → эжекторы → тяга
Управление	Положение блока → направление тяги и момент

Как организовать быстрые итерации

Дешёвый эксперимент до дорогой сборки

Порядок работ выбирайте по неопределённости с наибольшими последствиями. Если неизвестно положение результирующей тяги, сначала изменяйте плечо в расчётной схеме. Если непонятно, проходит ли крепёж мимо трубы, смоделируйте только пару деталей, шайбы и область доступа. Если причина замечания — проекция, разнесите виды и сохраните исходную геометрию. Каждый эксперимент должен отвечать на один вопрос и воспроизводиться на сохранённом файле.

У общей группы используйте один параметрический источник: прототип опоры, путь трубки, круговой шаг венца. Храните зеркальные экземпляры отдельными ID и проверяйте их ориентацию и порты. В ветви ревизии пересчитывайте затронутые сопряжения и один контрольный вариант, который должен сохранить поведение. При росте объёма проверки запускайте недорогой скрининг по габаритам первым; подтверждайте потенциальные пересечения точным пересечением тел.

Шаблон постановки задачи

«Борт / режим / ревизия. Источник и локатор. Участок на виде, ID деталей. Физический вопрос. Что допустимо менять. Измеряемый критерий. Что вернуть». Например: «R4D.1, нейтраль. В учебном секторе пустой паз перекрыт вынесенной лопаткой. Исправить представление. На первом открытии показать сектор и шесть соседних корней, отдельную целую лопатку скрыть. Подтвердить состояния видимости после повторного открытия и приложить вид».

Ускорение оценивайте временем до принятого исправления, числом повторных открытий с тем же дефектом и долей предположений с назначенным способом проверки. Замеров выигрыша времени для этих пяти программ в проекте нет.

От реконструкции к техническому заданию

Передача конкретного узла

В пакет подрядчику положите ID узла и родительскую ревизию, базовую систему координат, партнёры сопряжения, геометрию интерфейса, нагрузки и диапазоны, температуру, ресурс, ограничения обслуживания и перечень подтверждающих документов. Укажите: какие параметры принадлежат заказчику, что вправе предложить изготовитель, кто принимает отклонение. Для двигателя запросите установочный чертёж, карту тяги и реакции опор; для сосуда — материал, процедуру сварки, контроль шва и протокол испытаний; для шасси — характеристику сила–ход и энергоёмкость.

Критерии перехода между этапами

Архив → компоновка: определены вариант и режим, неизвестные имеют владельца. Компоновка → рабочий проект: зафиксированы массы, нагрузки, управляющие воздействия, ICD и версия расчётов. Проект → изготовление: утверждены чертежи, материалы, допуски, технологические процессы, планы контроля и методы приёмки. Изготовление → испытания: подтверждена идентичность экземпляра, измерены масса и центровка, отработаны стенды, отказные случаи и порядок допуска. Для каждого перехода запишите документ, ответственного и решение.

Для пилотируемой машины отдельно проследите цепочку «опасность → средство обнаружения → ответ системы → испытание → результат». Примеры: потеря тяги, заклинивание привода, утечка газа, попадание горячего газа во вход, отказ питания и потеря команды. Возможность пилотирования или выпуска в производство определяется программой конкретного изделия.

Для сметы объединяйте закупочные единицы по договорному объёму. Десятки тел двигателя в CAD могут составлять одну закупаемую установку. Неизвестную цену оставляйте открытой до КП.

Как применить навыки в следующем проекте

1 texttocad-vtol-evidence

Запрос: «Используй $texttocad-vtol-evidence для C.400 P.2. Отдели доказательство свободного полёта от доказательства регистрации. Верни CSV, локаторы страниц и следующий архивный запрос». Получите два факта с разным уровнем уверенности. В комплекте навыка есть мини-реестр для LLTV.

2 texttocad-vtol-balance

Запрос: «Используй $texttocad-vtol-balance для TMR в состоянии RAE. Отрази два двигателя и три выхода; неизвестные расходы оставь открытыми. Выдай остаточные силы, моменты и перечень измерений». Встроенный пример учебный, массы и силы заданы в JSON. Для собственного аппарата замените их и задайте координаты в метрах.

3 texttocad-vtol-feedback

Запрос: «Используй $texttocad-vtol-feedback для отмеченного крепления. В нейтрали и крайних положениях измерь зазоры, отдельно проверь визуальное наложение, открой сохранённую ревизию и дай FeedBack». Для уже распакованного пакета LLTV R4D.1 приложение проверяет SHA256 и согласованность протоколов. Для SG 1262 используются собственные протоколы его ревизии.

Навыки установлены в пользовательский каталог Codex. Для вызова в новом чате укажите имя с $. Копии для переноса включены в архив методики. Утилиты используют стандартную библиотеку Python и читают входные файлы без их изменения.

Источники и протоколы 1

[1] NASA SP-4535 · Unconventional, Contrary, and Ugly

PDF-стр. 58–59, 74 и 87; подписи к снимкам, ранняя кабина.

[2] NASA TN D-3023 · Bellman & Matranga

Рис. 25 и табл. III; вертикальный CF700-2V.

[3] NASA · Lunar Landing Training Vehicle NASA 952

Виды сохранившейся установки, двигателя и кардана.

[4] German V/STOL Fighters · International Powered Lift Conference

Лист 39, SG-1262 Hovering Rig.

[5] Глава 9 · Вертикалки. Страницы почти забытой истории

Свидетельство о ЛИИ, газовых рулях и испытательных трудностях.

[6] АМНИТ · Виртуальный музей памятников науки и техники

Карточка «Турболёт»; название двигателя и показ 1958 года.

[7] J. K. B. Illingworth · Flight Tests of a Hovering Jet-Lift Aircraft

R&M № 3336, разделы 2.1–2.2 и рис. 3–4.

Источники и протоколы 2

[8] Science Museum Group · Rolls-Royce Thrust Measuring Rig

Хронология привязного и свободного полёта.

[9] Musée de l’Air et de l’Espace · C 400 P-2 ATAR Volant

Тип, габарит и двигатель экспоната.

[10] AAMS · Auguste Morel, pilote d’essai

С. 20–21, P.2, первый свободный полёт, управление, обозначение F-ZWWZ.

[11] Museum photograph · C.400 P2 F-ZWUZ

Проверяйте подпись снимка отдельно от регистрационного реестра.

[12] C. Rothmund · The Propulsion System for the Ludion One-Man Hopper

В авторском полном тексте IAC-08-E4.3.6: результаты 002 и перечень архивных записок Sud Aviation и SEPR.

[13] AAMS · Prendre l’air No. 4

Описание газогенератора, двух эжекторов и подвижного блока.

Файлы проекта

LLTV R4D.1: verification/reopen.json, verification/internal_interfaces.json и calculations/AP242_roundtrip.json. Контрольная сборка SG 1262: R3_20261105/delivery_validation.json. В папке исходных материалов также использованы спецификации № 6, 14, 18, 22 и 28 как указатели для поиска; зафиксированные там допущения остаются допущениями.