

Анализ конструкции бустера системы Starship и ее развития за 2.5 года летных испытаний

Ю. И. Лобановский

Тот, кто смотрит со стороны, видит восемью глазами.
Поговорка игроков в го

Краткое содержание

В работе показано, что завершившиеся к концу 2025 года этапы программ создания двух наиболее перспективных ракетных систем – Starship и New Glenn, а также авария 21 ноября 2025 года на криогенных испытаниях последней версии V3 бустера системы Starship, позволили провести анализ принципиальных особенностей конструкции системы Starship. Из него следует, что на первый взгляд необъяснимое увеличение поперечного сечения трубопровода на версии V3, питающего двигатели метаном, вызвано проблемами устойчивости его подачи при быстром развороте бустера вокруг его поперечной оси во время бустбэка.

Это привело к вытеснению напорного бака кислорода для работы двигателей при посадке (то есть, при подхвате бустера посадочной башней) из центра к боковой стенке основного бака, вследствие чего у трубопроводов, подающих кислород в двигатели, работающие при посадке, стало не менее 7 различных длин. А это, в свою очередь, означает, что появляются возможности для возникновения до 7 новых вариантов автоколебаний типа «пого», которые могут привести к аварии бустера в момент посадки. При этом из-за «пого» уже было 6 аварий при 11 испытательных полетах, и из результатов испытаний первых двух версий системы Starship следует, что подавить такое число новых вариантов «пого» применяемым компанией SpaceX методом летного эксперимента может оказаться просто физически невозможно.

... Эта часть краткого содержания, касающаяся решения проблемы посадочного кислородного бака ускорителя Starship, в настоящее время закрыта для публичного доступа.

И оценка всей совокупности конструкторских решений, использованных при разработке последней версии бустера, позволяет утверждать, что полноценное управление программой Starship, по сути, утрачено.

Ключевые слова: *Starship, New Glenn, пого, авария, прототип, труба-бак, напорный бак*

I. Введение

В настоящее время, к концу 2025 года, практически одновременно (с интервалом ровно в 1 месяц) завершились важные этапы развития двух наиболее продвинутых на данный момент программ создания перспективных ракетных систем – Starship и New Glenn двух компаний, SpaceX и Blue Origin. Несмотря на то, что первая из них, более амбициозная и инновационная – Starship в ходе двух этапов полномасштабных испытаний совершила уже 11 полетов в околоземный космос, она еще достаточно далека от решения даже самой первоначальной задачи – выведения на низкую околоземную орбиту полезной нагрузки массой хотя бы порядка 100 т и благополучного возвращения после этого обеих ее ступеней на Землю. При этом, как будет показано в этой работе далее, перманентные изменения ее конструкции в режиме вызовов – ответ, то есть в стиле эджайл-технологии, возможно и оправданные при решении локальных проблем, еще не имеющих достаточно глубокого научного обоснования, при принятии конструкторских решений глобального характера могут завести весь проект в тупик, выхода из которого уже не будет. Ко всему прочему некоторые важнейшие аспекты этого проекта скрываются руководством компании SpaceX не только от внешнего мира, но, как можно будет увидеть в работе далее, видимо, и от собственных инженеров, проектирующих различные подсистемы этой многоразовой ракетной системы, что иногда приводит уже к совершенно анекдотическим казусам.

Тем временем, другая ракетная система – New Glenn, которая также является довольно большой и достаточно инновационной, но, в целом занимает по этим показателям промежуточное положение между системой Starship и ракетами-носителями сравнительно недавнего прошлого, в своем втором полете, по существу, завершила испытания, выведя два марсианских аппарата на траекторию полета к точке либрации L₂ системы Солнце-Земля. При этом ее первая ступень осуществила успешную посадку на плавучую платформу [1]. И появилась возможность, сравнивая инженерные решения, использованные при конструировании этих двух ракетных систем, а также привлекая информацию о еще более легкой весьма успешной частично многоразовой ракете-носителе Falcon 9 компании SpaceX, попытаться разобраться в генезисе некоторых принципиальных особенностей конструкции системы Starship и в причинах ее изменений от версии к версии, а также оценить, к чему они, в итоге, могут привести.

II. Основные результаты летных испытаний двух первых версий (V1 и V2) системы Starship

Из Назарета может ли быть что доброе?
Иоанн 1:46

По большому счету, ход двух прошедших этапов испытаний соответственно двух вариантов V1 и V2 системы Starship определялся действиями, направленными на решение также двух ключевых проблем –

выявления и подавления автоколебаний типа «пого», постоянно в разных вариантах возникавших в этой системе, и создания приемлемой теплозащиты второй ступени (корабля Ship). При этом проблема «пого», неожиданно возникшая сразу же с первых секунд первого полета [2], когда до трудностей с теплозащитой надо было еще дожить, руководством SpaceX totally замалчивалась, и замалчивается до сих пор. Мероприятия по подавлению этого разрушительного автоколебательного процесса сначала выдавались за что-то иное [3]. А затем, когда перед третьим полетом (в марте 2024 года), к ним пришла «добрая весть» из холодной России [4], которая частично (но далеко не полностью) раскрыла им глаза на это явление, они с энтузиазмом стали подавлять «пого» изменением режимов работы двигателей, ничего и никому о нем не сообщая и ничего не объясняя.

Всего за 11 полетов компания SpaceX столкнулась, минимум, с 8 случаями возникновения «пого». В первый раз выявленные в первом полете катастрофические автоколебания были подавлены введением специальной вставки между ступенями ракеты – промежуточного отсека. Во всех оставшихся, начиная с третьего полета, на прежде аварийных этапах траектории 4 раза программно вводились снижения тяги двигателей и 3 раза – ее повышения для того, чтобы рассогласовать частоты упругих продольных колебаний корпуса и гидроакустических осцилляций в топливной системе [5, 6]. И еще 1 раз в седьмом полете произошел взрыв второй ступени вследствие поперечных колебаний и обрыва, по крайней мере, одного из трех длинных тонких и неподкрепленных трубопроводов нового образца для подачи метана в двигатели ее второй ступени. Это было сделано на первом экземпляре второй ступени версии V2, чтобы, не имея возможности рассчитать влияние на «пого» своих действий по изменению геометрии топливной системы вследствие удлинения ступени версии V2, отменить проводимые ранее с третьего полета программные снижения тяги на финише ее разгона, уменьшившее массу полезной нагрузки. Так что даже взрыв в седьмом полете, хоть он и не был прямым результатом воздействия «пого», оказался опосредованным следствием влияния этого процесса на конструкцию ступени.

В итоге первые три пуска каждой из версий системы Starship, так или иначе, завершались авариями из-за «пого», в двух пусках даже двукратными, и только три полета первой версии и два – второй могли быть продуктивно использованы для отработки теплозащиты корабля. В этом направлении были достигнуты достаточно обнадеживающие результаты, однако и тут до финиша, каким бы он ни был, придется пройти еще долгий путь, и если на нем снова также неожиданно и непредсказуемо будут происходить возбуждения «пого», то движение по нему может окончательно застопориться.



Рис. 1 – Общий вид внутренностей бустера SH18 (B18) – первого экземпляра новой версии V3 после неудачных криогенных испытаний [7]

При этом компания SpaceX при первой же возможности стремилась заменить дросселирование двигателей, выполняемое для подавления «пого» их форсированием, чтобы просто «проскочить» через опасный режим и не терять на снижении тяги массу полезной нагрузки. И именно это ее стремление объясняет те изменения в конструкции бустера версии V3 по сравнению с бустером версии V1 (версия V2 бустера не была создана), которые внешние наблюдатели смогли увидеть после того как первый экземпляр (SH18 или B18) новой версии 21 ноября 2025 года лопнул на криогенных испытаниях, см. рис. 1. Это событие произошло всего через 8 дней после второго, успешного полета ракеты New Glenn, и именно их совместное рассмотрение позволило сделать вполне определенные выводы о принципах построения и путях развития конструкции бустера системы Starship.

Сравнение диаметров центральных труб для подачи метана в двигатели версий бустера V3 и V1 (см. рис. 1 и 2) показывает, на первый взгляд, необъяснимое раздувание поперечного ее сечения в новой версии. Зачем? Чем больше сечение, тем больше масса трубы, а ведь идет постоянная борьба за снижение общей массы конструкции ракеты. Далее будет показано, как понимание этих изменений в сопоставлении с анализом конструкции ракеты-носителя New Glenn оказалось точкой кристаллизации, из которой вырос общий анализ конструкции бустера системы Starship, проведенный в последующих разделах данной статьи.



Рис. 2 – Рендер нижней части кислородного бака бустера SH7+ версии V1 с нижним участком центральной трубы для подачи метана [8]

Сравнение рис. 1 и 2 позволяет убедиться, что центральная труба подачи метана бустера версии V3 по объему выросла в несколько раз, и оказалась совершенно циклопических размеров – ее диаметр стал почти таким же как и всей ракеты Falcon 9. Вряд ли это является достоинством, так как увеличивает сложность и массу топливной системы бустера.

III. Почему резко увеличилось сечение центральной трубы подачи метана в двигатели бустера?

Хотели как лучше, а получилось как всегда.
В. С. Черномырдин

Утверждается, что в таком виде центральная труба подачи метана в двигатели бустера с очень сильно выросшим поперечным сечением стала еще и промежуточным баком для его хранения, и что это является весьма удачным решением [9]. Однако, совершенно очевидно, что увеличив высоту бака метана за счет соответствующего уменьшения высоты бака кислорода при сохранении его объема за счет более тонкой центральной трубы с нормальной пропускной способностью, мы получим более легкую конструкцию. И все это уже было реализовано в версии V1 бустера, см. рис. 3.

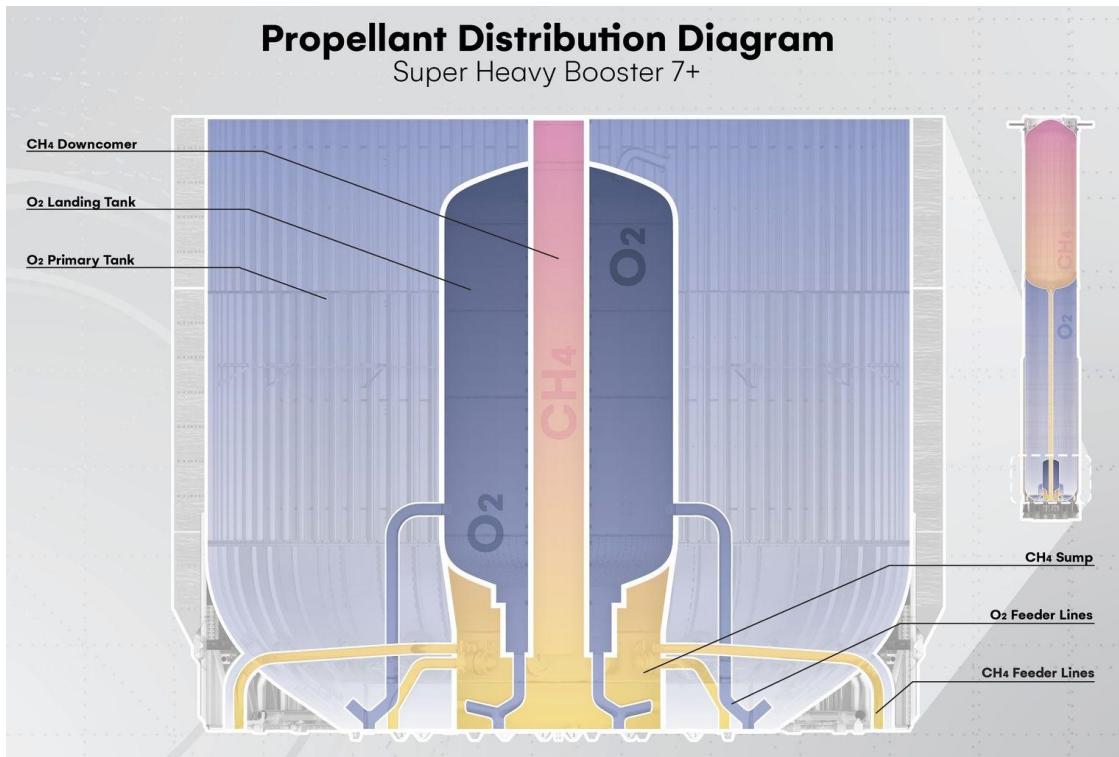


Рис. 3 – Схема системы распределения топлива бустера SH7+ версии V1 [8]

Вокруг относительно тонкой центральной трубы подачи метана к двигателям отлично компонуется кислородный посадочный напорный бак с симметрично расположенными трубами подачи кислорода, см. рис. 3, 4.

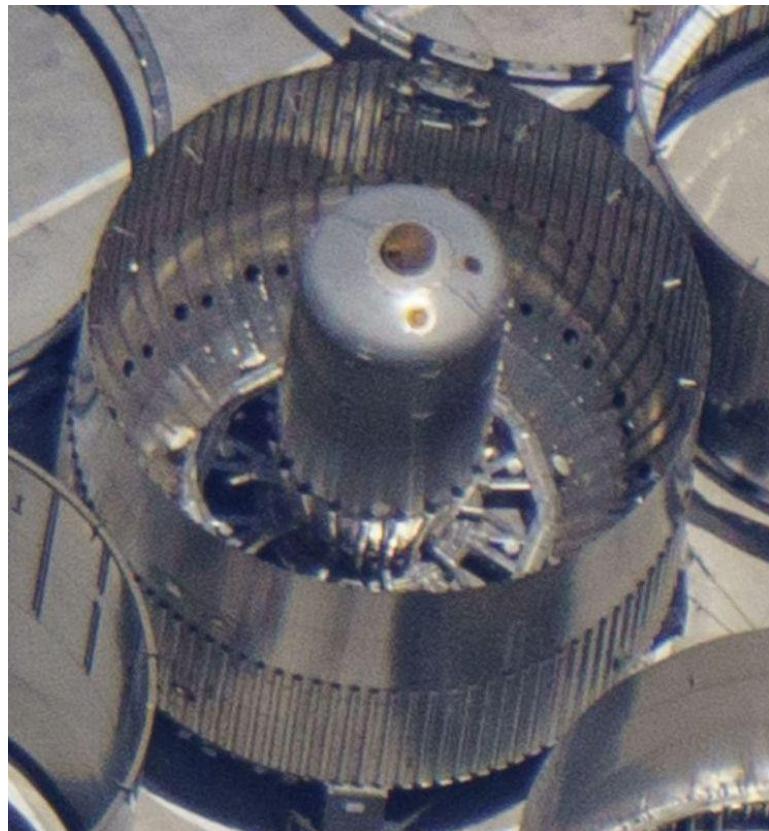


Рис. 4 – Нижняя часть основного кислородного бака бустера SH7+ версии V1 с центральным посадочным баком кислорода [8]

При этом на бустере новой версии V3 из-за огромной центральной трубы для подачи метана посадочный напорный бак кислорода в центре основного кислородного бака разместить уже невозможно. Поэтому он сдвинут вбок, перекаивая всю ранее симметричную конструкцию, см. рис. 5.



Рис. 5 – Нижняя часть основного кислородного бака бустера SH18 версии V3 с боковым посадочным баком кислорода [9]

Но хуже всего то, что при таком расположении кислородного посадочного бака из 13 труб, подающих кислород к 13 работающим при посадке двигателям, обязательно будет не менее 7 вариантов их длин вместо прежних двух, см. рис. 6. А это означает, что появляется возможность для возникновения до 7 вариантов «пого», разобраться с которыми путем летного эксперимента может оказаться просто невозможным. По выбранной методике выявления «пого» только для отработки этого узла может потребоваться до 7 полетов системы Starship со взрывами вблизи посадочной башни.

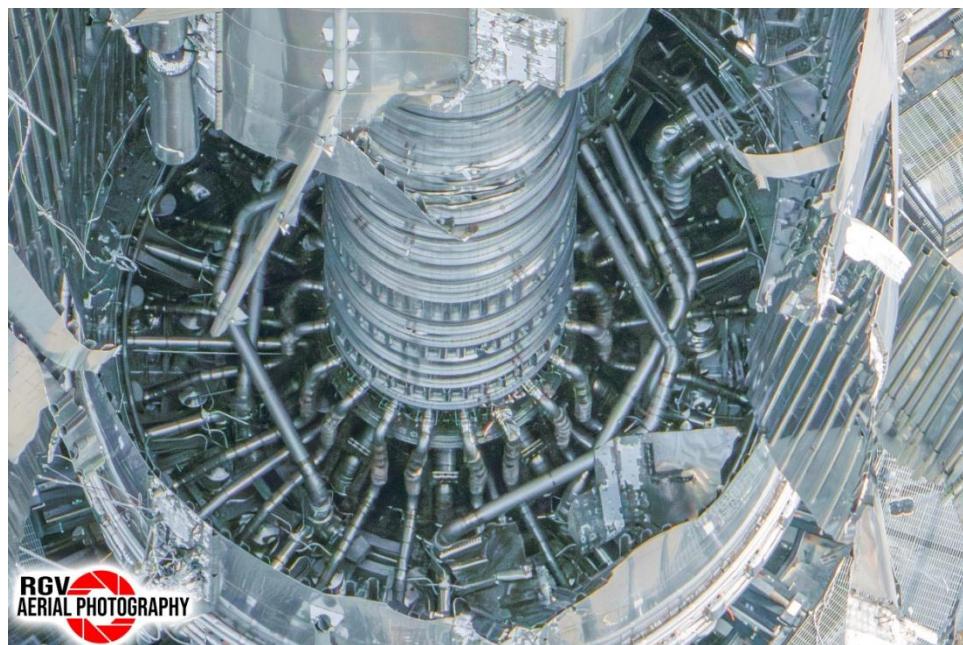


Рис. 6 – Видимая часть трубопроводов, идущих от бокового посадочного бака кислорода к двигателям бустера SH18 версии V3 [7]

По какой же причине возникла такая явно несбалансированная архитектура системы распределения топлива бустера SH18 версии V3 из вполне логичной архитектуры предыдущей версии? Как ни странно, вследствие борьбы с «пого». Самым динамически сложным маневром, осуществляемым бустером системы Starship является бустбэк – разворот его вокруг поперечной оси на 180° после горячего разделения ступеней при работающих 3 центральных двигателях и 10 запускаемых в процессе разворота двигателях внутреннего кольца. Второй полет продемонстрировал, что именно в этот момент при первоначально выбранном режиме работы двигателей на бустере возник процесс «пого», который привел к взрыву, разнесшему бустер на мелкие кусочки [6, 10]. Пересчет частоты гидроакустических осцилляций по формуле, полученной компанией SpaceX из российской статьи, и снижение тяги двигателей для выхода из «зоны пого» позволили в третьем полете пройти эту фазу полета без взрыва, см. рис. 7.

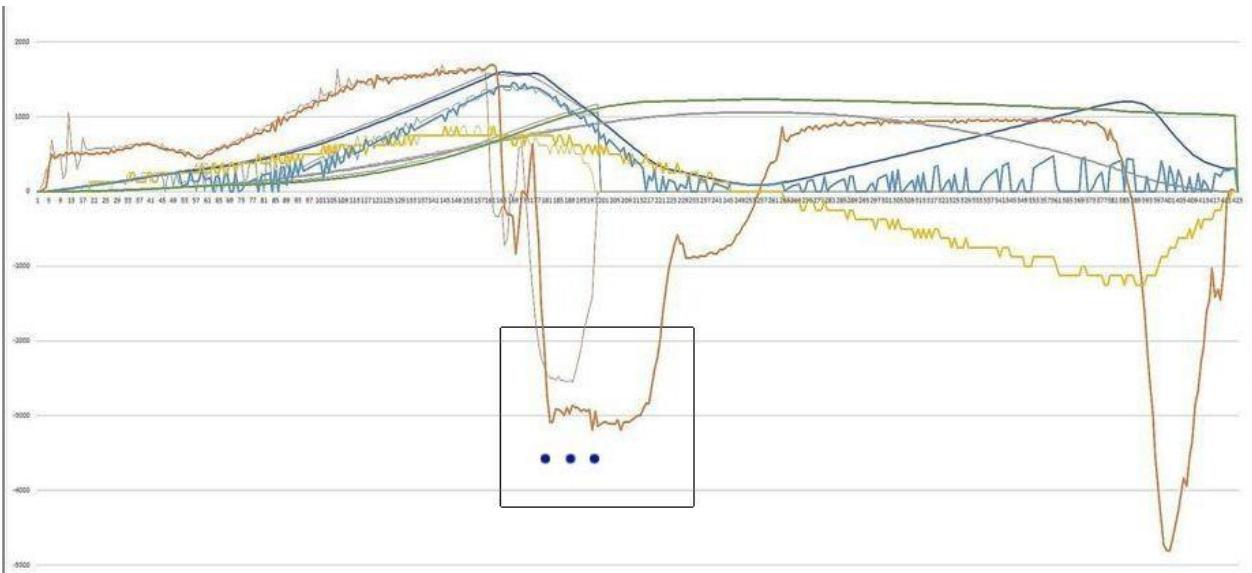


Рис. 7 – Ускорение, скорость, высота и прямая (горизонтальная) дальность, а также горизонтальная и вертикальная компоненты скорости бустера системы Starship во втором и третьем полетах [6]

Сравнивая ускорения бустеров во втором – 25 м/с^2 (тонкая серая линия) и в третьем – около 30 м/с^2 (более толстая сиреневая линия) полетах на квазистационарном участке бустбэка, выделенном прямоугольной рамкой на рис. 7, с учетом того, что во втором полете на этой части траектории работало только 9 двигателей из 13, легко получить, что в третьем полете тяга в расчете на один двигатель была, примерно, на 20 % ниже, чем во втором. Расчетное ускорение во втором полете при всех работающих двигателях должно было составлять около 36 м/с^2 . Его уровень показан на рис. 7 тремя синими точками. Именно этот режим неожиданно для разработчиков системы Starship оказался внутри зоны возбуждения «пого» по осцилляциям в системе подачи кислорода в двигатели внутреннего кольца бустера.

Взрыва бустера при бустбэке в третьем полете удалось избежать, однако, снижение тяги двигателей оказалось недостаточным, и автоколебания в третьем полете все же возникли еще в достаточно слабой форме в самом конце этой фазы полета, что привело к отклонению финального положения вектора скорости после отключения двигателей и выходу бустера на нерасчетную траекторию [6]. В следующем, четвертом полете тяга двигателей была снижена еще на 3 %, так что максимальное ускорение бустера (тонкая серая линия внутри прямоугольника) стало примерно равным 29 м/с^2 , см. рис. 8:

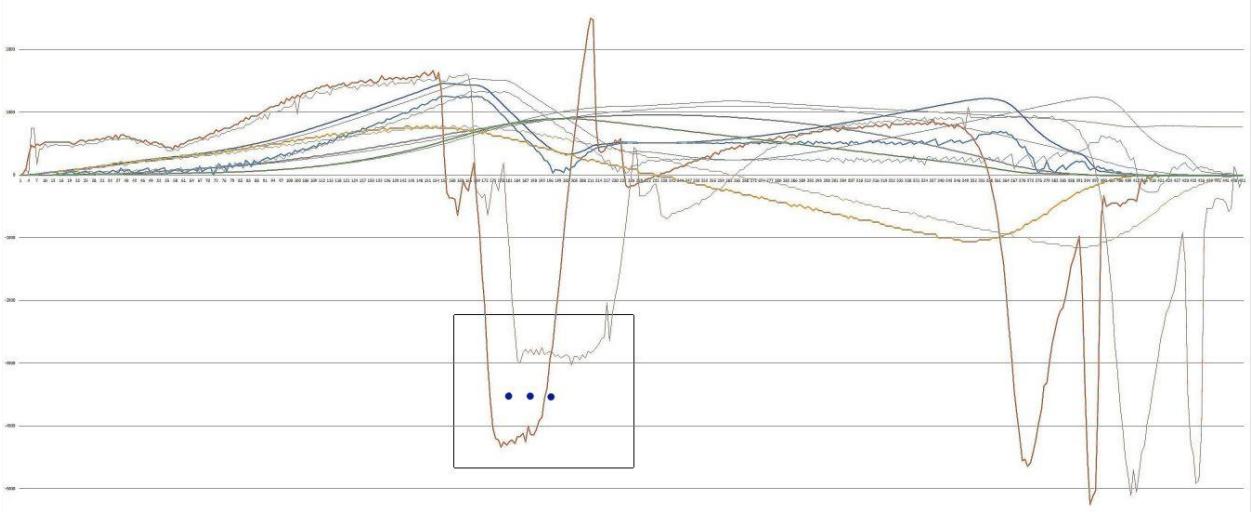


Рис. 8 – Ускорение, скорость, высота и прямая (горизонтальная) дальность, а также горизонтальная и вертикальная компоненты скорости бустера системы Starship в четвертом и пятом полетах [6]

На этот раз все прошло по плану, и это был первый полет без взрывов и больших разрушений, когда обе ступени смогли плавно приводниться, только вторая ступень сильно, до дыр обгорела. Однако в следующем полете бустбэк прошел форсировано, с уровнем тяги, который был выше опасного настолько же, насколько в четвертом полете он был его ниже (ускорение возросло с 29 до 43 м/с^2), см. на рис. 8 на тонкую серую и толстую сиреневую линии внутри прямоугольника. При этом время маневра соответственно сократилось. И

с тех пор, в дальнейшем всегда планировался такой же форсированный бустбэк, по крайней мере, это можно утверждать вплоть до восьмого пуска, начиная с которого демонстрация этих данных была прекращена.

И все было бы хорошо, если бы не одно обстоятельство – в отличие от большинства первых ступеней ракет (например, Saturn V и Falcon 9), у бустера системы Starship бак с тяжелым окислителем находится позади бака более легкого горючего, рядом с силовой установкой (такая же конструкция – у ракет H1 и New Glenn). Понятно, что размещать центр инерции как можно ближе к носовой части полезно для путевой устойчивости и управляемости одноразовой ракеты, но для многоразовых ступеней путевая устойчивость, видимо, важнее на заключительном, возвратном участке траектории, когда она летит в обратном положении. Из этих соображений, похоже, и было выбрано такое расположение баков на первой ступени у ракет Starship и New Glenn (у H1 такой выбор был вызван чисто геометрическими причинами).

Однако, это решение для бустера системы Starship в совокупности с проявленным на втором году полетов стремлением как можно сильнее форсировать разворот при бустбэке привело к новой неожиданной проблеме, которую стали решать в версии V3 этой ракетной системы. Так как при таком расположении баков нижняя часть бака метана и силовая установка находятся по разные стороны от центра инерции ступени, при вращении центробежное ускорение оказывается направленным вверх от нижней крышки этого бака, противодействуя прижатию к ней топлива. Кроме того, на часть двигателей внутреннего кольца добавляется воздействие еще и тангенциального ускорения от закрутки бустера. И при форсированном бустбэке, по оценкам, суммарное «отжимающее» ускорение может составить величину не менее 15 м/с^2 , что заметно превышает начальное продольное «прижимающее» ускорение от работы только трех центральных двигателей ($\sim 10 \text{ м/с}^2$). Так что динамика бустбэка сложна, а того небольшого количества метана, которое хранилось в распределительном коллекторе на дне кислородного бака (см. рис. 3) может и не хватить для выхода всех двигателей внутреннего кольца на рабочий режим и достижения тем самым устойчивого питания всех 13-ти двигателей, работающих при бустбэке. Видимо, в седьмом полете инцидент с отключением одного из двигателей внутреннего кольца, снова включившегося потом при посадке, мог быть связан с этим эффектом. Поэтому, надо полагать, и было принято решение о резком увеличении диаметра трубопровода для подачи метана, чтобы в его нижней части как в специальном расходном баке при любых разворотах хранилось бы достаточное количество горючего по другую сторону от центра инерции и рядом с двигателями.

Однако, как уже говорилось выше, это привело к смещению напорного посадочного кислородного бака к боковой стенке основного, и к появлению целого пучка труб разной длины для подачи кислорода к двигателям. Это вполне можно рассматривать как создание сцены для весьма вероятного появления небольшого оркестра (своеобразного секстета, состоящего из центрального исполнителя и 6 пар боковых), при посадке исполняющего гидроакустические мелодии на 7 различных частотах. Так что, пока одни инженеры компании SpaceX в поте лица своего, изучая аварии и изменяя режимы работы двигателей, подавляют выявленные варианты «пого», другие с не меньшим усердием создают условия для их возникновения в еще большем количестве. Что при этом делает руководство компании, сказать трудно. Но, пожалуй, уже понятно, что управление программой Starship, по сути, утеряно. А, в общем, все весьма похоже на бой Геракла с многоголовой Лернейской гидрой, но без прижигания возницей Геракла Иолаем горящими головнями оснований срубленных голов гидры, чтобы новые головы больше не отрастали [11].

Ничего бы этого не потребовалось, если бы баки с топливом были расположены как обычно: впереди – окислитель, сзади – горючее, так же как на старшем брате системы Starship – ракете Falcon 9. Тогда бы нижние днища обоих баков находились бы вместе с силовой установкой по одну сторону от центра инерции ступени, или, по крайней мере, при малом количестве топлива, низ верхнего бака был бы недалеко от центра инерции, и центробежное ускорение было бы небольшим даже при резких поворотах ступени. И стоило ли принятное размещение баков, вызвавшее, в итоге, усложнение и утяжеление топливной системы из-за введения в ее структуру огромной трубы, совмещающей свою основную функцию с хранением метана, выигрыша, полученного в системе управления бустером при посадке – это вопрос, на который сейчас вряд ли сможет, и, главное, захочет ответить руководство компании SpaceX.

IV. ...

Этот раздел работы, описывающий решение проблемы посадочного кислородного бака ускорителя Starship, в настоящее время закрыт для публичного доступа.

Выводы

1. Завершение к концу 2025 года практически одновременно важных этапов программ создания двух наиболее перспективных на данный момент ракетных систем – Starship и New Glenn, а также авария на криогенных испытаниях последней версии V3 бустера системы Starship 21 ноября 2025 года, позволили провести анализ некоторых принципиальных особенностей конструкции системы Starship и причины ее изменений от версии к версии.

2. В его ходе было показано, что на первый взгляд необъяснимое увеличение поперечного сечения трубопровода, питающего метаном двигателей бустера, вызвано проблемами устойчивости его подачи при быстром развороте бустера вокруг поперечной оси во время бустбэка.
3. В свою очередь, увеличение скорости этого разворота, начиная с пятого полета системы Starship, связано со стремлением повысить полезную нагрузку ракетной системы, снизив, таким образом, потери характеристической скорости, и, следовательно, расход топлива на бустбэк.
4. Показано также, что всех этих проблем можно было бы избежать, если бы основной кислородный бак был бы расположен перед основным метановым баком.
5. Беспрецедентный поперечный размер центрального трубопровода метана привел к вытеснению имевшегося ранее в центре напорного бака кислорода к боковой стенке основного бака, из-за чего возникли трубопроводы с не менее чем 7 разными длинами, подающие кислород в двигатели при посадке бустера.
6. А это, в свою очередь, означает, что появляются возможности для возникновения до 7 новых вариантов автоколебаний типа «пого», которые могут привести к аварии бустера в момент посадки.
7. Подавить такое число новых вариантов «пого» применяемым компанией SpaceX методом летного эксперимента с последующим пересчетом и изменением режимов работы двигателей может оказаться просто физически невозможно.
8.
9.

Выводы 8 – 9, касающиеся решения проблемы посадочного кислородного бака ускорителя Starship, в настоящее время закрыты для публичного доступа.

10. Оценка всей совокупности конструкторских решений, использованных при разработке последней версии бустера, позволяет утверждать, что полноценное управление программой Starship, по сути, утрачено.

Ссылки

1. Ю. И. Лобановский – Почему бустер ракеты New Glenn совершил посадку только во втором полете? *Synerjetics Group*, 30.11.2025, 10 с. // http://www.synerjetics.ru/article/NG_landing.htm
2. Ю. И. Лобановский – Причина аварии системы Starship в первом полете. *Synerjetics Group*, 05.10.2023, 20 с. // http://www.synerjetics.ru/article/starship_crash.htm
3. Ю. И. Лобановский – Причины аварий обеих ступеней системы Starship во втором полете. *Synerjetics Group*, 04.12.2023, 10 с. // http://www.synerjetics.ru/article/second_flight.htm
4. Ю. И. Лобановский – Парадокс двух полетов системы Starship и его разрешение. *Synerjetics Group*, 30.03.2024, 16 с. // <https://www.synerjetics.ru/article/paradox.htm>
5. Ю. И. Лобановский – Второй кризис программы Starship. *Synerjetics Group*, 30.03.2025, 11 с. // https://www.synerjetics.ru/article/second_crisis.htm
6. Ю. И. Лобановский – Почему в девятом полете вторая ступень системы Starship не взорвалась, а стала неконтролируемо вращаться? *Synerjetics Group*, 15.05.2025, 10 с. // https://www.synerjetics.ru/article/ninth_flight.htm
7. RGV Aerial Photography. *Reddit*, November 23, 2025 // https://www.reddit.com/r/SpaceXLounge/comments/1p4y1p7/detailed_views_from_inside_the_booster_18_aft/
8. Feeding the Beast: Super Heavy's Propellant Distribution System. *Ringwatchers*, 17 December 2023 // <https://ringwatchers.com/article/booster-prop-distribution>
9. RGV Aerial Photography – @RGVaerialphotos. *X-Post*, November 29, 2025 // <https://x.com/RGVaerialphotos/status/1994828711816818845?s=19>
10. Ю. И. Лобановский – Механизм взрыва первой ступени системы Starship во время ее возвратного маневра. *Synerjetics Group*, 12.01.2024, 11 с. // <http://www.synerjetics.ru/article/boostback.htm>
11. Лернейская гидра. *Wikipedia* // https://ru.wikipedia.org/wiki/Лернейская_гидра

Москва,
14.12.2025

Ю. И. Лобановский