

В работе показано, что единственным разумным объяснением попытки запуска для бустбэка (возвратного маневра) в двенадцатом полете системы Starship всех 33-х двигателей бустера вместо обычных 13 было стремление избежать возбуждения автоколебаний типа «пого» в новой версии бустера V3 на этом режиме полета. Увеличение в 2.5 раза числа двигателей, участвующих в этом маневре позволило бы снизить их тягу от номинальной до практически минимально допустимой – до 40 % от номинала. Это привело бы к увеличению частоты гидроакустических осцилляций в топливной системе бустера примерно в 1.6 раза, что, как ожидала компания SpaceX, вывело бы бустер из зоны риска. Использование подобного, гибкого метода проектирования «вслепую» было вызвано тем, что теория «пого» ей недоступна, а строить сначала наземные экспериментальные стенды, а затем проводить длительные исследования по подавлению «пого», не входит в планы SpaceX.

Однако, более низкая устойчивость работы ракетных двигателей на границе допустимых режимов работы привела к их многократным отказам и даже взрыву одного из двигателей при включении во время чрезвычайно динамически сложного режима начала бустбэка – разворота бустера для полета в противоположном направлении, а также к срыву маневра и, по-видимому, взрыву бустера при попытке мягкого приводнения.

Ключевые слова: *Starship, «пого», авария, гибкое проектирование*

I. Описание попытки парадоксального бустбэка бустера системы Starship в двенадцатом полете

Во время двенадцатого полета системы Starship 22 мая 2026 года – первого полета новой версии V3, процедура бустбэка – торможения первой ступени (бустера) после разделения связки и разворота его траектории полета в противоположном направлении для возвращения к месту старта, начала осуществляться совершенно не так, как это было ранее при полетах версий V1 и V2. Во-первых, во время горячего разделения ступеней не были отключены не только 3 центральных двигателя, как раньше, но и еще 2 из 10 двигателей внутреннего кольца, симметрично расположенные относительно центральной оси бустера. Кроме того, также была попытка задействовать на этом режиме полета 20 двигателей внешнего кольца, ранее включавшихся только один раз на земле [1]. До этого полета в ходе бустбэка после разделения ступеней включались только 10 двигателей внутреннего кольца.

В соответствии с данными по визуализации работы двигателей, после того как стали запускаться оставшиеся двигатели внутреннего кольца, они, как будто бы на доли секунды снова отключились, а затем все они, кроме двигателя E12, стали более-менее устойчиво работать. После этого начали было запускаться двигатели внешнего кольца (что ранее было физически невозможно) двумя симметричными группами по 10 штук (группы – двигатель через двигатель) тоже в несколько неустойчивом режиме. И тут взорвался не выключавшийся со старта двигатель E6, и почти сразу же прекратили работу несколько двигателей в его окружении. Доли секунды спустя их осталось уже только 10, а затем 5 двигателей внешнего кольца были выключены, и продолжили работу только 5 двигателей внутреннего кольца, способные изменять направление вектора тяги. Это были двигатели, в основном, наиболее удаленные от места взрыва, но вскоре и они были отключены. При этом с их помощью удалось стабилизировать бустер, начавший быстро и беспорядочно вращаться из-за асимметрии тяги, что свидетельствует о выдающейся работе его системы управления в условиях серьезной аварии.

Далее бустер полетел в прежнем направлении, и аэродинамически затормозился, причем параметры его торможения мало отличались от таковых при прежних пусках [2], за исключением, естественно, противоположного направления полета. Это означает, что на этом участке траектории он продолжал оставаться полностью управляемым. Однако после попытки запуска двигателей перед посадкой примерно на высоте около километра над океаном, через 2 – 3 секунды после этого произошел взрыв, как можно судить, полностью разрушивший бустер B19. Это была уже второе нештатное разрушение бустера новой версии. Первое произошло за 7 месяцев до этого, когда при наземных испытаниях был полностью разрушен бустер B18 [3].

Ранее, при разделении ступеней постоянно работали 3 центральных двигателя, и при бустбэке включались еще 10 двигателей внутреннего кольца. В 7 последних полетах с пятого по одиннадцатый эти 13 двигателей работали в этот момент на номинальном режиме, обеспечивая ускорение около 43 м/с^2 [4], что приводило к достаточно эффективному маневру и, в то же время, не создавало чрезмерную нагрузку на конструкцию бустера. Поэтому, попытка в двенадцатом полете запустить все 33 двигателя бустера привела, пожалуй, всех компетентных внешних наблюдателей в состояние, близкое к изумлению – зачем это было сделано? Вследствие этого вскоре возникло несколько объяснений, которые при сколько-нибудь внимательном рассмотрении не выдерживают ни малейшей критики: «тестирование полной тяги новых двигателей Raptor-3» (зачем?), «радикальное сокращение времени маневра» (а что будет при этом с

конструкцией бустера?), «устранение сложной системы селективного запуска» (то есть снятие отсечных клапанов на каждом отдельном двигателе – это действие было бы уже за пределами основополагающих принципов конструирования).

Вряд ли целесообразно далее разбирать все эти предположения вследствие их практически полной нецелесообразности или бессмысленности. Ведь дальнейший значительный рост тяги силовой установки бустера при бустбэке приводит к совершенно неприемлемым с конструктивной точки зрения перегрузкам, особенно, с учетом несимметричного расположенного у версии V3 посадочного кислородного бака. На взгляд автора данной работы – это были попытки объяснить необъяснимое под действием своеобразного шока, вызванного созерцанием совершенно парадоксальной картины. Однако, и эти комментаторы достаточно быстро пришли к мнению, что при бустбэке в двенадцатом полете произошла попытка размена 13 двигателей, работающих на номинальном режиме, на 33 двигателя, работающих на режиме максимально возможного дросселирования, то есть при тяге около 40 % от номинала [5], что приводит к практически одинаковой тяге всей силовой установки. А зачем это было сделано, если эффективность и устойчивость работы силовой установки при этом снизилась, объяснялось так, как было указано выше. Однако, если рассмотреть весь процесс испытаний системы Starship, начиная с первого полета 20 апреля 2023 года, учитывая и ту информацию, которую компания SpaceX скрывала в течение этих 37 месяцев, а также менталитет ее руководителя и главного конструктора – И. Маска, решение этого парадокса становится вполне очевидным.

II. Объяснение наблюдавшегося феномена

Итак, вкратце опишем доступную внешнему миру часть информации обо всех двенадцати тестовых полетах системы Starship через призму идеи, связывающей воедино все нюансы и парадоксы, имевшие место быть в течение всего этого периода времени.

1. В первом тестовом полете система Starship, в виде связки из двух ступеней, испытывала сильнейшие весьма характерные и, как будто бы никогда ранее не встречавшиеся продольные колебания (в виде так называемых суперспайков) с периодом около 12 секунд. Они, как было показано в работе [6], возникли вследствие попыток продвинутой системы управления этого ракетного аппарата подавить, временно снижая тягу, возникший тогда процесс автоколебаний типа «пого». Он возбуждается при близости или кратности частот продольных упругих колебаний корпуса и гидроакустических осцилляций в топливной системе ракеты. Примерно, через 145 секунд полета ракета потеряла управление и, вскоре была подорвана.

2. Межступенчатый отсек горячего разделения, срочно разработанный и введенный в конструкцию системы Starship в интервале между первым и вторым полетами [7], изменил собственную частоту упругих продольных колебаний корпуса связки ступеней, и процесс «пого» на этом режиме исчез. Одновременно, за эти 7 месяцев была полностью изменена схема разделения ступеней – перешли к горячему разделению, так что, по существу, во второй полет отправилась первая, по существу, новая версия системы Starship, только не получившая соответствующего обозначения [8].

3. При этом на слово «пого» в компании SpaceX был наложен запрет [9, 10].

4. В конце весны – начале лета 2023 года автор данной работы построил интегральную теорию «пого», из которой при больших перепадах давления на насосе, весьма характерных для топливной системы ракетных двигателей Raptor, которые там использовались, следовала простая связь между частотой гидроакустических осцилляций в трубопроводах, подающих топливо в двигатель, и режимом его работы (при фиксированной геометрии топливной системы) [6].

5. При первой попытке бустбэка во втором полете в ноябре 2023 года бустер взорвался из-за «пого», совершая свой уже свой индивидуальный, полет [11]. Вторая ступень также взорвалась на динамически сравнительно спокойном заключительном участке разгона [12].

6. На рубеже 2023/2024 годов статья о теории «пого», упомянутая в п. 4, в которой описывалась указанная связь между частотой гидроакустических осцилляций и режимом работы двигателя, но не были показаны ни соответствующие уравнения, ни описаны методы их решения, стала доступной компании SpaceX [9].

7. Через полтора-два месяца после этого, в третьем полете при бустбэке тяга двигателей на основании данных о гидроакустических и упругих частотах колебаний из второго полета и в соответствии с указанной выше зависимостью была снижена на 15 – 20 %, и бустер не взорвался [9]. Но на самом финише все-таки началось возбуждение автоколебаний, и, поэтому отключение двигателей бустера после бустбэка произошло не строго одновременно. Из-за этого возвратная траектория бустера, как известно, довольно сильно отклонилась от расчетной [13].

8. В четвертом полете при бустбэке тяга была снижена ещё на 3 % (примерно, до ~ 70 % от номинала), и этот режим был пройден полностью успешно [4].

9. В пятом полете компания SpaceX рискнула: двигатели быстро проскочили опасный режим, и тяга при бустбэке была вполне успешно доведена до номинала. И после этого вплоть до последнего, двенадцатого, полета, бустбэк проводился всегда одинаково: с включением 13 двигателей, работающих на

номинальном режиме (или, когда случались единичные отказы двигателей – с включением 12 двигателей и с чуть более длительным временем их работы) [4].

10. Нечто подобное происходило и со второй ступенью (кораблем Ship). После его взрыва во втором полете (как потом выяснилось, вследствие автоколебаний с возбуждением гидроакустических осцилляций в канале питания вакуумных двигателей метаном) обычным способом борьбы с «пого» стало их отключение за 20 – 30 секунд до прекращения разгона на всех вторых ступенях версии V1, то есть до шестого полета включительно [14].

11. Для того, чтобы избежать этого на версии V2 второй ступени, можно было бы пойти традиционным путем, и разработать демпферы для подавления гидроакустических колебаний или, просто рассчитать безопасную длину трубопроводов по новой теории. Вместо этого компания SpaceX, как известно, создала совершенно новую систему питания вакуумных двигателей с тремя отдельными длинными трубопроводами вместо исходного единого трубопровода с шестью относительно короткими отводами от него к каждому из шести двигателей, рассчитывая, что такая конфигурация труб обеспечит отсутствие «пого» [15].

12. При этом можно отметить, что на рубеже 2023/2024 года автору не была известна конструкция трубопроводов для подачи метана второй ступени с их разветвлением перед двигателями. И он, по существу, оценивал возможность возникновения «пого» по этому каналу для таких отдельных длинных трубопроводов, какими они стали в версии V2, и пришел к выводу об их безопасности [11]. И именно такая конфигурация появилась спустя год на второй ступени системы Starship [15].

13. В таком варианте конструкции трубопроводов для подачи метана автоколебания типа «пого» действительно исчезли. Но в первом полете версии V2 (седьмом полете по общему счету) компания SpaceX вдруг выяснила, что длинные, тонкие и ничем не подкрепленные трубопроводы, проходящие сквозь бак кислорода, испытывают поперечные резонансные колебания. И один из них разрушился на сравнительно поздней стадии разгона второй ступени, когда большая часть кислорода была израсходована, и перестала демпфировать эти поперечные колебания [15].

14. После того, как было проведено подкрепление этих трубопроводов, на чуть более позднем этапе разгона вдруг возникли автоколебания типа «пого» уже в кислородном канале (как рассчитывалось в той ранней статье [11]), и в последующих полетах вакуумные двигатели все равно приходилось отключать на завершающем участке разгона [15].

15. В полетах с седьмого по одиннадцатый полеты использовалась та же версия бустера, что и ранее, так что никаких проблем с автоколебаниями на бустере в этих полетах не было.

16. Необходимость увеличения выводимой системой Starship полезной нагрузки потребовала перехода на ее новую версию V3, в которой были изменены и первая и вторая ступени, а ракетные двигатели Raptor-2 были заменены на более совершенные двигатели Raptor-3. При этом, по существу, все эмпирические наработки о безопасных по автоколебаниям типа «пого» режимах работы, полученные ценой шести взрывов и двух критических потерь ориентации в 11 полетах на прежних версиях системы Starship, потеряли свою ценность. Использувавшийся компанией SpaceX пересчет режима работы двигателей по простой формуле после очередного возбуждения «пого», естественно, опять стал невозможен, нужно было решать уравнения, описывающие процесс, но их у SpaceX не было, и нет.

17. Компании осталось только снова начинать цикл полетов с эмпирическими поисками опасных по автоколебаниям режимов. Из наработанного опыта можно было понять, что резкое снижение тяги двигателей на самом сложном для них режиме бустбэка может обеспечить отсутствие «пого». И тогда был произведен «размен 13/33» – число активных двигателей при бустбэке было решено увеличить с 13 до 33, то есть в 2.5 раза, а их тяга должна была быть снижена тоже в 2.5 раза, до максимально возможного уровня дросселирования (минимального режима устойчивой работы) – до 40 % от номинала [5]. В таком случае частота гидроакустических колебаний возрастала почти в 1.6 раза и явно выходила из зоны возбуждения «пого», границы которой изменились вследствие изменения массы бустера, длины его трубопроводов и давления в камере сгорания его двигателей.

18. Но этот режим работы двигателя около нижней допустимой границы работы уже сам по себе менее устойчив, чем на большой тяге, близкой к номинальной. А бустбэк – это самый сложный режим для работы двигателей, так как в это время бустер со значительными перегрузками (до ~ 4.5) совершает интенсивные маневры по изменению ориентации, переворачиваясь на ~ 180°.

И, как показал летный эксперимент, повторный запуск двигателей не удался [1]. На рис. 1 продемонстрировано 12 последовательных изображений состояния силовой установки бустера в этот момент из источника [16], где были использованы замедленные в 4 раза изображения с экрана состояния двигателей бустера на видео [1]. Здесь белые кружки – это работающие двигатели, темно-серые – выключенные, голубые – включающиеся, фиолетовые – отключающиеся, светло-коричневые – потерявшие тягу и управление до взрыва двигателя Е6, темно-коричневые – после его взрыва. Светло-шоколадный цвет двигателя Е6 и окружность такого же цвета вокруг него на крайнем правом изображении в среднем ряду рис. 1 указывают на его взрыв и зону распространения от него взрывной ударной волны в тот момент. И хотя эти изображения только в достаточно слабой степени отображают реальные изменения состояния силовой установки во время попытки начать маневр бустбэка, даже по ним видно, как хаотически реагировали двигатели на вполне четкий план их запуска, описанный в начале статьи. И вот как будто бы

его почти удалось выполнить – за исключением трех двигателей, присоединившихся к задолго до этого полностью отключившемуся двигателю E30 внешнего кольца, остальные 29 двигателей либо уже работали на минимальном режиме, либо включались (см. правое центральное изображение в среднем ряду). Но в этот момент взорвался постоянно работавший со старта двигатель внутреннего кольца E6, и ударная волна от него погасила все двигатели за исключением десяти (см. левое центральное изображение в нижнем ряду). Тут же произошло отключение всех пяти оставшихся двигателей внешнего кольца с фиксированным направлением вектора тяги, чтобы они не мешали стабилизировать бустер с помощью пяти двигателей внутреннего кольца.

Хотя после этого бустер не разрушился, и даже чудом сохранил ориентацию и управление, его полет в противоположную сторону от запланированного направления завершился взрывом и разрушением во время попытки посадки в океан.

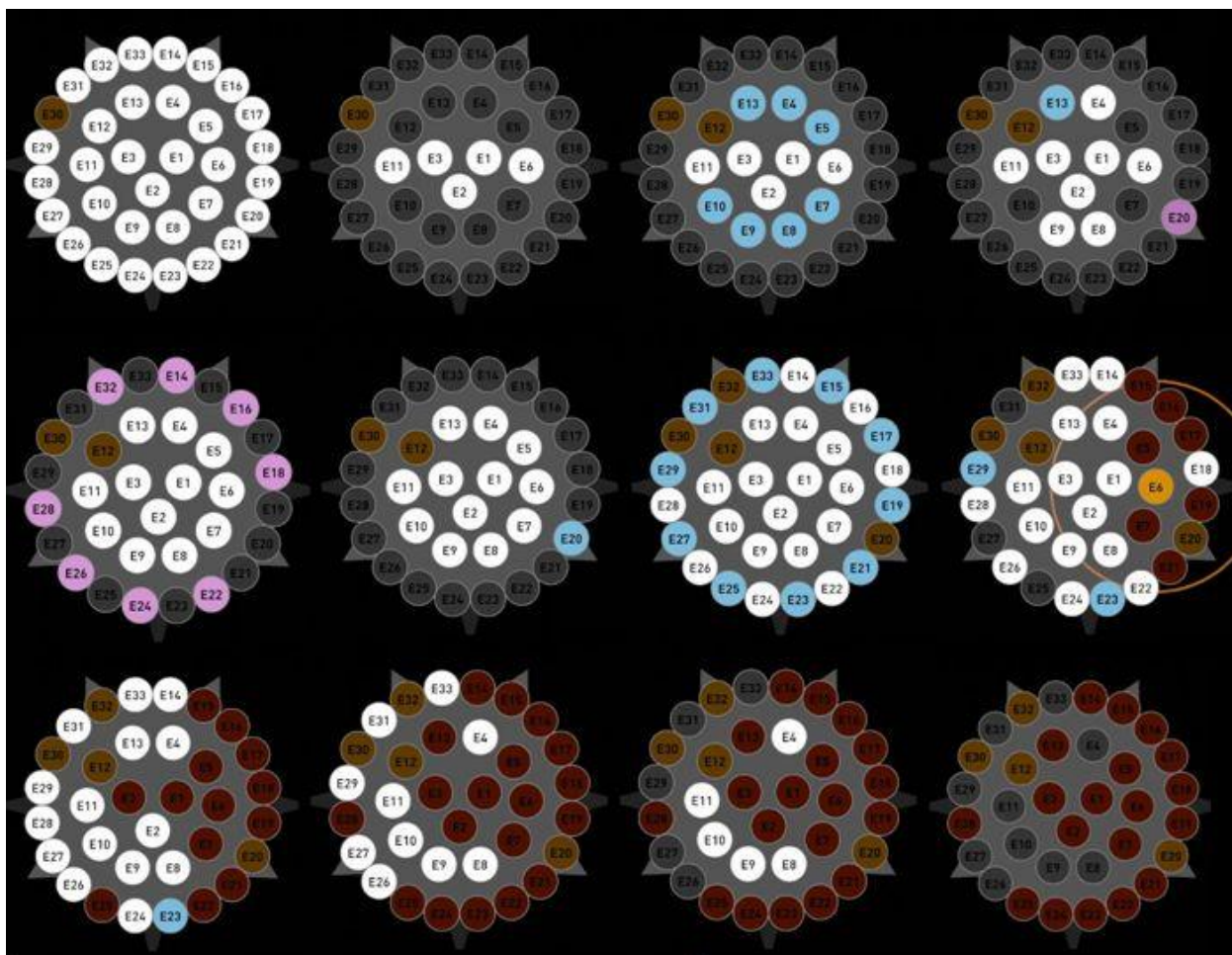


Рис. 1 – 12 последовательных изображений состояния силовой установки бустера при попытке начать маневр бустэка

III. Размен двигателей 13/33 и метод проектирования компании SpaceX в программе Starship

Компания SpaceX в программе Starship, как и во всех других, использует метод гибкого проектирования (Agile Methodology). Главным его принципом является быстрое прототипирование, при котором возможный на данный момент и не слишком глубоко проработанный экземпляр конечного продукта испытывают, получают данные (в ракетной технике, обычно, после его потери) и модернизируют по результатам испытания. Затем его снова испытывают и модернизируют, и так до получения конечного продукта, удовлетворяющего требованиям разработчика и/или заказчика, или прекращения проекта.

Это изначально предполагает использование достаточно большого количества версий разрабатываемой системы и большое количество испытаний. Но когда разрабатываемая система достаточно сложна для того, чтобы в ней происходили процессы, которые не в полной мере контролируются ее создателями, число версий системы и ее испытаний может неограниченно расти. Хотя испытания и проводятся для выявления и устранения неучтенных при предварительном проектировании факторов и обстоятельств, появление неконтролируемых или плохо понимаемых процессов может полностью сломать всю процедуру гибкого проектирования. Она перестает сходиться к тому, что можно было бы признать окончательным результатом проектирования.

И возможно, что такими процессами в проекте Starship могут оказаться множественные проявления автоколебаний типа «пого». Когда после первого полета компания SpaceX неожиданно столкнулась с «пого», на этот вызов последовал быстрый ответ в лучших традициях гибкого проектирования. При этом, видимо, в расчете на то, что это был единичный эпизод, было решено вообще не обнародовать эту информацию. Однако эти вызовы стали множиться, и требовали уже качественно иных ответов. Так как полноценная теория «пого» на тот момент была неизвестна, для борьбы с ним требовалось создания сложных наземных экспериментальных установок и достаточно длительных исследований, что не вписывалось в парадигму компании SpaceX, то есть в стиль И. Маска. Неизвестно, чем бы все это закончилось, может быть в скором времени и прекращением проекта Starship, если бы в это же время компания SpaceX не получила, вдруг, доступ к формуле пересчета частот гидроакустических осцилляций по режиму работы ракетного двигателя, использование которой хорошо согласовывалось с принципами гибкого проектирования. К четвертому полету все проявления «пого» на версии V1 были подавлены.

Однако, в следующей версии V2 системы Starship, в которой была увеличена вторая ступень, пришлось бы снова проходить прежний путь – получить хотя бы один взрыв, а затем использовать полученные данные для пересчета режима работы двигателей. Компания SpaceX, стремясь избежать подобной ситуации, решила воспользоваться уже опубликованными данными для варианта, заведомо устойчивого по продольным автоколебаниям, с отдельными длинными линиями питания двигателей метаном, но не предвидела других проблем, и снова затратила на подавление «пого» 3 первых полета версии V2.

Подобная ситуация возникла снова при переходе к версии V3 – не умея рассчитать частоту гидроакустических осцилляций для гарантированного подавления процесса «пого», который должен был возникнуть на новом бустере на другой частоте, очевидно, было решено настолько сильно ее изменить, насколько это в принципе было возможно. Для этого на двигателях внешнего кольца были установлены средства их запуска в полете, и был осуществлен «размен 13/33» – вместо номинального режима двигателя при бустбэке должны были работать на режиме, близком к минимальному. Однако, снова как в первом полете версии V2 не были учтены все факторы, и компания SpaceX получила в двенадцатом полете новую аварию и новый взрыв. Мы видим, как уже в третий раз все возвращается на круги своя. И, похоже, что при таком подходе к созданию весьма сложной системы как Starship, так будет всегда – при любом ее изменении всякий раз потребуются снова проводить цикл испытаний с авариями и взрывами.

Выводы

1. Попытка запуска в двенадцатом полете системы Starship для бустбэка всех 33-х двигателей вместо обычных 13 была вызвана стремлением избежать на этом режиме возбуждения автоколебаний типа «пого» на новой версии бустера V3.
2. Увеличение в 2.5 раза числа двигателей, участвующих в процессе позволило снизить их тягу от номинальной до минимально допустимой – до 40 % от номинала.
3. Это увеличило бы частоту гидроакустических осцилляций примерно в 1.6 раза, и, как ожидала компания SpaceX, вывело бы ее из зоны риска по «пого».
4. Но более низкая устойчивость работы ракетных двигателей на границе допустимых режимов работы привела к их многократным отказам и даже взрыву одного из двигателей при включении во время чрезвычайно динамически сложного режима начала бустбэка – разворота бустера для полета в противоположном направлении.
5. Отказы большинства двигателей привели к срыву маневра и, по-видимому, взрыву бустера при попытке его мягкого приводнения.
6. Подобный метод проектирования «вслепую» был вызван тем, что теория «пого» компании недоступна, а сначала строить наземные экспериментальные стенды, а затем проводить длительные исследования по подавлению «пого», не входит в планы SpaceX.
7. При этом чтобы не показывать свои слабости, компания полностью закрыла информацию о самом существовании этих опасных процессов.

Ссылки

1. Starship's Twelfth Flight Test. *SpaceX*, May 22, 2026 // https://x.com/SpaceX/status/2057843268038082848?ref_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etweetembed%7Cterm%5E2057843268038082848%7Ctwgr%5E%7Ctwcon%5Es1_&ref_url=
2. OneSpeed – Starship Flight 12 UPDATES: Starbase TX, *NASASPACEFLIGHT*, Reply #633, 22 May 2026 // <https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?topic=64957.msg2791589#msg2791589>
3. RGV Aerial Photography. *Reddit*, November 23, 2025 // https://www.reddit.com/r/SpaceXLounge/comments/1p4y1p7/detailed_views_from_inside_the_booster_18_aft/
4. 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
5. K. C. Connor – Explain to me how Raptor isn't overpowered. *Reddit*, 10 Sep 2020 // https://www.reddit.com/r/SpaceXLounge/comments/ipwwiw/explain_to_me_how_raptor_isnt_overpowered/

6. Ю. И. Лобановский – Причина аварии системы Starship в первом полете. *Synerjetics Group*, 05.10.2023, 20 с. // https://www.synerjetics.ru/article/starship_crash.htm
7. Twitter SpaceX, @SpaceX, 18 August 2023 // <https://twitter.com/SpaceX/status/1692610662604702138>
8. 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
9. Ю. И. Лобановский – Парадокс двух полетов системы Starship и его разрешение. *Synerjetics Group*, 30.03.2024, 16 с. // <http://www.synerjetics.ru/article/paradox.htm>
10. Ю. И. Лобановский – Два эпизода из истории космонавтики: Сходство и различия. *Synerjetics Group*, 06.05.2024, 10 с. // https://www.synerjetics.ru/article/two_episodes.htm
11. 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>
12. Ю. И. Лобановский – Механизм взрыва второй ступени системы Starship во втором полете на финише ее разгона. *Synerjetics Group*, 18.01.2024, 7 с. // http://www.synerjetics.ru/article/second_stage.htm
13. Ю. И. Лобановский – Анализ основных результатов третьего и четвертого полетов системы Starship. *Synerjetics Group*, 24.06.2024, 12 с. // https://www.synerjetics.ru/article/forth_flight.htm
14. Ю. И. Лобановский – Тайны программы испытаний системы Starship: Анализ основных проблем ее первого этапа. *Synerjetics Group*, 08.03.2025, 10 с. // http://www.synerjetics.ru/article/starship_problems.htm
15. Ю. И. Лобановский – Второй кризис программы Starship. *Synerjetics Group*, 30.03.2025, 11 с. // https://www.synerjetics.ru/article/second_crisis.htm
16. TheSpaceEngineer – Twitter (X), May23, 2026 // <https://x.com/mcrs987/status/2058104321259041200>

Москва,
08.06.2026

Ю. И. Лобановский