

Причины проблем с посадкой бустера третьей версии системы Starship

Ю. И. Лобановский

Краткое содержание

Возбуждение автоколебаний типа «пого» являлось проблемой, не названной компанией SpaceX, но довлеющей над всей программой создания и развития многофазовой ракетной системы Starship. В результате проведения 11 полетов в период с апреля 2023 года по октябрь 2025 года компании удалось создать одну версию первой ступени системы Starship и две версии второй, которые стали способны совершать полеты без проявлений «пого».

Однако прошлогодний анализ конструкции топливной системы бустера версии V3 системы Starship, а также результаты проведенных за май и июль 2026 года двух ее полетов, показали, что автоколебания типа «пого» при посадке бустера вернулись снова, и, по-видимому, в увеличившемся числе. По крайней мере, по итогам второго аварийного полета бустера новой версии, 3 пары двигателей внутреннего кольца, которые попарно должны иметь одинаковые частотные зоны возбуждения автоколебаний, не смогли запуститься или выйти на рабочий режим, что является очевидным признаком «пого» при имеющейся конфигурации посадочной топливной системы. После этого недостаточная величина и асимметрия тяги привела к разрушению бустера, причем это произошло при обеих попытках его посадки.

Ключевые слова: *Starship V3, «пого», авария, третья версия*

I. Краткое описание результатов летных испытаний двух предшествующих версий системы

В настоящее время в рамках гибкой (agile) методологии происходит тестирование третьей версии системы Starship – 22 мая и 24 июля 2026 года, спустя более чем 3 года после первого суборбитального полета, были выполнены первый и второй пуски этой версии ракетной системы (двенадцатый и тринадцатый пуски с начала суборбитальных полетов).

Полеты первой версии ракеты продолжались 18 месяцев. Всего их было выполнено 6. Основным содержанием испытаний на этом этапе оказалось обнаружение и подавление множественных случаев возникновения автоколебательных процессов типа «пого», причем ни разу компания SpaceX об этом не обмолвилась ни единым словом [1]. «Пого» возникает, если частоты гидроакустических осцилляций в трубопроводах, подающих компоненты топлива к ракетным двигателям, оказываются в резонансе или становятся кратными частотам собственных продольных колебаний корпуса аппарата. Благодаря использованию приближенной формулы, связывающей частоту гидроакустических осцилляций с режимом работы двигателей, выведенную автором данной статьи через 2 месяца после первого пуска системы Starship [2], со всеми случаями возбуждения «пого» на первой версии системы компании SpaceX удалось справиться к четвертому – пятому испытательным полетам, правда, за счет некоторых дополнительных ограничений на работу двигателей, снижавших эффективность выведения полезной нагрузки. В итоге, удалось впервые вернуть бустер Super Heavy – первую ступень системы и подхватить его манипуляторами стартово-посадочного комплекса, а корабль Ship – вторая ее ступень, продемонстрировала способность в более или менее целом виде возвращаться в океан с суборбитальной траектории. Однако, несмотря на этот весьма существенный прогресс за первую фазу испытаний, выяснилось, что полезная нагрузка первой версии системы Starship оказалась околонулевой, что потребовало создания новой версии значительно большей стартовой массы.

Однако, для это было необходимо создать новую версию двигателей ракетной системы заметно большей тяги, так как на ее первой ступени диаметром 9 м было почти невозможно добавить к 33-м уже установленным там двигателям Raptor-2 дополнительные. При этом форсирование и облегчение двигателя Raptor-2, уже и так обладающего рекордными характеристиками, было достаточно длительным процессом. Поэтому в компании SpaceX решили создать вторую версию системы Starship как промежуточную между первой и целевой, третьей версией, которая по планам уже могла бы эксплуатироваться, пусть и в ограниченном формате. Третья версия должна была позволить выводить новые, существенно более тяжелые спутники Starlink третьей версии, а также обеспечить первичный доступ на Луну в рамках программы Artemis.

Итак, испытания второй версии ракетной системы Starship начались в январе 2025 года и продолжались около 9 месяцев. Двигатели и бустер в этой версии остались прежними, был только увеличен размер топливных баков второй ступени за счет небольшого увеличения ее длины и сокращения объема отсека полезной нагрузки, а также были изменены расположение передних флаперонов ступени и система подачи метана в 3 внешних двигателя ступени с вакуумными соплами. Это было сделано для того, чтобы подавить проявления «пого» на финише разгона второй ступени, что в первой версии, в итоге, устранялось просто их ранним отключением. Всего было проведено 5 пусков, так как один из 6 построенных кораблей взорвался на земле во время огневых испытаний. Бустеры, отработанные в рамках предыдущей серии испытаний работали почти безупречно, и дважды использовались повторно, но три первых полета второй версии корабля (с седьмого по девятый по общему счету) завершились катастрофически [1, 3].

В седьмом полете к аварии привели банальные поперечные резонансные колебания новых длинных тонких и неподкреплённых трубопроводов подачи метана к внешним двигателям. После того, как разработчики справились с этой проблемой, в восьмом полете неожиданно для них на чуть более позднем участке разгонной траектории возникли «старые добрые» продольные автоколебания, но уже в трубопроводах подачи кислорода, о возможности которых предупреждалось автором данной статьи еще в работе от декабря 2023 года [4]. Пришлось вернуться к практике отключения внешних двигателей до набора требуемой скорости, но в девятом полете, по-видимому, пересчет характеристик двигателей был выполнен не вполне точно, и проявления «пого» на режиме отключения центральных двигателей привело к неустранимой закрутке второй ступени, ее неуправляемому входу в атмосферу и последующему разрушению [3]. В двух последних пусках режимы работы двигателей второй ступени были настроены более точно, и оба полета завершились успешно. Однако, трудно назвать случайностью, что полезная нагрузка седьмого полета – 10 макетов спутников Starlink (массой ~ 20 т) в дальнейшем была снижена до ~ 16 т (8 макетов) – доводка второй ступени, похоже, стоила 20 % и так весьма незначительной полезной нагрузки второй версии системы Starship. Так что период продолжительностью около 18 месяцев с ноября 2024 года по май 2026 года (с последнего полета ее первой версии по первый полет третьей) был не слишком продуктивным с точки зрения получения летных данных для доработки системы, разве что в двух последних полетах второй версии была продемонстрирована положительная динамика в разработке теплозащиты второй ступени. И это в условиях постоянных срывов плановых сроков и контрактов по программе Artemis! Вот чего стоило неумение или нежелание воспользоваться теорией автоколебаний типа «пого» в полной мере, а не только в виде единственного доступного компании SpaceX следствия из нее, используемого для коррекции режимов работы двигателей в последующем полете по экспериментальным данным, получаемым в закончившемся катастрофически предыдущем полете.

II. Прогноз весьма вероятных проблем с посадками бустера третьей версии системы Starship

Первоначально предполагалось, что первый тестовый полет третьей версии системы Starship произойдет через 3 – 4 месяца после завершающего полета ее предыдущей версии, то есть в начале 2026 года. На нее были установлены более легкие двигатели Raptor-3 с тягой на ~ 10 % большей, чем ранее, примерно настолько же возросло и количество топлива в первой ступени и ее стартовая масса. Вторая ступень также получила новые двигатели, и масса ее топлива увеличилась на ~ 6.5 % при сохранении ее длины. Топливная система первой ступени, в отличие от второй, претерпела кардинальные изменения, подробно описанные в работе [5]. Особое значение, как было ясно сразу, имела замена коаксиального кислородного напорного посадочного бака на несимметрично расположенный сбоку от новой центральной трубы-шахты подачи метана новый посадочный бак. И бустер такой конструкции сразу попал в аварию уже на стадии наземных пневматических испытаний. Эта авария позволила заглянуть внутрь его разрушенного корпуса и в общих чертах увидеть конфигурацию трубопроводов, подающих к двигателям жидкий кислород от посадочного бака, см. рис. 1.

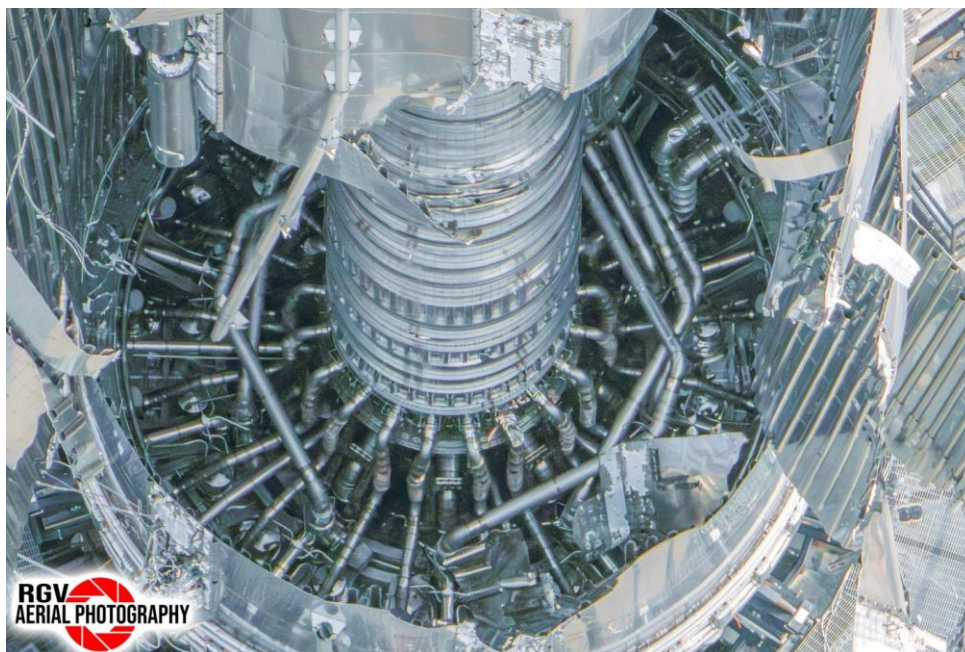


Рис. 1 – Видимая часть трубопроводов, идущих от бокового посадочного бака кислорода к двигателям бустера V18 версии V3 [6]

С первого взгляда стало ясно, что и третий этап тестовых полетов пойдет не гладко. Уже в статье от декабря 2025 было написано [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.
- 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.
- 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».

И это предсказание восьмимесячной давности прекрасно подтверждается результатами уже двух проведенных тестовых полетов бустера системы Starship третьей версии – двенадцатого и тринадцатого в мае и июле 2026 года. В обоих случаях мягкую посадку в океан бустерам B19 и B20 совершить не удалось [7, 8]. При этом более чем через полтора месяца после двенадцатого полета объяснения случившегося сводились к абстрактному «тепловому воздействию на двигатели во время подъема и неправильным настройкам аварийной логики авионики» [9]. Сообщалось также, что необходимые доработки были проведены. Однако и в следующем, тринадцатом полете посадка бустера завершилась, по существу, с тем же самым результатом, хотя двигателей в этот раз включилось больше.

III. Анализ двух первых неудачных попыток посадки бустера третьей версии

Во время первой попытки посадки бустера в момент включения двигателей на видео были показаны скорость и высота полета бустера, а во второй – высота и число включающихся и работающих двигателей. Последняя высота, на которой можно было увидеть скорость бустера в тринадцатом полете, составляла ~ 7.2 км. В связи с тем, что в двенадцатом полете при попытке бустбэка – разворота траектории бустера для возврата его к месту старта, во время которого впервые должны были включиться все 33 его двигателя, а не 13, как ранее, на режим вышли только 5 из них [10], этот маневр не удался. Бустер после разделения полетел по нерасчетной траектории, точка его приводнения оказалась удалена от расчетной более чем на 300 км [11], а его скорость на траектории сильно превышала запланированную. На высоте 7.2 км она составляла, примерно, 820 м/с, в то время как при второй попытке посадки, когда траектория полета была близка к расчетной, значение скорости было около 575 м/с. В момент, когда на видео можно было заметить первые отблески пламени реактивной струи двигателей, эта скорость при первой попытке посадки составляла ~ 430 м/с, см. рис. 2 в момент времени 6:11. Экстраполяция имеющихся данных при второй попытке посадки дает величину около 325 м/с, что практически совпадает со скоростью, при которой начинали работать посадочные двигатели бустера B11, совершившего первую мягкую посадку на воду уже более двух лет назад [12].



Рис. 2 – Траекторные и иные данные в моменты попыток бустбэка и посадочного торможения бустера B19 [13]

На рис. 2 можно увидеть, какие 5 двигателей работали при попытке бустбэка бустера В19 (на момент времени 2:40), а также значения его скорости и высоты в момент начала попытки посадочного торможения (на рубеже 6:10 – 6:11) и перед ударом о поверхность воды и разрушением (время 6:15). Включившиеся двигатели (если их было больше одного), как следует из дальнейшего рассмотрения, не только не увеличили силу, тормозившую бустер, но даже значительно уменьшили его аэродинамическое сопротивление. Скорее всего, попытка включения была у одного или у очень малого числа двигателей из тех 5, что можно увидеть работающими на верхнем фрагменте рис. 2. Все они были двигателями внутреннего кольца, не способными к изменению направления вектора тяги.

За последние 16 с полета (5:59 – 6:15), по данным с видео [13] были определены ускорения и перегрузки бустера n , а также были вычислены число Маха полета M и коэффициент осевой силы C_x , действовавший на него в предположении, что его масса до момента включения двигателя составляла 210 т (см. рис. 3). Коэффициент C_x вплоть до момента времени 6:11, то есть до точки 13 на рис. 3, определялся только аэродинамическими силами, и в диапазоне чисел Маха $M \approx 2.25 - 1.35$ изменялся от величины $C_x \approx 2.0$ до $C_x \approx 1.25$, что неплохо согласуется с коэффициентом сопротивления цилиндра большого удлинения с лобовым плоским срезом при тех же числах Маха ($C_D \approx 1.7 - 1.3$), см. ниже рис. 4 (здесь $C_D \equiv C_x$). Отметим, что максимальный коэффициент сопротивления цилиндра с закругленным торцом не превышает значения $C_D \approx 0.6$. А на нижнем торце бустера имеется множество сопел двигателей – элементов со значительными углублениями, и поэтому его коэффициент сопротивления, пока из двигателей не началось истечение газа, напротив, должен быть выше, чем у цилиндра с плоским торцом. Полученный в наших оценках коэффициент сопротивления бустера прямо пропорционален его текущей массе. Выбранное в расчетах ее значение (сухая масса вместе с остатками топлива) – 210 т выглядит достаточно разумным, но, конечно, и коэффициент сопротивления и посадочная масса бустера В19 могут быть несколько отличаться от этих величин. Однако это никак не повлияет на основные выводы, которые можно сделать из представленной информации.

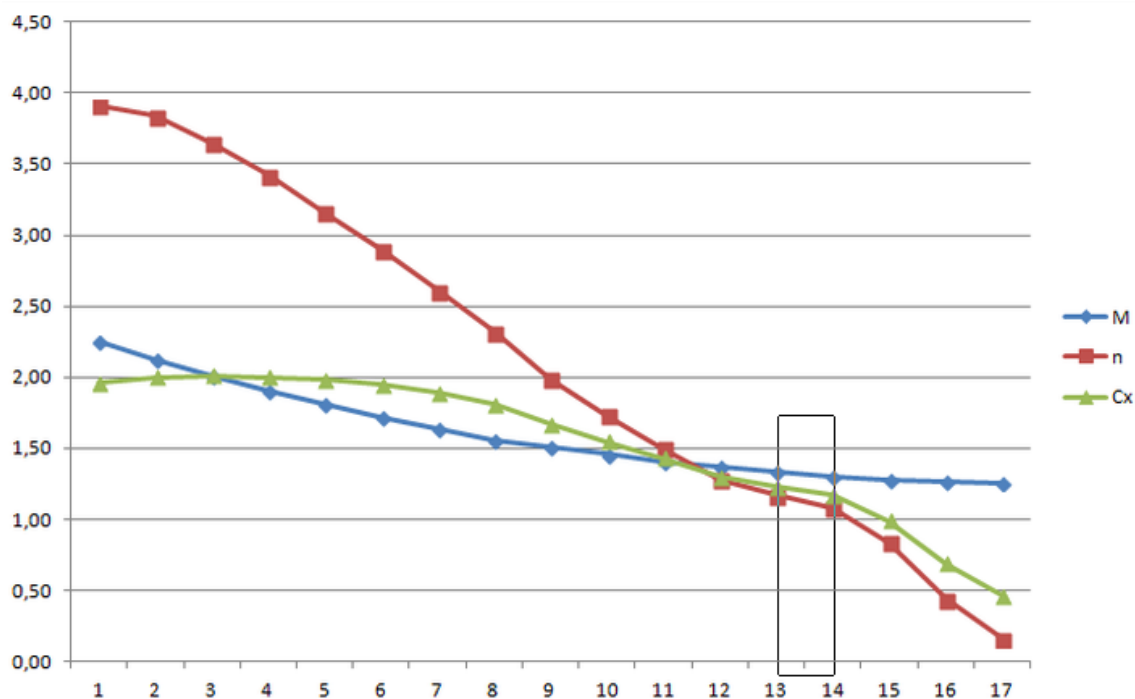


Рис. 3 – Оценки числа Маха M , продольной перегрузки n и коэффициента продольной силы C_x бустера В19 на финальном участке траектории перед ударом о воду

Значительно интереснее то, что после начала работы двигателя/двигателей (этот момент на графиках рис. 3 выделен прямоугольником), коэффициент продольной осевой силы не только не стал возрастать за счет добавления силы тяги, направленной против скорости движения, а, напротив, резко уменьшился. А ведь полная тяга одного двигателя Raptor-3 на той высоте должна была составлять ~ 2.5 МН, что при массе бустера ~ 210 т добавило бы к перегрузке за счет аэродинамического сопротивления величину $\Delta n_e \approx 1.2$, а при минимальной рабочей тяге в 40 % от номинала – $\Delta n_e \approx 0.5$. Вместо этого перегрузка снизилась почти до 0, а коэффициент осевой силы, составлявший до включения двигателей (но уже после начала выброса газов из сопел во время предпусковых операций) $C_x \approx 1.25$, упал до $C_x < 0.5$, приблизившись к показателям цилиндра с острым носом (см. рис. 4). Суммарная осевая сила стала практически равной весу бустера, и последние 4 с (6:11 – 6:15) с высоты порядка 1 км он падал с почти не меняющейся скоростью, несмотря на какую-то работу двигателя или двигателей. А, точнее, бустер падал так благодаря этой работе, так как на «чистой аэродинамике» он затормозился бы сильнее.

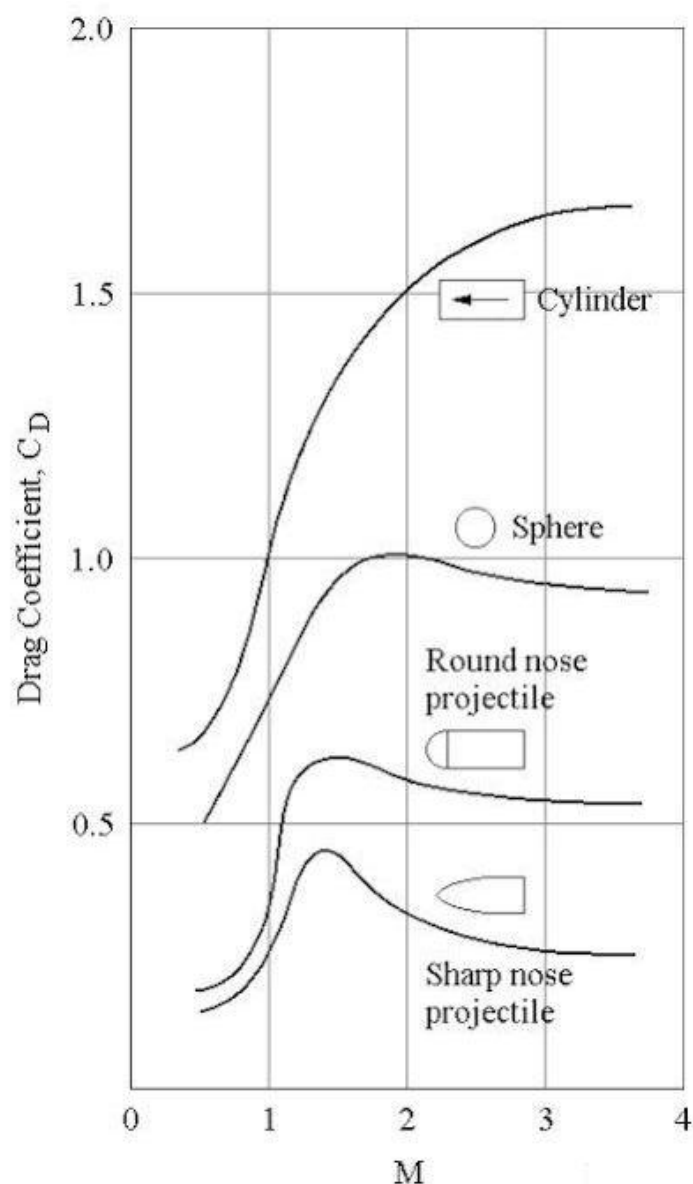


Рис. 4 – Коэффициенты сопротивления некоторых осесимметричных тел [14]

Объяснение этому парадоксу довольно простое – из результатов натурных экспериментов и численного моделирования известно, что при выдуве встречной газовой струи из носовой каверны навстречу набегающему потоку при $M \approx 1.3$ аэродинамическое сопротивление тела уменьшается до 35 %. В рассматриваемом случае вследствие существования по крайней мере 33 «каверн» и несимметричности тяги ситуация более сложная, и, возможно поэтому падение аэродинамического сопротивления у бустера стало еще сильнее. В итоге, качественно ясно одно – перед посадкой бустер В19 включилось мало двигателей (видимо, один), и из них не никто вышел даже на минимальную рабочую тягу – струя, снижающая аэродинамическое сопротивление возникла на 4 – 5 с, а сколько-нибудь заметной тяги вообще не появилось. То есть, на основании данных, представленных на рис. 2 – 4, можно утверждать, что ни один из двигателей бустера В19 при посадке нормально не запустился.

Рассмотрим теперь попытку посадки в океан бустера В20. На рис. 5 показано, в каком порядке включались и выключались двигатели в этот момент. В итоге, вместо 13 двигателей заработало только 5, и бустер снова не смог полностью затормозиться, и разрушился при ударе о воду, но уже с меньшей скоростью. К сожалению, траекторных данных в открытом доступе на этом участке его полета нет. Однако, экстраполяция скорости с высоты 7.4 км до 1.4 – высоты включения двигателей, показала, что в этот момент скорость составляла 325 – 330 м/с, что совпадает с траекторными данными всех проведенных ранее успешных посадок предыдущей версии бустера. Можно полагать, что после почти полностью успешного бустбэка (при его завершении было весьма малое расхождение времени выключения трех центральных двигателей, вызвавшее небольшое отклонение точки посадки от запланированной), параметры траектории бустера В20, в отличие от В19, в момент включения двигателей перед посадкой были практически расчетными.

Однако, запуск 13 посадочных двигателей, судя по иконографии, продолжался 4 – 5 с, на управляющие сигналы откликнулись 10 двигателей из 13, и только 5 из них все-таки запустились (см. рис. 5). В итоге, образовалось 3 пары выключенных противоположащих двигателей внутреннего кольца: E4 – E9, E5 – E10 и E6 – E11 (нумерация двигателей показана в источнике [15]). Эти тройки двигателей (E4 – E6 и E9 – E11) идут по внутреннему кольцу подряд, первые из пар начинаются с верхнего правого двигателя внутреннего кольца, и дальше счет идет по часовой стрелке, см. нижний фрагмент рис. 5. Оставшиеся 2 не включившихся двигателя – центральный E2 и левый верхний внутреннего кольца – E13, «мигали» на нескольких кадрах видео, но все же «погасли». В целом, качественно, картина укладывается в предсказание автора, сделанное сразу, как только стали видны внутренности бустера B18 после его разрушения на наземных испытаниях в ноябре 2025 года: «...это [увеличение поперечного сечения метанового трубопровода бустера] 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» [5].



Рис. 5 – Включения и выключения двигателей бустера B20 при его попытке посадки [16]

И вот теперь, 8 месяцев спустя, мы воочию наблюдаем эту борьбу, результаты которой уже стали доступны внешнему миру. Возможно, при первой попытке посадки бустера новой версии, «пого», если и был, то во время неудачного бустбэка, хотя там скорее просто была работа двигателей на нижней границе режима устойчивого функционирования в динамически сложных условиях [10]. И на посадку бустер B19 прилетел уже в полуразобранном состоянии, да еще по траектории, максимальный скоростной напор на которой был примерно равен ~ 180 кПа, что в 1.8 раза превышает расчетный (около 100 кПа). В момент начала появления реактивной струи на высоте ~ 1.3 км он был близок к 100 кПа, в то время как при посадке B20 – около 55 кПа. Отметим, что при успешной посадке бустера ракеты New Glenn во втором полете, скоростной напор в момент включения двигателей составил ~ 30 кПа. Так что вполне возможно, что в первой попытке посадки бустера новой версии набегающий на сопла поток просто «задушил» те двигатели бустера B19, которые к тому времени еще могли функционировать. Но при второй попытке посадки, уже

при проектных условиях, скорее всего, заиграл тот самый «секстет», о котором вышло предупреждение 8 месяцев назад, и заиграл он мелодию под названием «пого». Посмотрим, за сколько аварийных полетов компании SpaceX удастся выдворить этот «секстет» из оркестровой ямы.

Выводы

1. Множественные случаи возбуждения автоколебаний типа «пого» являлись проблемой, не названной компанией SpaceX, но довлеющей над всей программой создания и развития многоразовой ракетной системы Starship.

2. Используя формулу пересчета зависимости частоты гидроакустических осцилляций от режима работы ракетного двигателя, и на основании экспериментальных данных, получаемых во время аварийных инцидентов, компания SpaceX находила режимы их работы, не приводящие к «пого».

3. Таким образом, в результате проведения 11 полетов в период с апреля 2023 года по октябрь 2025 года ей удалось создать одну версию первой ступени системы Starship и две версии второй, которые стали способны совершать полеты без проявлений «пого».

4. Однако первый же инцидент со второй версией бустера в рамках версии V3 всей системы – разрушение ее первого экземпляра на земле в ноябре 2025 года, позволил прийти к выводу, что внесенные в его конструкцию изменения весьма вероятно должны будут привести, как минимум, к множественным проявлениям «пого» при посадке бустера.

5. И проведенные на данный момент два полета системы Starship версии V3 подтвердили это предположение, как минимум, по результатам второго ее полета.

6. Если не запуск ракетных двигателей бустера при первой попытке посадки можно объяснить его подходом к поверхности Земли по сильно нерасчетной траектории, которая привела к воздействию на донный срез бустера с соплами двигателей чрезмерно высокого скоростного напора, то во втором случае имеющиеся данные позволяют уверенно предположить, что, по крайней мере, 3 пары двигателей внутреннего кольца, которые попарно должны иметь одинаковые частотные зоны возбуждения автоколебаний, не смогли запуститься или выйти на рабочий режим из-за «пого».

7. Недостаточная, вследствие этого, величина и асимметрия тяги при второй попытке посадки бустера привели к его разрушению, также как и при первой попытке после не запуска его двигателей.

Ссылки

1. Ю. И. Лобановский – Второй кризис программы Starship. *Synerjetics Group*, 30.03.2025, 11 с. // https://www.synerjetics.ru/article/second_crisis.htm
2. 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
3. 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
4. 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
5. Ю. И. Лобановский – Анализ конструкции бустера системы Starship и ее развития за 2,5 года летных испытаний. *Synerjetics Group*, 14.12.2025, 12 с. // https://www.synerjetics.ru/article/starship_3.htm
6. RGV Aerial Photography. *Reddit*, November 23, 2025 // https://www.reddit.com/r/SpaceXLounge/comments/1p4y1p7/detailed_views_from_inside_the_booster_18_aft/
7. Starship's Twelfth Flight Test. *SpaceX*, May 22, 2026 // <https://www.spacex.com/launches/starship-flight-12>
8. Starship's Thirteenth Flight Test. *SpaceX*, July 24, 2026 // <https://www.spacex.com/launches/starship-flight-13>
9. FAA Closes SpaceX Starship Flight 12 Mishap Investigation, Flight 13 Can Proceed, July 13, 2026 // <https://www.faa.gov/newsroom/statements/general-statements>
10. Ю. И. Лобановский – Размен двигателей 13/33 как зеркало метода проектирования компании SpaceX. *Synerjetics Group*, 08.06.2026, 6 с. // https://www.synerjetics.ru/article/engines_exchange.htm
11. TheSpaceEngineer – Twitter (X), May23, 2026 // <https://x.com/mcrs987/status/2057988319842074718>
12. 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
13. Теперь еще мощнее. *Линия Кармана*, 22.05.2026 // <https://www.youtube.com/watch?v=ApUGWCAKTCg>
14. Drag Coefficients as a function of Mach number. *Rocket & Space Technology* // <https://www.braeunig.us/space/cd.htm#>
15. TheSpaceEngineer – Twitter (X), May23, 2026 // <https://x.com/mcrs987/status/2058104321259041200>
16. Starship – 13 летные испытания (вторая попытка). *Открытый космос Зеленого кота*, 24.07.2026 // <https://www.youtube.com/watch?v=H3xH3pkNcJU>