

Почему в девятом полете вторая ступень системы Starship не взорвалась, а стала неконтролируемо вращаться?

Ю. И. Лобановский

Краткое содержание

В работе показано, что взрыва второй ступени в девятом полете системы Starship при завершении работы трех боковых двигателей Raptor-2 с вакуумными соплами, как это случилось в восьмом полете, не произошло потому, что в этот период было проведено быстрое увеличение тяги двигателей до уровня на 15 – 20 % выше, чем ранее. Подобное управление тягой двигателей с аналогичными целями и результатом происходило ранее, например, в пятом полете системы Starship при бустбэке первой ступени. При этом абсолютный максимум уровня перегрузок второй ступени в девятом полете оказался равен 4.3 – 4.4 по сравнению не более чем с ~ 3.5 единицами во всех предыдущих. В обоих указанных случаях подобное управления силовой установкой позволило быстро «проскочить» опасную зону возбуждения пого с гидроакустическими осцилляциями в линиях питания двигателей жидким кислородом.

Однако, возбуждения пого при отключении на второй ступени трех центральных двигателей с обычными соплами, как и при отключении двигателей внутреннего кольца при бустбэке первой ступени в третьем полете, полностью избежать не удалось. В связи с этим один из них на доли секунды выключился раньше двух других, что заставило ступень начать неконтролируемое вращение. Кроме того, в течение, по крайней мере, нескольких десятков секунд происходило боковое истечение газа (судя по цвету, кислорода) через стенку корпуса там, где не были замечены какие-либо клапаны или отверстия. Это также способствовало дальнейшей закрутке ступени, и в то же время снизило количество газа наддува, доступного системе управления ее ориентацией.

Поэтому, вторая ступень вошла в атмосферу нерасчетным образом и разрушилась в третий раз подряд, не позволив достичь главной цели девятого полета – провести отработку новых решений по теплозащите, без которых невозможен дальнейший прогресс проекта Starship. Таким образом, можно констатировать, что этот проект развивается в режиме ответа на постоянно возникающие новые проблемы, и не делается никаких попыток предвидеть их появление заранее, хотя возможности для этого существуют.

Ключевые слова: *Starship, девятый полет, пого, авария, продольные автоколебания*

I. Введение

Девятый полет системы Starship (IFT-9) или третий ее полет с новой версией второй ступени (Starship V2 или Starship 2), состоявшийся 27 мая 2025 года по мировому времени, на третьем году проведения испытательных пусков этой системы, завершился, также как и два предшествующих полета, аварией [1]. Ранее в восьмом пуске на стартово-посадочном комплексе был осуществлен достаточно успешный подхват первой ступени, но на второй ступени произошел отказ сначала одного из трех ее боковых двигателей с вакуумными соплами, а затем, сразу же – всех трех управляющих по тангажу и курсу центральных двигателей с обычными соплами. После этого два оставшихся боковых двигателя закрутили уже неуправляемый аппарат, который вскоре разрушился и сгорел при входе в атмосферу [2].

Во время девятого полета взорвалась уже и первая ступень, которая совершала свой второй полет, и на этот раз она должна была приводниться, намеренно проведя возвратный маневр (бустбэк) при больших динамических и тепловых нагрузках, чем во время всех пяти предыдущих успешных маневров такого рода [3]. Скорее всего, эта авария была никак не связана с проблемой пого, которая подробно и систематически рассматривается в серии статей, в которую входит и данная работа. Видимо, тут либо на каком-то структурном элементе был превышен предел прочности из-за более сложных условий возвращения, либо произошло форсированное усталостное разрушение на ступени, совершавшей уже свой второй полет. Впрочем, никаких реальных данных о бустбэке (в том числе и траекторных, в отличие от всех предыдущих полетов) во внешний мир пока не поступило, и любые мысли на эту тему не могут сейчас иметь какой-либо фактологической основы.

Но некоторые траекторные данные, относящиеся к последней, ключевой для понимания причин аварии на заключительной фазе разгона второй ступени, имеются [4]. Кроме того, накоплен большой массив экспериментальной и расчетной информации в предыдущих 8 пусках системы. Поэтому, несмотря на недостаточность и фрагментарность доступных данных, можно сделать вполне обоснованные выводы о причинах произошедшего. И из анализа «корректирующих действий», проведенных компанией SpaceX в межполетный период, которые не представляли собой, по существу, ничего серьезного [5], максимум – «дополнительную предварительную нагрузку на ключевые соединения», следует, что основной вопрос, на который необходимо ответить, таков: «Почему вторая ступень в девятом полете не взорвалась, а только закрутилась после выключения разгонных двигателей?»

II. Доступные траекторные данные

В связи с изменением формы представления данных о высоте и скорости полета, а также, о количестве топлива в информационном окне, на видео девятого полета, предоставленном компанией SpaceX, на участке траектории одновременного полета двух ступеней исчезли показания скорости [1]. То ли это глупость «улучшателей» интерфейса, то ли последствия целенаправленной политики компании по сокращению для внешнего мира количества реальной информации о полете, но теперь доступные нам траекторные данные на участке разгона второй ступени системы начинаются только с седьмой минуты полета, см. рис. 1 [4].

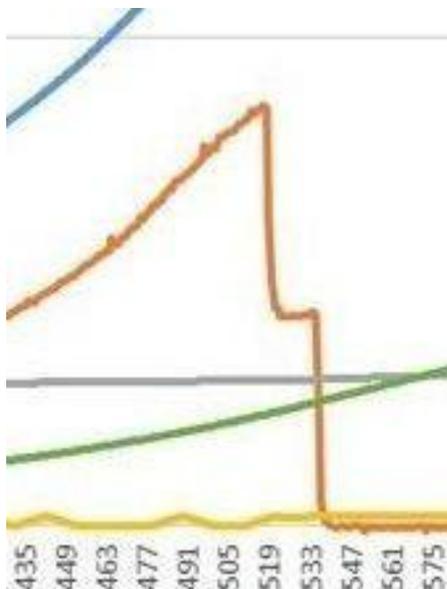


Рис. 1 – Ускорение (коричневая линия со ступенькой) системы Starship в девятом полете (IFT-9)

Для анализа целесообразно наложить данные по ускорению аппарата на аналогичную информацию, полученную при пусках с шестого по восьмой [6], см. рис. 2. Здесь белыми точками отображено ускорение второй ступени в девятом полете на финальном участке ее разгона по рис. 1.

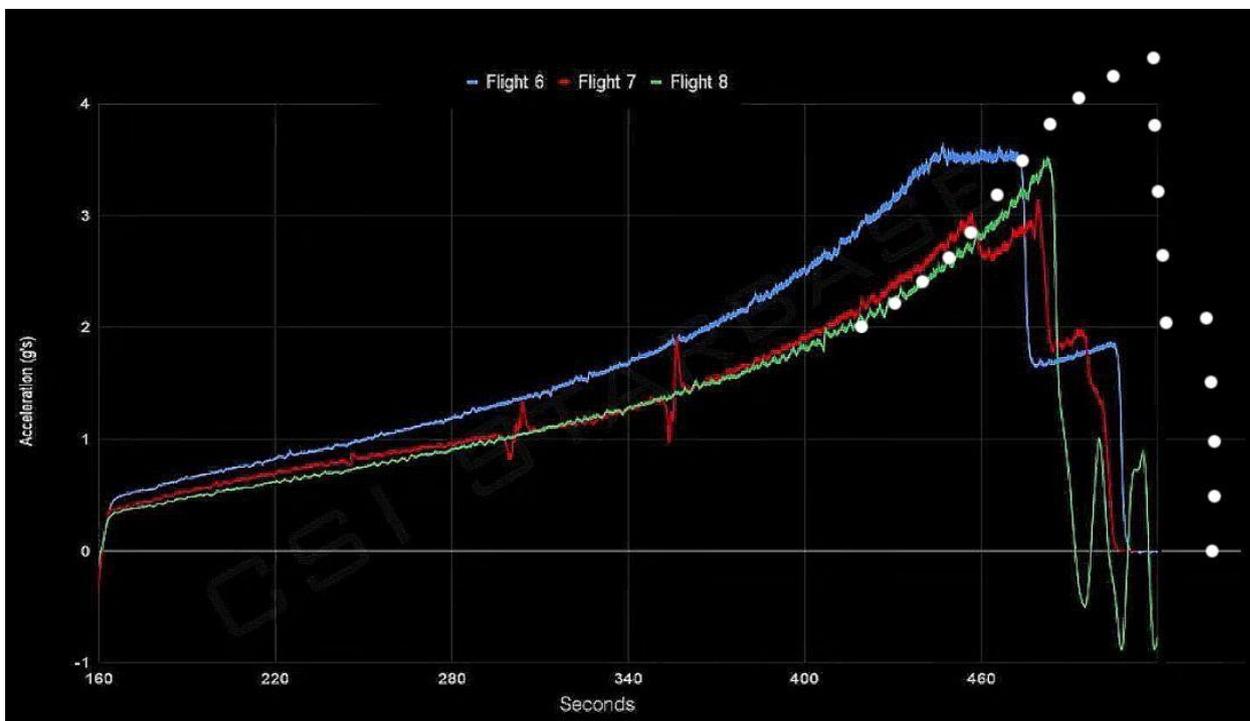


Рис. 2 – Ускорения второй ступени системы Starship (линии) в шестом – восьмом полетах (IFT-6 – IFT-8), а также ее ускорение в последнем, девятом полете (белые точки)

Ускорение на участке разгона второй ступени в последнем, шестом полете ее версии V1 показано синей линией, красная кривая относится к седьмому, а зеленая – к восьмому полетам (первому и второму со второй ступенью версии V2). Как и во всех пусках, начиная со второго (в первом разделе ступеней не

произошло), после достижения величины ускорения 35 м/с^2 двигатели дросселировались, чтобы ускорение ступени после этого оставалось постоянным, видимо, для того, чтобы не были превышены проектные динамические нагрузки на аппарат. И это значение ускорения было максимальным на всей траектории полета второй ступени (например, при ее торможении в атмосфере ускорение не превышало 17 м/с^2). При этом, как показано в работе [7], вызванный дросселированием рост частоты гидроакустических осцилляций в линиях подачи к двигателям компонент топлива, приводил к возбуждению автоколебаний типа пого. Именно они и стали причиной взрыва второй ступени при втором пуске системы Starship. После этого при всех полетах этой версии второй ступени боковые двигатели стали заранее отключаться, и на графике ускорений возникла характерная ступенька, хорошо видимая на рис. 2 в шестом полете.

Во время первых двух полетов версии V2 второй ступени ей ни разу не удавалось превзойти эту отметку, поэтому нам неизвестно, как должен был происходить ее разгон после достижения данной характерной точки. Ясно, что собственная частота упругих продольных колебаний, которая вместе с частотой гидроакустических осцилляций, ответственна за возникновение пого, изменилась при переходе на новую версию ступени. Не имея возможности проведения соответствующих расчетов, и для того, чтобы наверняка избежать пого на линиях снабжения метаном, как в версии V1, компания SpaceX, как известно, произвела радикальную переработку трубопроводов для его подачи во внешние двигатели ступени версии V2, получив в седьмом полете разрушение этой конструкции поперечными колебаниями. При этом (см. красную кривую на рис. 2), после начавшихся в двигательном отсеке пожаров, ракетные двигатели стали последовательно отключаться друг за другом, что, в итоге, привело к разрушению ступени в целом и сгоранию ее в атмосфере [8]. То, что ускорение второй ступени новой версии при прочих равных условиях было значительно меньше, чем у старой, объясняется тем, что она имела на 300 тонн, то есть, на 20 % больше топлива. Но, меньшее среднее ускорение должно было компенсироваться большим временем разгона, что и видно из данных девятого полета, см. рис. 2.

В результате более жесткого закрепления трубопроводов, подающих метан к боковым двигателям, вновь возникшая проблема поперечных колебаний была решена, и эти двигатели проработали в восьмом полете на 7 – 8 с дольше, придав ступени то самое ускорение в 35 м/с^2 [8]. И как уже было написано выше, в этот момент двигатели снова стали отключаться (см. на зеленую кривую рис. 2). Не помогло даже некоторое снижение тяги по сравнению с предыдущим полетом на финальном участке траектории разгона. И, если до девятого полета еще могли быть какие-либо сомнения о причинах этих отказов, то после него никаких сомнений уже не осталось. Достаточно посмотреть на изменение режима работы двигателей в последнем полете по сравнению с предпоследним. На восьмой минуте полета белые точки, характеризующие кривую разгона при IFT-9, с неплохой степенью точности лежат на кривой, соответствующей IFT-8. При этом масса второй ступени в девятом полете если и отличалась от ее массы в восьмом полете, хотя бы из-за четырех дополнительных макетов спутников Starlink, то незначительно. Так что двигатели в этих полетах работали в одинаковых или почти одинаковых режимах.

Но к 456-й секунде полета, ко времени отказа первого внешнего двигателя в седьмом полете (согласно видео [9]), уже можно заметить рост ускорения, и, соответственно, тяги двигателей в девятом полете по сравнению с восьмым. И к 503-й секунде, моменту аварийного отключения первого внешнего двигателя в восьмом полете, превышение тяги составляет уже не менее 10 – 12 %. А затем тяга растет дальше, увеличивая ускорение, невзирая ни на какие структурные ограничения до $\sim 43 \text{ м/с}^2$, превышая прежний предельный уровень на 20 – 25 % (см. рис. 2). В таблице 1 приведены ускорения всех трех вторых ступеней версии V2 в моменты достижения ими максимальных значений этого параметра.

Таблица 1 – Максимально достигнутые ускорения в 7 – 9 полетах вторых ступеней системы Starship

Полеты	Время полета (с)		
	456	503	519
	Ускорение (м/с^2)		
Седьмой	30	–	–
Восьмой	27	35	–
Девятый	27.5	39	43

При разгоне масса ступени постепенно уменьшается вследствие выработки топлива, и частота собственных упругих продольных колебаний постепенно растет. Пока тяга двигателей постоянна, постоянная и частота гидроакустических осцилляций в трубопроводах подачи горючего и/или окислителя. Если (с учетом кратности) упругая частота несколько ниже, чем гидроакустическая, то может настать момент, когда различие между ними окажется настолько мало, что возникнет пого. И именно так, судя по имеющимся данным, версия V2 второй ступени системы Starship в восьмом полете примерно к 500-й секунде разгона вошла в этот опасный режим.

В то время как в девятом полете быстрый рост тяги двигателей, сопровождавшийся соответствующим падением частоты гидроакустических осцилляций, позволил быстро «проскочить» зону возникновения автоколебаний, как это, скажем, постоянно происходит при запуске и выходе двигателя на номинальный рабочий режим. Более того, подобный подход к активному подавлению пого впервые был осуществлен ранее еще при реализации бустбэка первой ступени системы Starship в ходе третьего – пятого полетов. Для анализа применения этого приема рассмотрим те эпизоды более подробно, тем более что траекторные данные тех маневров были вполне доступны в необходимом объеме и качестве.

III. Активное подавление пого при бустбэке путем управления тягой двигателей

Как известно, 18 ноября 2023 года во втором полете системы Starship при первой попытке осуществить маневр возврата первой ступени (бустбэк) произошел ее взрыв, см. рис. 3 [10].



Рис. 3 – Вид неба через одну секунду после взрыва первой ступени при бустбэке во втором полете

Однако, спустя 4 месяца, 14 марта 2024 года, во время третьего полета бустбэк завершился уже относительно успешно – движение ступени удалось развернуть, хоть и чуть в другом, чем планировалось, направлении, и она взорвалась уже при включении двигателей на заключительном этапе торможения [10]. В тот раз, такой результат был достигнут вследствие активного подавления пого путем дросселирования двигателей во время бустбэка. Зная частоту автоколебаний, при которой произошел взрыв, и параметры силовой установки в тот момент, а также получив к тому времени одним из доступных компании SpaceX способов выведенную автором этой статьи формулу пересчета частоты гидроакустических осцилляций по перепаду давления на насосах компонент топлива, инженеры компании снизили тягу двигателей во время этого маневра [11], см. рис. 4.

Сравнивая ускорение первых ступеней во втором – 25 м/с^2 (тонкая серая линия) и третьем – около 30 м/с^2 (более толстая сиреневая линия) полетах на квазистационарном участке бустбэка, выделенном прямоугольной рамкой на рис. 4, 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 15 – 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. 4 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 первой ступени.

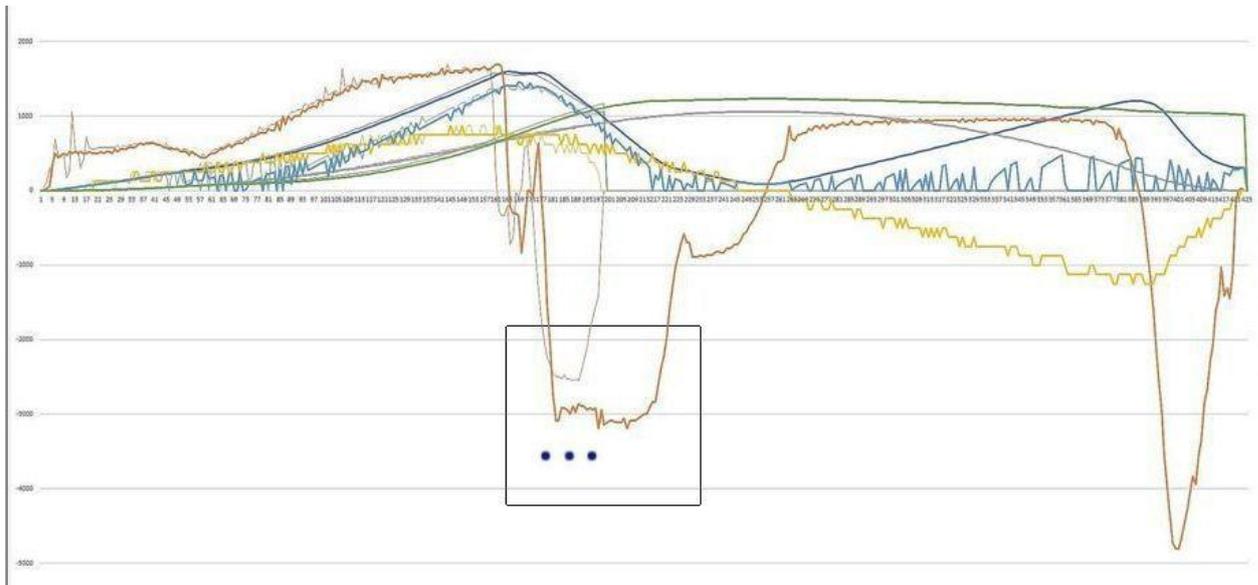


Рис. 4 – Ускорение, скорость, высота и прямая (горизонтальная) дальность, а также горизонтальная и вертикальная компоненты скорости бустера системы Starship во втором и третьем полетах [12]

Указанное снижение тяги, которое в третьем полете привело к ускорению при бустбэке $\sim 30 \text{ м/с}^2$ во время работы всех 13 двигателей, не полностью устранило возбуждение автоколебаний, так как на самом финише бустбэка они все-таки достигли такого уровня, что двигатели внутреннего кольца стали самопроизвольно и асимметрично отключаться [13], см. рис. 5.

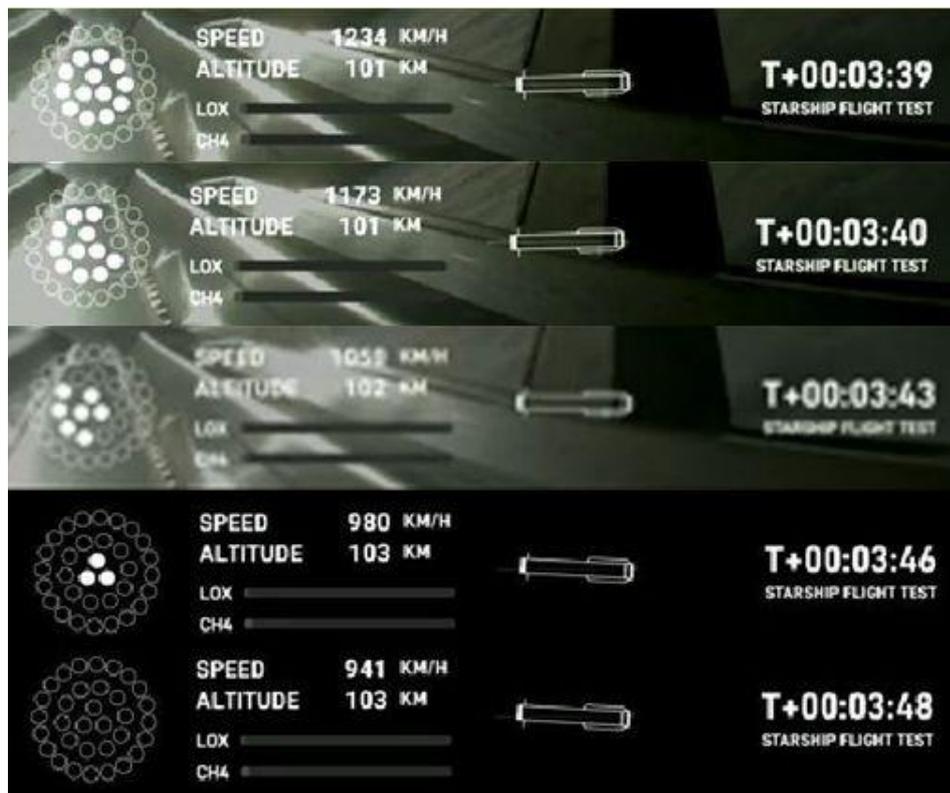


Рис. 5 – Самопроизвольное отключение двигателей внутреннего кольца первой ступени при завершении бустбэка в третьем полете

Как видно из рис. 5, двигатели внутреннего кольца первой ступени отключались в течение, примерно, 7 с, начиная с одной стороны кольца. Очевидно, что такой порядок отключения был вызван несимметричным расположением зеркала жидкого кислорода в баке относительно его центральной оси. С одной стороны бака слой оставшегося там кислорода под действием почти ортогональных друг другу сил инерции и гравитации был выше, чем с другой. Поэтому различалось и его гидростатическое давление, что приводило к сравнительно небольшим, но значимым, различиям давления на входе в насосы двигателей, а это, в свою очередь, влияло на перепад давления на насосах. Чем выше перепад, тем ниже частота

гидроакустических осцилляций, и тем раньше частота упругих колебаний может приблизиться к этой частоте, и тем скорее топливная система данного двигателя начнет генерировать автоколебания, приводящие к его отключению.

Поэтому первым отключился двигатель или, точнее, их ближайшая пара, см. рис. 5 при T+00:03:40, у которой толщина слоя кислорода над входными отверстиями трубопроводов была минимальна. А затем фронт отключений по мере израсходования кислорода стал двигаться по кольцу симметрично относительно оси, проходящей через точки минимума и максимума уровня кислорода в баке, пока последовательно не отключились все двигатели внутреннего кольца. Таким образом, сначала отключились верхние двигатели кольца, что и привело к заметному даже на рис. 5 «клевку ступени вверх» и более крутой траектории возвращения. Проработав 2 – 3 с после отключения последних двигателей внутреннего кольца, 3 центральных поворотных двигателя смогли не допустить неуправляемого вращения бустера, однако величину и направление вектора скорости после отсечки они уже не смогли полностью довести до заданной величины, и бустер совершил попытку приводнения со взрывом в нерасчетной точке, более удаленной от береговой линии, чем планировалось [11].

Получив уточненные данные, компания SpaceX в четвертом полете 6 июня 2024 года смогла, наконец, полностью устранить влияние автоколебаний при бустбэке на полет первой ступени системы Starship. На рис. 6 показано сравнение параметров полета при третьем и четвертом пусках [14].

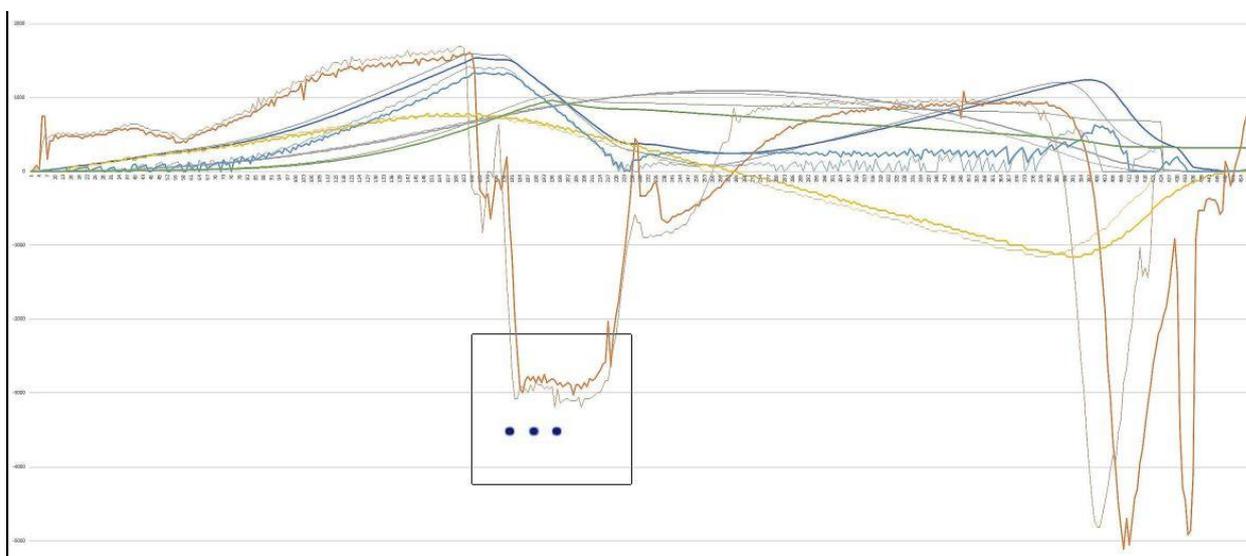


Рис. 6 – Ускорение, скорость, высота и прямая (горизонтальная) дальность, а также горизонтальная и вертикальная компоненты скорости бустера системы Starship в третьем и четвертом полетах

Несмотря на то, что различия между уровнями тяги в этих двух полетах на квазистационарных режимах бустбэка минимальны (см. зону рис. 6, выделенную прямоугольником), последствия такого изменения алгоритма работы ракетных двигателей оказались весьма значительными.

Оказалось, что достаточно снизить максимальную тягу двигателей еще, примерно, на 3 %, доведя наибольшее (по модулю) ускорение при бустбэке до $\sim 29 \text{ м/с}^2$, чтобы полностью подавить пого и обеспечить идеальное осесимметричное программное отключение двигателей внутреннего кольца, см. рис. 7 [15]. Сначала одновременно, через один, отключились 5 первых двигателей кольца, а затем – 5 оставшихся. Через 8 с одновременно отключились и 3 центральных двигателя. После этого бустер совершил плановый полет и плавно приводнился в расчетной точке Мексиканского залива. Правда, потом он взорвался, но это было естественное развитие событий, связанное с его горизонтальным положением на поверхности воды. Подхваченный после пятого полета стартово-посадочным устройством следующий экземпляр бустера остался практически целым.

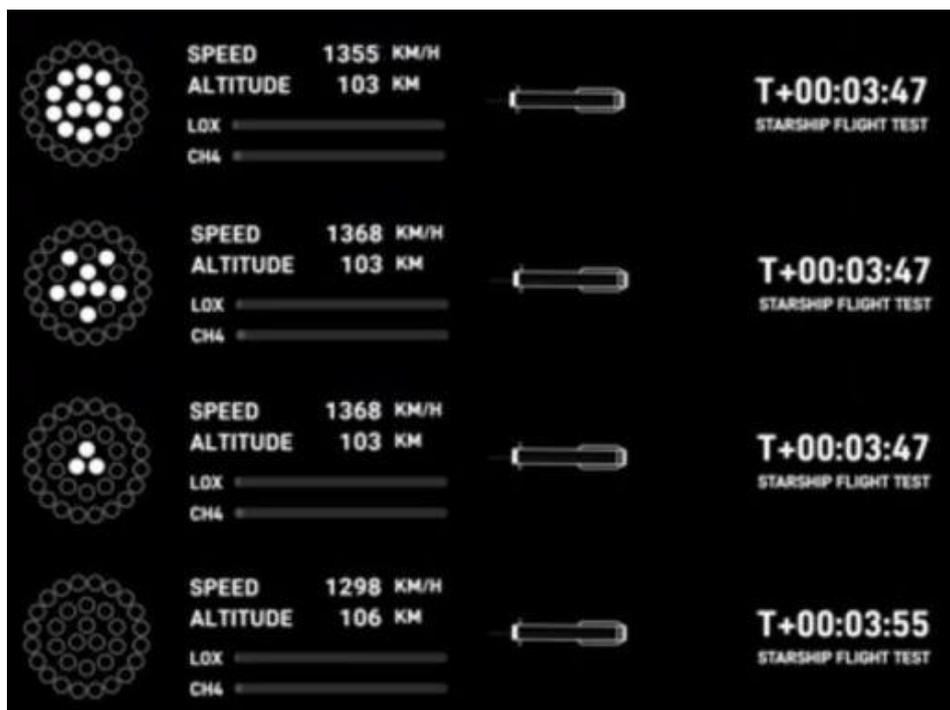


Рис. 7 – Программное осесимметричное отключение двигателей внутреннего кольца первой ступени при завершении бустбэка в четвертом полете

Однако, на этом совершенствование алгоритма управления двигателями при бустбэке не закончилось. Нужный маневр удалось провести, только повысив частоту гидроакустических осцилляций на ~ 10 % и, соответственно, снизив тягу силовой установки на ~ 20 % от первоначально запланированного уровня, что, естественно, привело к росту потерь характеристической скорости. Поэтому в пятом полете 13 октября 2023 года, когда первая ступень была впервые подхвачена стартово-посадочным комплексом, максимальное ускорение и, следовательно, тяга двигателей, возросли при бустбэке примерно в 1.5 раза (ускорение – с 29 до 43 м/с²), см. рис. 8. При этом весь полет первой ступени прошел полностью успешно и более быстро, чем ранее. Процесс пого не возник потому, что частотная зона, где он мог существовать, была быстро пройдена, и он не успел полноценно развиться там, где это было бы возможно на квазистационарном режиме полета.

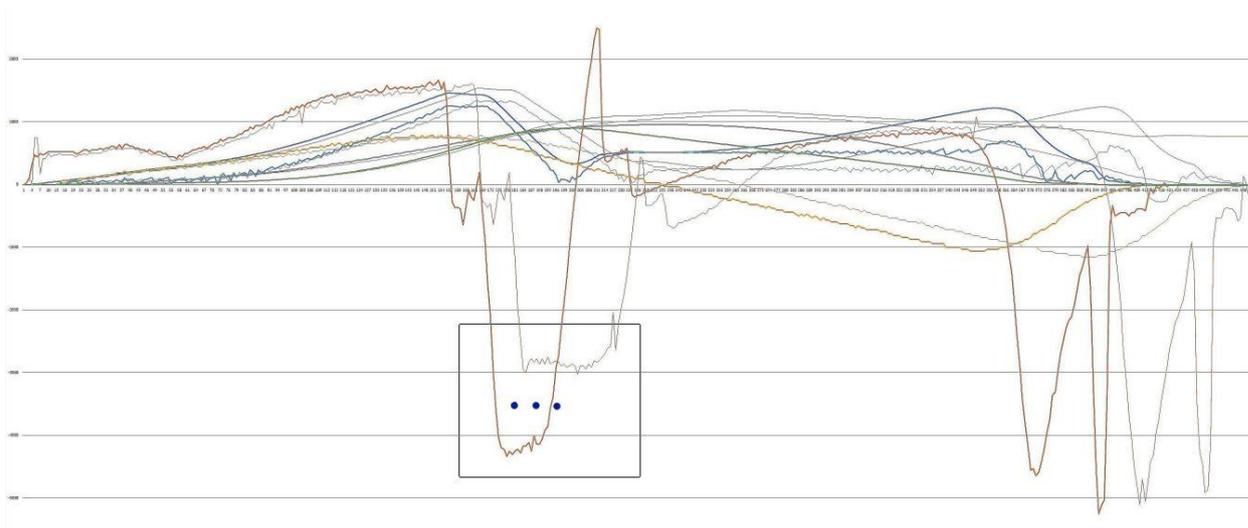


Рис. 8 – Ускорение, скорость, высота и прямая (горизонтальная) дальность, а также горизонтальная и вертикальная компоненты скорости бустера системы Starship в четвертом и пятом полетах [16]

Таким образом, сравнив развитие процессов обнаружения и подавления пого при бустбэках во втором – пятом полетах, и на финише разгона второй ступени версии V2 в восьмом и девятом полетах, мы можем увидеть между ними полное качественное подобие: сначала взрывы ступеней из-за пого, а затем в следующих полетах – увеличение тяги силовой установки для «проскакивания» опасного режима. Целью управления тягой было быстрое снижение частоты гидроакустических осцилляций так, чтобы момент, в течение которого они оказываются близки (с учетом кратности) к частотам собственных упругих продольных колебаний, был бы максимально короток. Когда это делалось в первый раз, подавление пого

происходило сначала через последовательные снижения тяги, и отработка процесса заняло 4 полета. А во второй раз промежуточных стадий уже не было, и разрушение второй ступени в восьмом полете из-за пого в линиях подачи кислорода к боковым двигателям было устранено снижением частоты гидроакустических осцилляций уже в следующем, девятом полете.

Однако, хотя господь бог, как предположил А. Эйнштейн, «не злонамерен», однако, он снова посмеялся над усилиями компании SpaceX в борьбе с пого и явил в конце разгона второй ступени в девятом полете еще один его вариант уже на центральных двигателях в линиях подачи к ним кислорода, длина которых была немного другой, и поэтому процесс пого возник там несколько позже. Хоть он и не успел существенно развиться, и никаких взрывов двигателей на этот раз не было, его все же хватило для гибели и этого аппарата.

IV. Никогда такого не было, и вот – опять

После того, как в девятом полете увеличением максимальной тяги двигателей Raptor-2 второй ступени удалось обеспечить работу их версии с вакуумным соплом, по крайней мере, до момента времени ~ 520 с от старта, ценой увеличения максимальной перегрузки ступени на 20 – 25 % по сравнению со всеми предыдущими полетами, впервые произошло одновременное отключение трех центральных двигателей ступени, см. рис. 9 [1].

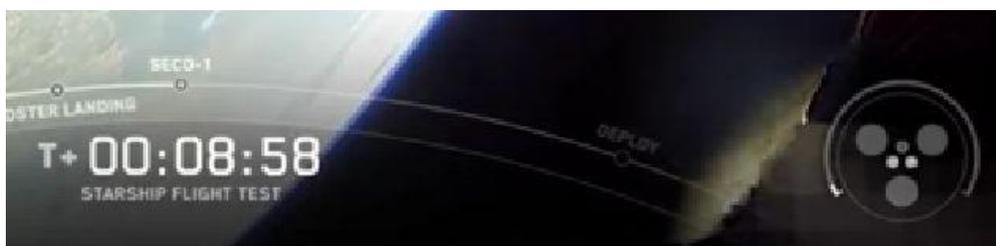


Рис. 9 – Неодновременное отключение трех центральных двигателей второй ступени в девятом полете

Наиболее вероятное, если не сказать, очевидное системное объяснение (если не рассматривать случайные отказы каких-то элементов одного из двигателей) является возбуждение автоколебаний на одном из трех таких двигателей. Качественно, описание этого процесса совершенно аналогично самопроизвольному отключению двигателей внутреннего кольца первой ступени в третьем полете при бустбэке из-за пого. А количественные различия объясняются достаточно большим удалением друг от друга десяти двигателей внутреннего кольца первой ступени и близостью трех центральных двигателей. Дальнейшие объяснения этого явления вряд ли требуются.

В результате преждевременного отключения как минимум одного из трех центральных двигателей возник момент силы, из-за которого ступень стала неконтролируемо вращаться. Как следует из последующих кадров видео этого полета, с помощью газовых рулей удалось практически полностью остановить это вращение, однако при этом газ наддува был истрачен, и дальнейшее управление ориентацией ступени было потеряно [1].



Рис. 10 – Истечение газа через боковую стенку второй ступени системы Starship после отсечки ее двигателей

Кроме того, максимальная перегрузка ступени на финише разгона около 4.3 – 4.4 вместо ~ 3.5 единиц во всех предыдущих полетах могла привести к отказам и/или разрушением каких-то конструктивных элементов второй ступени. По крайней мере, в течение 40 секунд с 9:30 до 10:10 можно было наблюдать истечение газа голубого цвета (скорее всего, газа наддува, состоящего почти полностью из кислорода) через боковую стенку ступени (никаких клапанов там предусмотрено не было), см. рис. 10 [1].

Этот выброс газа, видимо, через трещину в стенке, с одной стороны усиливал закрутку ступени, а с другой – уменьшал запасы газа наддува для управления ее ориентацией. В итоге, как и в третьем полете вторая ступень вошла в атмосферу нерасчетным образом и разрушилась, в третий раз подряд не позволив провести экспериментальную оценку и анализ нововведений, связанных с совершенствованием ее аэродинамической конфигурации и теплозащиты, над чем компания SpaceX начала работать сразу после завершения четвертого полета, что было уже год назад [17, 18]. А ведь этого всего могло и не быть, если бы компания SpaceX использовала уравнения расчета частоты гидроакустических осцилляций для предвидения условий возникновения пого при изменении конструкции системы Starship, а не применяла бы лишь следствие из их решений только после уже произошедших аварий.

Выводы

1. Взрыва второй ступени в девятом полете на финише работы трех боковых двигателей с вакуумными соплами, как это случилось в восьмом полете, не произошло потому, что все ее двигатели в этот период, вплоть до их отключения, работали на уровне тяги на 15 – 20 % выше, чем ранее. В связи с этим абсолютный максимум уровня перегрузок ступени оказался равен 4.3 – 4.4 по сравнению с не более чем ~ 3.5 единицами во всех предыдущих полетах.
2. Быстрое увеличение тяги на финише с соответствующим снижением частоты гидроакустических осцилляций позволило «проскочить» зону возбуждения пого с гидроакустическими осцилляциями на линиях питания боковых двигателей жидким кислородом совершенно аналогично тому, как это впервые было сделано в пятом полете при бустбэке первой ступени.
3. Однако, при последующем отключении трех центральных двигателей с обычными соплами, один из них из-за начавшегося пого на доли секунды отключился ранее двух других, что заставило ступень неконтролируемо вращаться. Это произошло аналогично тому, как это случилось в третьем полете при бустбэке с двигателями внутреннего кольца первой ступени.
4. Более того, в течение, по крайней мере, нескольких десятков секунд происходило боковое истечение газа через стенку корпуса там, где не были замечены какие-либо клапаны или отверстия. Это также способствовало дальнейшей закрутке ступени, и в то же время снизило количество газа наддува, доступного системе управления ее ориентацией.
5. В итоге, вторая ступень вошла в атмосферу нерасчетным образом и разрушилась в третий раз подряд.
6. Это не позволило достичь главной цели девятого полета – провести отработку новых решений по теплозащите, без которых невозможен дальнейший прогресс проекта Starship.
7. Таким образом, этот проект развивается в режиме ответа на возникающие в ходе испытаний проблемы без малейшей попытки предвидеть их появление заранее, несмотря на имеющиеся для этого возможности. Очевидно, что вся ответственность за неблагоприятное развитие проекта создания системы Starship лежит на высшем менеджменте компании SpaceX.

Ссылки

1. Video. *SpaceX*, May 27, 2025 // <https://www.spacex.com/launches/mission/?missionId=starship-flight-9>
2. Video. *SpaceX*, March 6, 2025 // <https://www.spacex.com/launches/mission/?missionId=starship-flight-8>
3. Starship's Ninth Flight Test, *SpaceX*, May 27, 2025 // <https://www.spacex.com/launches/mission/?missionId=starship-flight-9>
4. OneSpeed – Re: Starship Flight 9 DISCUSSION: Starbase TX: 27 May 2025, Reply #290. *NSF*, 27 May 2025 // <https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?topic=62948.280>
5. W. R. Smith – FAA clears SpaceX to launch its 9th Starship super heavy rocket, while Flight 8 mishap investigation continues, *SpaceFlight Now*, May 23, 2025 // <https://spaceflightnow.com/2025/05/23/faa-clears-spacex-to-launch-its-9th-starship-super-heavy-rocket-while-flight-8-mishap-investigation-continues/>
6. POGO: Is This 63-Year-Old Problem Threatening Starship's Success? *CSI Starbase*, Video, May, 2025 // <https://www.youtube.com/watch?v=GkqWhHvfAXY>
7. Ю. И. Лобановский – Механизм взрыва второй ступени системы Starship во втором полете на финише ее разгона. *Synerjetics Group*, 18.01.2024, 7 с. // https://www.synerjetics.ru/article/second_stage.htm
8. Ю. И. Лобановский – Второй кризис программы Starship. *Synerjetics Group*, 30.03.2025, 11 с. // https://www.synerjetics.ru/article/second_crisis.htm
9. Video. *SpaceX*, January 16, 2025 // <https://www.spacex.com/launches/mission/?missionId=starship-flight-7>
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. 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>

12. OneSpeed – Re: SpaceX Starship IFT-3 UPDATES: Starbase TX: 14 March. *NSF*, Reply #223, 15.03.2024 // <https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?topic=60478.220>
13. Replay! SpaceX Starship launches on 3rd integrated test flight. *VideoFromSpace* 14.03.2024 // <https://www.youtube.com/watch?v=Dr8ZaMAa5jw>
14. OneSpeed – Re: Starship Flight 4 UPDATES: Starbase TX: 6 June 2024, Reply #203. *NSF*, 06 June 2024 // <https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?topic=60929.msg2598941#msg2598941>
15. Starship's Fourth Flight Test. *SpaceX*, 06 June 2024 // <https://www.spacex.com/launches/mission/?missionId=starship-flight-4>
16. OneSpeed – Starship Flight 5 UPDATES: Starbase TX: 13 Oct 2024, Reply #220. *NSF*, 13 Oct 2024 // <https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?topic=61646.220>
17. R. Weber – Starship flight 4 milestones effect changes to flight 5' Ship. *NSF*, 12 June 2025 // <https://www.nasaspaceflight.com/2024/06/starship-flight-4 -milestones-flight-5/>
18. It's About Damn Time: Starship's Upgraded Flaps & Nosecone. *Ringwatchers*, December 23, 2024 // <https://ringwatchers.com/de/article/s33-nose>

Внутренняя Колыма,
15.05.2025

Ю. И. Лобановский