

Тайны программы испытаний системы Starship: Анализ основных проблем ее первого этапа

Ю. И. Лобановский

Изложение содержания доклада на XLIX Академических чтениях по космонавтике

Краткое содержание

В работе описаны пять однотипных критических проблем, возникших в первых четырех пусках системы Starship, которые сначала привели к подрыву ракетной системы, потом – к срыву траектории, а в трех случаях – к взрывам ее ступеней в полете. Рассмотрены способы решения этих проблем, в большинстве случаев опирающиеся на теорию продольных автоколебаний ракет типа «пого», и являющуюся производной от теории гидроакустических автоколебаний в напорных системах гидроэлектростанций. Показано, что компания SpaceX (разработчик системы Starship) использовала для решения этих проблем следующий типовой алгоритм: получение во время полета по телеметрии данных об аварийном процессе, и изменение при следующем пуске режима работы двигателей так, чтобы частота гидроакустических осцилляций вышла из зоны «пого». Далее полет либо успешно завершается, либо продолжается до момента следующей аварии, с повторением этих действий в дальнейшем до тех пор, пока все эти инциденты не прекратятся.

Доступ к элементам теории «пого», где при фиксированной геометрии топливной системы описывалась зависимость частоты гидроакустических осцилляций от режима работы двигателей, компания SpaceX получила в конце 2023 – начале 2024 годов, в период между вторым и третьим пусками системы Starship. При этом она постаралась сделать недоступной в публичном пространстве любые данные об этой теории. Вследствие того, что компания SpaceX не обладает всей полнотой информации о ней, на новых версиях системы Starship из-за изменения их конструктивных характеристик будут сдвинуты границы областей возникновения и развития «пого». И это может привести и уже привело как к повторному возникновению описанных в работе критических проблем, так и к появлению новых проблем, вызванных попытками решения проблем прежних, что подтверждается аварийными седьмым и восьмым полетами этой системы.

Ключевые слова: *«пого», автоколебания, Starship, суперспайки, частота, резонанс, кратность*

I. Введение

20 апреля 2023 года со стартовой позиции на частном космодроме Star Base в окрестностях техасского поселения Boca Chica на побережье Мексиканского залива был произведен первый испытательный пуск системы Starship, состоящей из первой ступени (бустера) – Super Heavy и одноименного корабля – второй ступени (в дальнейшем называемой просто Ship) [1]. Эта система, разрабатываемая компанией SpaceX, должна в будущем стать многофункциональной, полностью многоразовой сверхтяжелой ракетой-носителем, предназначенной для доставки грузов и людей на околоземную орбиту. Кроме того, после орбитальных дозаправок вторая ступень должна будет превратиться в космический корабль для полетов на Луну и Марс [2]. Тогда начался, как это стало уже очевидно, длительный процесс превращения с помощью эджайл-методологии прототипа этой системы либо в доведенный до регулярного использования образец, либо, в лучшем случае, в музейный экспонат.

В представленной работе анализируются первые 4 испытательных полета системы Starship, и вскрывается ключевая проблема, решенная компанией в ходе их выполнения, но даже не озвученная официально и, практически, нигде не известная за ее пределами. Так ли это? Представим читателю если и не вполне общеизвестную, то, по крайней мере, общедоступную информацию.

Следует отметить, что последние, седьмой и восьмой полеты системы, как и прогнозировалось при анализе ее полетов во время первого этапа испытаний [3], снова возвращают проблематику, казалось бы, уже изжитую после его завершения. Это связано с тем, что в процессе модернизации и развития системы Starship, совершенно необходимом для создания ее полноценного варианта, решение описываемой далее проблемы будет требоваться снова и снова.

II. Особенности первых четырех полетов системы Starship

Сначала вкратце рассмотрим основные особенности первых четырех полетов системы Starship, имеющие прямое отношение к рассматриваемой здесь проблеме.

Первый полет (IFT-1), 20.04.2023

Он характеризовался отключениями двигателей (их было не менее 6), пожарами, сбоями телеметрии, и, в конце концов, впечатляющими кульбитами с сохранением целостности всей системы, ее подрывом, который, однако, ее не разрушил, как это предполагалось, и окончательным превращением ее в груды обломков только при входе в достаточно плотные слои атмосферы [4, 5]. Можно также отметить сильные разрушения на стартовой позиции. Однако все это для нас было второстепенными, побочными эффектами – основополагающий процесс, который и привел практически ко всем этим явлениям, был не только не описан компанией SpaceX, и не замечен почти никем, но и вообще не упоминался ни в пресс-релизах

SpaceX, ни в материалах средств массовой информации. Это – совершенно необычный, «рванный» полет системы Starship практически с самого старта и до самого конца.

Его нагляднее всего можно увидеть на графике траекторных данных этой ракетной системы, см. рис. 1. На нем показаны четыре параметра: ускорение ракеты Starship (в см/с^2), скорость (в м/с) и высота полета (в сотнях метров), а также число работающих двигателей (на графике оно для получения соизмеримого масштаба кривых умножено на 10), см. рис. 1. Этот график появился в сети в тот же день в результате обработки данных из дополнительных окон видеострима [6], и он окончательно убедил автора этой работы, что его визуальное впечатление о характере полета системы Starship с экрана монитора – правильное. Вскоре стало ясно, что это явление не есть артефакт неадекватной работы системы измерения и отображения данных (значительно позднее это было описано в статье [7]).

Итак, на рис. 1 можно видеть (см. на фиолетовую линию с острыми пиками), что на всем участке траектории системы, где происходил управляемый полет, ракета испытывала резкие колебания ускорения с периодом 12 секунд, выражавшиеся в виде, по крайней мере, 10 пар узких пиков сначала резкого падения ускорения почти до 0, а затем очень быстрого его роста. Эти специфические пары пиков были названы суперспайками по аналогии с названиями внешне похожих пар пиков в биржевой игре – близко расположенных спайков продавца и покупателя, соответственно направленных вниз и вверх.

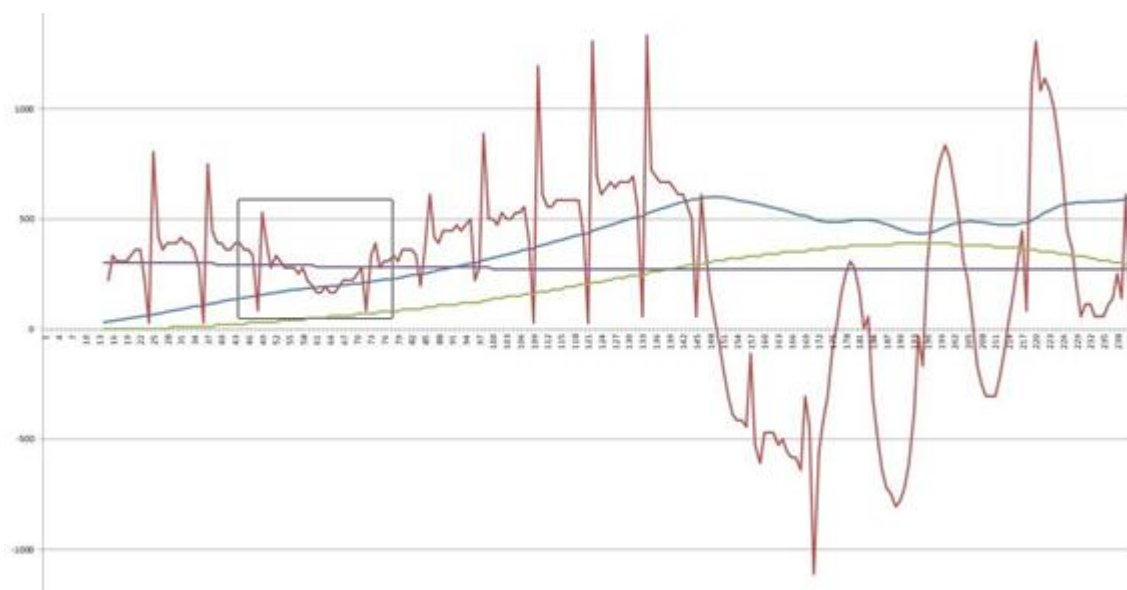


Рис. 1 – Ускорение, скорость, высота и число работающих двигателей системы Starship

Следует отметить, что в зоне максимального скоростного напора при IFT-1 нет того суперспайка, который должен был там быть в соответствии с периодом их появления в 12 секунд (зона нашего интереса выделена на рисунке прямоугольными границами). Этот суперспайк оказался «пропущенным». А почему? Ответ на этот вопрос будет дан ниже. С этим моментом также тесно связано кардинальное изменение после первого полета схемы разделения системы Starship – от «холодной», когда двигатели второй ступени включаются после выключения двигателей первой ступени, к «горячей», когда ступени разделяются при работе тех двигателей (или, хотя бы их части) [8]. Преимущества и недостатки (особенно, в многоцветных системах) каждого из вариантов достаточно очевидны, и здесь обсуждаться не будут. Следует только отметить, что это решение было принято с нарушением принципов эджайл-методологии, так как в первом полете не была проведена проверка первоначальной схемы разделения ступеней.

После первого полета внимание публики было привлечено к «корректирующим действиям» в количестве 63 штук, необходимым для получения лицензии от FAA на второй полет [9], и, в целом, хоть и полезным, но часто довольно мелким, а основное «корректирующее действие» – появление межступенчатого отсека горячего разделения было затушено, и объяснялось стремлением к увеличению выводимой системой массы полезной нагрузки. Хотя, тогда явно было не до нее, да и сейчас, 2 года спустя, уже на новой увеличенной версии системы, она – 4 макета спутников Starlink [10], явно не впечатляет. Почему же промежуточный отсек появился именно тогда?

Однако, пока оставив этот вопрос без ответа, продолжим обозрение, и перейдем ко второму полету системы.

Второй полет (IFT-2), 18.11.2023

Второй полет системы Starship, хотя и прошел не в пример успешнее, чем первый, тем не менее, по результатам тоже оказался в некотором смысле уникальным – в разное время произошло 2 взрыва,

уничтоживших по отдельности обе ступени ракетной системы [11]. Разгон сборки из двух ступеней прошел без каких-либо замечаний, о суперспайках можно было забыть, как о страшном сне – вот, что было достигнуто с помощью единственного существенного изменения конструкции сборки – введения промежуточного межступенчатого отсека. Горячее разделение также оказалось полностью успешным. После этого первая ступень (бустер) пошла на бустбэк – маневр торможения для возврата к месту старта и, запустив только часть двигателей, взорвалась на финише этого маневра (рис. 2, см. на толстую желтую линию – на график ускорения) [11]. Отметим, что после разворота бустера, те ускорения, которые на рис. 2 показаны, как отрицательные, в реальности стали положительными (прижимающими топливо к днищам баков).

При бустбэке 4 двигателя из 13 не запустились, а когда разворот был закончен, и начался сравнительно спокойный полет без вращений, на бустере начались локальные взрывы и пожары, а затем, и общий взрыв, после которого его разнесло в клочья [12] (зона потери тяги, завершившейся взрывом, на рис. 2 выделена прямоугольником). Отметим также серьезные колебания ускорения в самом начале разгона, когда силовая установка только выходила на номинальный режим работы.

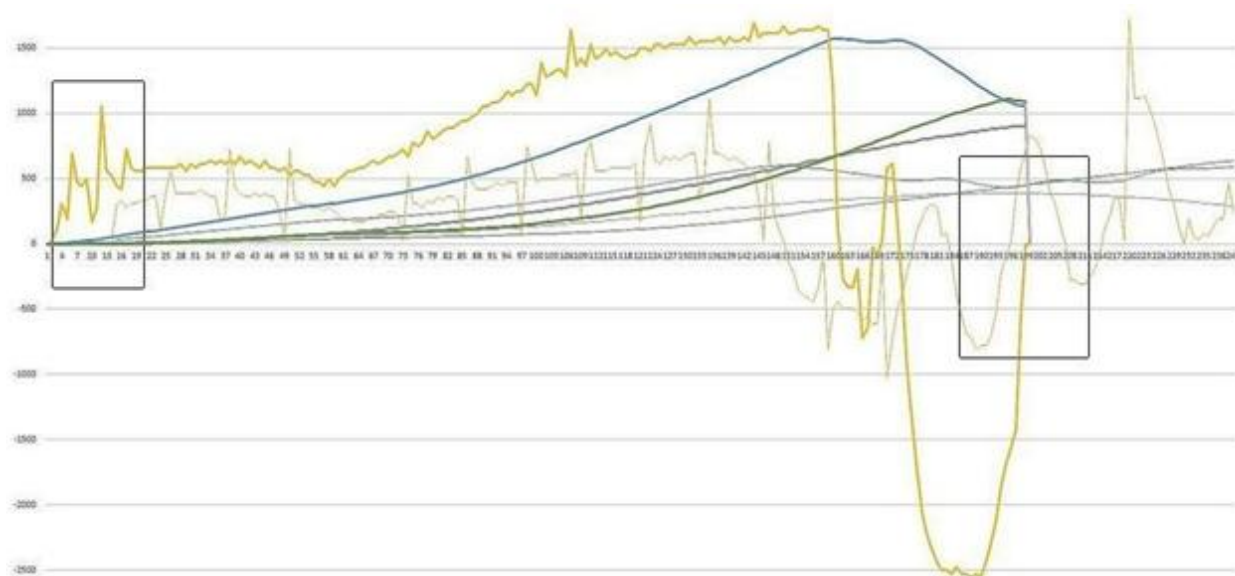


Рис. 2 – Полеты IFT-1 (сборка) и IFT-2 (бустер), ускорение при IFT-1 – тонкая линия с суперспайками (см. рис. 1), ускорение бустера при IFT-2 – толстая желтая линия с резкими уступами (показаны также скорости, высоты и дальности полетов)

При этом вторая ступень (Ship) вполне успешно разгонялась в соответствии с программой полета, пока, незадолго (за 30 с) до завершения разгона внезапно тоже самопроизвольно не взорвалась [13]. Видимо, это был первый в истории пуск с двумя совершенно раздельными взрывами двух ступеней стартовавшей ракеты. За 23 с до взрыва со ступени было сброшено некоторое количество газа наддува из кислородного бака, очевидно для того, чтобы давление на входе в насосы ракетных двигателей оказалось близким к номинальному. Плюм из сброшенной смеси двуокиси углерода, водяного пара, малых примесей несгоревших и не полностью окисленных остатков горючего при значительном преобладании кислорода бесследно рассеялся в окружающем пространстве за 2 – 3 с [13].

Не менее двух месяцев руководство компании SpaceX заявляло о том, что причиной гибели второй ступени при IFT-2 было то ли нештатное срабатывание системы ее подрыва, то ли тот самый сброс газа наддува. Кэти Людерец, глава Starbase, сообщила 12 декабря 2023 года: «...группа по расследованию аномалий Starship все еще выясняет, почему были активированы автоматизированные системы завершения полета [AFTS] 18 ноября» [14]. Потом последовало месячное молчание, и, наконец, Илон Маск заявил 12 января 2024 года: «...причина, по которой он [Ship] на самом деле не смог выйти на орбиту, заключалась в том, что мы сбросили [vented] жидкий кислород, и жидкий кислород в конечном итоге привел к возгоранию и взрыву» [15]. Конечно, сброшенный газ наддува никаким «жидким кислородом» не был. О причинах взрыва бустера никаких заявлений по существу вообще не было.

Третий полет (IFT-3), 14.03.2024

Первоначально предполагалось, что третий полет произойдет во второй половине февраля 2024 года, но потом произошла нигде и никогда не комментировавшаяся задержка на 3 – 4 недели, и новый экземпляр системы Starship полетел в середине марта [16]. На этот раз изменением алгоритма запуска силовой установки на старте удалось избавиться от значительных колебаний ускорения (и, соответственно, тяги), и кроме того, бустер почти полностью успешно прошел бустбэк, и пошел на посадку, на водную поверхность

Мексиканского залива, но при финальном торможении двигателями взорвался (см. на прямоугольные зоны по краям графика на рис. рис. 3) [17].

Успех бустбэка был вызван дросселированием двигателей, что привело к снижению тяги каждого из них в ~ 1.2 раза. Однако число работающих двигателей возросло с 9 до максимума – до 13, и их общая тяга и, соответственно, ускорение бустера выросли примерно в 1.2 раза, см. на рис. 3 выделенную прямоугольником зону около центра изображения. Однако, в самом конце торможения 6 двигателей все-таки хаотично выключились за 2 – 3 с до запланированного срока, бустер несколько развернуло, он оказался на более крутой траектории возвращения и в расчетную точку приводнения не попал [18].

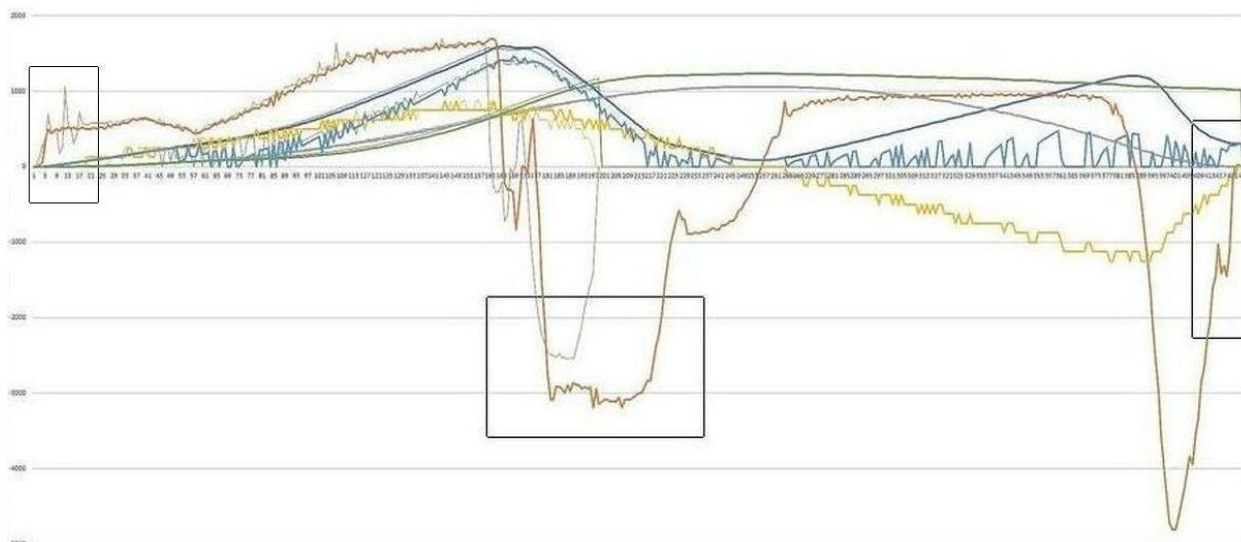


Рис. 3 – Полеты IFT-2 и IFT-3 (бустеры), ускорение – тонкая и толстая фиолетовые линии при IFT-2 и IFT-3 соответственно, с резкими уступами

На второй ступени в третьем полете сброс газа наддува не был замечен, кроме того наиболее эффективные в тех условиях двигатели с вакуумными соплами были заблаговременно отключены, что и привело к полностью успешному завершению разгона [17], см. на две прямоугольные зоны на рис. 4. Левая – это завершение разгона во втором полете, а правая – в третьем.

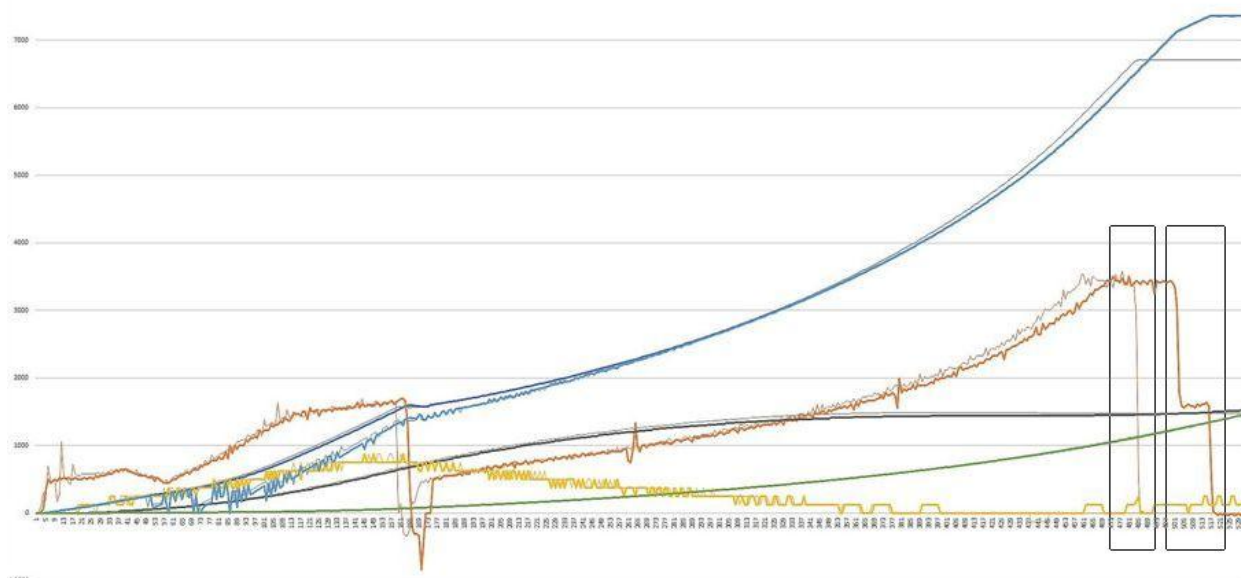


Рис. 4 – Полеты IFT-2 и IFT-3 (вторые ступени), ускорение – тонкая и толстая фиолетовые линии при IFT-2 и IFT-3 соответственно, с резкими уступами

Вскоре после этого полета, 4 апреля 2024 года, Илон Маск снова выступил на стартовой позиции перед сотрудниками Starbase, как и 12 января, но в абсолютно противоположной тональности. В январе он пытался объяснить возникшие при испытаниях системы Starship проблемы, а в апреле была речь победителя, получившего ключ к их решению, о полетах на Марс [19].

Четвертый полет (IFT-4), 06.06.2024

Этот полет, по существу, завершил цикл отработки первого варианта системы Starship до того состояния, чтобы она могла завершать свои запланированные полеты без взрывов и с мягкими посадками обеих ступеней на воду (а бустер затем – и на стартово-посадочный комплекс) и взрывами уже там, на поверхности воды [20]. Из интересующих нас моментов следует обратить внимание на возвращение интенсивных колебаний ускорения (и, соответственно, тяги) на старте, см. самую левую зону на рис. 5. Очевидно, что это было связано с другим алгоритмом запуска силовой установки из 33 ракетных двигателей.

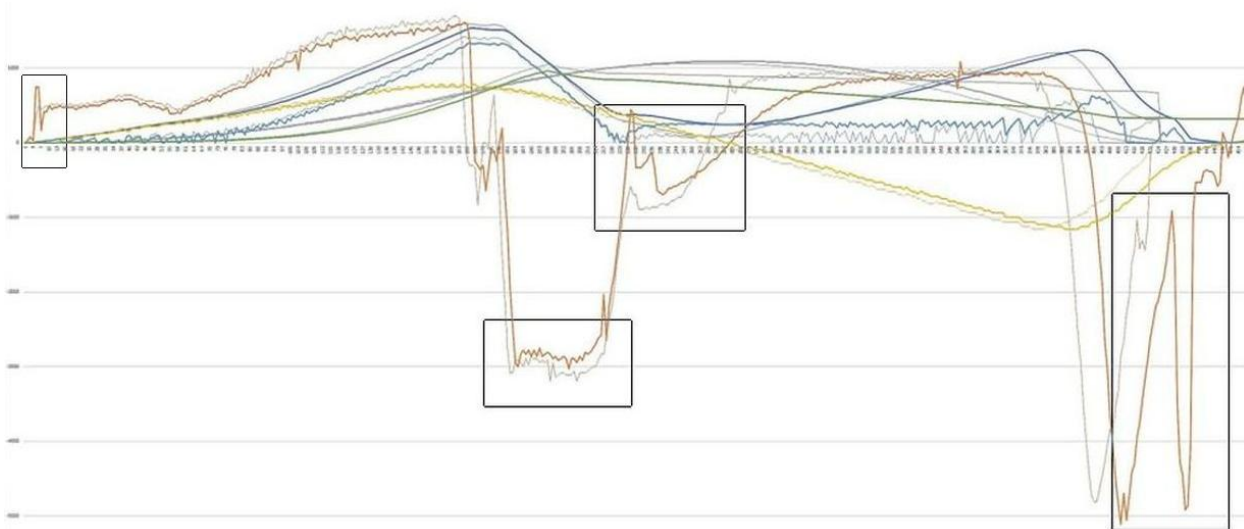


Рис. 5 – Полеты IFT-3 и IFT-4 (бустеры), ускорение – тонкая и толстая фиолетовые линии при IFT-3 и IFT-4 соответственно, с резкими уступами

При бустбэке еще на несколько процентов была снижена тяга двигателей, что привело, в итоге, к их требуемой работе во время всего этого маневра (см. на прямоугольные зоны в центре рис. 5), в связи с чем было обеспечено возвращение бустера в расчетную точку приводнения рядом с заранее размещенным там бумом с телекамерой (см. на зону на правой стороне рис. 5). Кроме того, вскоре после бустбэка с бустера был сброшен промежуточный отсек, массой около 9 т [21], после чего скорость бустера вследствие аэродинамического торможения на момент финального включения двигателей оказалась ниже, примерно, на 15 %, и, работая на сниженной тяге, они не только не взорвались, но и обеспечили первое мягкое приводнение бустера. Он, правда, потом взорвался, плавая на поверхности воды, однако, по-видимому, это было запланированным событием. В следующем, пятом полете, совершенно такой же экземпляр бустера был успешно захвачен консолями стартово-посадочного комплекса и впервые вернулся назад в практически целом виде [20].

Вторая ступень при IFT-4 совершила практически такой же разгон, как ее предшественница при IFT-3, только 3 двигателя с вакуумными соплами были отключены еще ~ 10 с раньше. Дальнейший ее полет по незамкнутой орбите, торможение в атмосфере с отгоранием передних флаперонов и успешная ракетная мягкая посадка на воду [20] выходят за пределы рассматриваемых здесь вопросов.

III. Список проблем и противоречий, выявленных на первом этапе летных тестов системы

Вкратце подытожим важнейшие проблемы, противоречия и логически труднообъяснимые события весны 2023 – лета 2024 годов, описанные в предыдущем разделе статьи. К ним относятся:

1. Сопровождавшийся отказами, пожарами и взрывами совершенно необычный, «рванный», полет системы Starship во время первого пуска, с четко повторяющимися через 12 секунд «суперспайками».
2. Казалось бы, абсолютно неуместный, но на самом деле, совершенно оправданный переход к «горячему» разделению ступеней.
3. Почти одновременные взрывы обеих ступеней во втором пуске и довольно беспомощные попытки объяснить их руководством компании SpaceX в течение не менее чем двух месяцев после него.
4. Смена приоритетов с начала февраля 2024 года – задержка третьего пуска на 3 – 4 недели.
5. Почти полностью успешное прохождение при третьем пуске двух критических событий второго пуска, и, на финише, взрыв бустера при торможении перед приводнением, в, казалось бы, уже дважды отработанной ситуации.

6. Доводка процедуры бустбэка и успешное приводнение бустера в четвертом пуске с никем не объясненным сбросом промежуточного отсека, правда, все-таки завершившееся взрывом бустера уже после приводнения.
7. И абсолютно противоположная тональность выступлений Илона Маска на стартовой позиции 12 января и 4 апреля 2024 года – до и после третьего полета системы Starship, хотя оба раза бустеры взрывались в небе в последних полетах перед этими выступлениями.

IV. Автоколебания типа «пого» – единое объяснение всех этих событий и явлений

Колебания типа «пого» – опасные автоколебания ракет вдоль их продольной оси с частотой, обычно, 5 – 20 Гц, которые могут проявляться в системе, состоящей из упругого корпуса ракеты и жидкости в ее топливных магистралях [22]. Ракетные двигатели, потребляющие из магистралей топливо, отзываются на колебания его расхода, из-за чего возникают колебания тяги, создающие упругие колебания корпуса, в свою очередь влияющие на расход топлива. Таким образом, создается положительная обратная связь между колебаниями жидкости (обычно, только одной из компонент топлива, как правило, окислителя), и упругого твердого тела (конструкции ракеты или некоторых ее элементов, например, узла, передающего тягу двигателей на ее конструкцию) [5].

И если частоты этих двух видов колебаний оказываются близки или кратны, они становятся незатухающими, а во многих случаях может наблюдаться их быстрый рост, когда подвод энергии к этому процессу от работы силовой установки превышает ее естественную диссипацию. Тогда увеличение амплитуды колебаний будет продолжаться до тех пор, пока диссипация в системе не сравняется с подводом к ней энергии из внешнего источника (в случае «пого» – энергии сгорающего топлива), или пока система не изменит режим своей работы (например, будут отключены двигатели), или она не прекратит свое существование (ракетный аппарат разрушится). При этом имелись серьезные проблемы с математическим моделированием гидроакустических осцилляций, то есть колебаний жидкости в топливной системе, потому что в математической модели таких процессов должны быть разрывы, моделирующие работу насоса. А классические решения – гладкие. В связи с этим раньше с этими автоколебаниями боролись, в основном, используя экспериментальные методы [23].

Однако выяснилось, что в напорных системах гидроэлектростанций также имеются аналогичные колебания воды, которые вместе с колебаниями кавитационного шнура, возникающего за турбиной при ее работе на нерасчетном режиме, образуют два взаимодействующих между собой процесса, приводящих к разрушительным автоколебаниям. Наиболее известным и ярким примером такого рода стала Саянская катастрофа – вылет 17 августа 2009 года второго гидроагрегата самой мощной в России Саяно-Шушенской ГЭС из турбинной шахты, разрушение машинного зала станции и гибель 75 человек [24]. Это событие сильно стимулировало работу над моделированием разрывных решений гидроакустических осцилляций [25, 26].

В период с конца апреля по начало июня 2023 года, сразу же после первого полета системы Starship с суперспайками, автор данной работы изменил уравнения, описывающие гидроакустические осцилляции в напорных системах ГЭС так, чтобы они адекватно отражали осцилляции в линиях питания жидкостных ракетных двигателей. Для этого потребовалось заменить одно из граничных условий. Тут же стало ясно, что в таком варианте теория гидроакустических автоколебаний в напорных системах ГЭС, по крайней мере, в части вычисления ключевого параметра – частоты гидроакустических осцилляций, может быть легко преобразована в теорию колебаний типа «пого». В первых тестовых расчетах вычисленные характеристики процессов сравнивались с известными данными, относящимися к двум случаям возникновения «пого» на лунной ракете Saturn V в 1968 и 1970 годах (5 и 15 Гц, соответственно), см. таблицу 1.

Таблица 1 – Частоты гидроакустических осцилляций при проявлениях «пого» на первой (S-IC) и второй (S-II) ступенях «лунной» ракеты Saturn V

Ракета Ступень Двигатель	p2/p1	L1 (м)	L2 (м)	L3 (м)	Leq (м)	fn (Гц)
c = 845 м/с						
Saturn V S-IC F-1	24.5	1.36	13.40 + 3.51	18.27	40.5	5.21
		1.51		18.42	42.3	5.00
		1.66		18.57	44.0	4.80
c = 835 м/с						
Saturn V S-II J-2	28.5	0.90	2.92	3.82	13.9	15.0

В таблице, c – скорость звука в жидком криогенном кислороде, p_2/p_1 – степень повышения давления в кислородных насосах двигателя F-1 и J-2, L_1 – длина кислородного тракта от насоса до газогенератора, L_2 – длина кислородного тракта от бака до насоса, L_3 – их сумма, L_{eq} – эквивалентная длина колебательного контура, то есть длина, которая соответствует частоте возникших в нем колебаний при отсутствии насоса, f_n – частота гидроакустических колебаний жидкого кислорода.

Все прекрасно сошлось – были получены те же частоты «пого», что и в натуре [5]. Таким образом, верификация численной модели была успешно проведена. И к концу мая 2023 года новая теория уже стала использоваться в приложении к анализу поведения системы Starship. Частоты упругих колебаний f_e объектов, приближающихся по конструкции к трубам, пересчитывались с известных образцов (пакет Saturn V и Titan II GLV) по формуле подобия для таких объектов:

$$f_e = \kappa \sqrt{\frac{\pi E D \delta}{m L}},$$

где κ – коэффициент пропорциональности, по экспериментальным данным порядка 1, E – модуль упругости материала, D – диаметр ступени, δ – толщина ее стенки, m – масса ступени или сборки, L – ее длина или длина сборки.

А вскоре Илон Маск стал говорить о межступенчатом отсеке горячего разделения, и это показало, что компания SpaceX тоже разобралась в произошедшем в первом полете [8]. Введение между ступенями системы Starship этой конструкции, из-за ее толстых стенок и дна значительно более жесткой, чем сами ступени, резко изменило частоты упругих колебаний системы, и вывело их из кратности с частотами гидроакустических осцилляций. Вследствие этого возникновение «пого» в полете измененного варианта сборки стало невозможным.

По новому алгоритму были проведены сначала десятки, а, затем, и сотни расчетов, и оказалось, что при больших перепадах давления в колебательном контуре f_n – частота гидроакустических осцилляций приблизительно обратно пропорциональна корню квадратному из отношения давлений на насосе p_2/p_1 [5, 17]:

$$f_n \sim \sqrt{\frac{p_1}{p_2}} \quad (1)$$

Следует сразу отметить, что формула (1), чрезвычайно простая по своей структуре, стала ключевой для дальнейшего анализа хода событий во время первого этапа испытаний системы Starship.

V. Блокировки информации о «пого» и методе его расчета

В течение лета и начала осени шла подготовка второго полета системы Starship уже с промежуточным отсеком горячего разделения, в ее ходе 7 и 25 августа были проведены два наземных статических огневых теста силовой установки первой ступени системы Starship (бустера Super Heavy) в полном составе из 33 двигателей Raptor-2 [27, 28].

На фоне этих событий, автор данной работы 5 октября 2023 года отправил свою первую статью о теории «пого» на известный ресурс arXiv.org с анализом результатов первого полета системы Starship. В ней среди большого объема информации впервые в открытом доступе описывалась, в том числе, и взаимосвязь между частотой гидроакустических осцилляций в линии питания ракетного двигателя и перепадом давления на его насосе. 9 октября эта статья должна была быть опубликована, но, в последний момент была неожиданно задержана на беспрецедентный для архива срок под различными предлогами, явно используемыми для затяжки времени. Наконец, уже в ноябре, незадолго до второго полета системы Starship, спустя более чем месяц после подачи статьи, arXiv, с нарушением обычного порядка, применяемого при задержках публикаций, без каких-либо даже минимальных попыток что-либо выяснить у автора, решил статью не публиковать. Причины официально были названы следующие: «Наши модераторы определили, что ваша работа посвящена теме, не рассматриваемой arXiv, или, что целевая аудитория вашей работы не является сообществом, которому мы в настоящее время служим». В общем, думайте, что хотите, мы считаем, что это не нужно знать никому, и больше вам ничего не скажем [17].

Через месяц, 6 декабря 2023 года, на аэрокосмическом форуме NSF (NasaSpaceForum) автор в качестве своего первого поста поместил краткую информацию о статье, отвергнутой безымянными модераторами arXiv, то есть написал о ней несколько строк. Этот короткий текст вызвал на NSF настолько бурную дискуссию, что вскоре почти полностью вытеснил в теме о втором полете системы Starship все прочие рассматриваемые там вопросы. В связи с этим для продолжения обсуждения этого вопроса 15 декабря одним из участников форума (не автором) была создана отдельная тема, которая без объяснения причин в тот же день, через 13.5 часов оказалась закрытой, а автору был запрещен доступ на форум, связи которого с компанией SpaceX легко прослеживаются [17].

Более того, вскоре выяснилось, что автору тогда же был закрыт доступ на неопределенное число административных и информационных сайтов во всем тexasском графстве Камерон, где экономическое влияние компании SpaceX является доминирующим, и даже на сайт ведущей газеты этого графства Brownsville Herald [17].

Если хотя бы любые два из этих почти одновременных событий не являются случайными, то единственным очевидным актором, заинтересованным в них, то есть в блокировке информации о возникновении «пого» в системе Starship, а также в сокрытии данных о простой связи частоты гидроакустических осцилляций с характеристиками топливной системы является компания SpaceX.

При этом анализ произошедших событий в программах третьего и четвертого полетов системы Starship показал, что опираясь на послеаварийные данные и используя приведенную выше формулу (1) пересчета частоты гидроакустических осцилляций в топливных трактах обеих ступеней, в последующих полетах компания SpaceX стала подавлять возбуждение автоколебаний, выявленных в предыдущем полете, с помощью изменения режимов работы ракетных двигателей.

VI. Пять относящихся к возбуждению «пого» критических проблем в четырех первых полетах системы Starship, пять принятых решений и их объяснение

На основании списка проблем и противоречий, выявленных на первом этапе летных тестов системы Starship, представленного в разделе III данной статьи, сформулируем 5 основных проблем, которые, в соответствии с теорией, были вызваны различными вариантами автоколебаний типа «пого».

Проблемы

1. Совершенно необычный, «рваный», сопровождавшийся отказами, пожарами и взрывами, полет системы Starship при первом пуске, с четко повторяющимися через 12 секунд «суперспайками».
2. Возбуждение и самопроизвольное прекращение автоколебаний на старте, зафиксированные при втором и четвертом пусках.
3. Взрыв бустера при втором и преждевременное несимметричное отключение двигателей внутреннего кольца при третьем пуске в процессе выполнения бустбэка.
4. Взрыв корабля (второй ступени) на финише разгона во втором пуске.
5. Взрыв бустера в момент приводнения при третьем пуске.

Вкратце опишем, как эти проблемы решались компанией SpaceX.

Решения

1. Введение межступенчатого отсека горячего разделения.
2. Уменьшение скорости роста тяги двигателей на начальном и конечном участках процесса их выхода на номинальную тягу и повышение скорости роста тяги на среднем участке этого процесса.
3. Двухэтапное снижение тяги двигателей при бустбэке.
4. Отказ от сброса газов наддува кислородного бака корабля и выключение на финише разгона двигателей корабля, предназначенных для работы в вакууме.
5. Сброс межступенчатого отсека горячего разделения после бустбэка и, ставшее возможным вследствие этого мероприятия, соответствующее снижение тяги двигателей во время финального торможения.

А теперь, на основании теории возбуждения «пого» кратко объясним, почему эти решения позволили устранить выявленные проблемы.

Объяснение механизмов, вызывавших «пого», и последствий принятых решений

1. В первом полете возникли автоколебания «пого» с частотой 5.5 – 6 Гц, возбуждаемые гидроакустическими осцилляциями в магистралях подачи метана с частотой около 2 Гц. Медленно развивавшийся процесс парировался системой управления, которая начинала снижать тягу двигателей и, соответственно, давление в камере сгорания, а также, перепад давления потока метана на насосе. Это повышало частоту осцилляций и временно прекращало «пого». Возвращение после этого двигателей на номинальный режим работы приводило систему к исходному состоянию, и все начиналось сначала. Вставка промежуточного отсека разорвала единый упругий колебательный контур – сборку из двух ступеней, сильно повысила упругую частоту конструкции, и устранила «пого» сборки.
2. Увеличение скорости набора тяги на старте в момент возникновения условий для запуска «пого» не позволяло ему заметно развиваться.
3. Снижение тяги двигателей при бустбэке увеличило частоту гидроакустических осцилляций и вывело ее из зоны возникновения «пого».
4. Отказ от сброса газов наддува кислородного бака корабля в заключительной фазе полета привел к уменьшению перепада на насосах, а, значит, – к увеличению частоты гидроакустических

осцилляций в линиях питания двигателей. Тем не менее, внешние двигатели даже при таких условиях потребовалось отключать на финише разгона.

5. Сброс тяжелого межступенчатого отсека перед началом финального торможения привел к уменьшению скорости бустера в момент включения двигателей вследствие более эффективного аэродинамического торможения, что позволило снизить их тягу. Вследствие этого частота гидроакустических осцилляций выросла, и «пого» не запустился.

Таким образом, из анализа данных, приведенных в предыдущих разделах статьи, следует, что в случаях 1, 2 компания SpaceX самостоятельно разрешила возникшие проблемы, связанные с автоколебаниями. А при решении проблем в случаях 3 – 5, которые были выявлены во втором и третьем полетах, совершенно явно прослеживается следующий алгоритм решения: после того, как в очередном полете происходит авария объекта, или, в лучшем случае, отказ части двигателей, и частота колебаний «пого» становится известной из телеметрии, режим работы двигателей в следующем полете в этой фазе полета пересчитывается по формуле (1) с тем, чтобы в этот раз не попасть в зону возбуждения «пого». По крайней мере, в одном случае – при отработке бустбэка в третьем и четвертом полетах, видимо, вследствие приближенности этой формулы или каких-либо иных обстоятельств, этот алгоритм пришлось применить дважды методом последовательных приближений. При этом следует помнить, что компания SpaceX не имеет доступа к полному описанию теории и к программе расчета гидроакустических осцилляций в топливных системах ракет.

Выводы

1. Все пять критических проблем системы Starship в первых четырех полетах были вызваны возникновением различных процессов автоколебаний типа «пого», которые привели как к подрыву ракетной системы, так и к срыву траектории, а в трех случаях – к взрывам ее ступеней в полете.
2. Проблемы, которые привели к взрывам ступеней и срыву траектории, были решены в трубопроводах подачи компонент топлива изменением частот гидроакустических осцилляций для их ухода от собственных частот колебаний конструкции ракетного аппарата.
3. Частоты гидроакустических осцилляций изменялись путем дросселирования тяги двигателей (или, позднее, с пятого полета, форсирования), а на одном из режимов – просто их отключением.
4. Параметры критических режимов определялись в полетах системы Starship в моменты возникновения и развития эксцессов и передавались по телеметрии, а при следующем пуске режимы работы двигателей изменялись на основе экспериментальных данных от предыдущего пуска и формулы (1) пересчета частоты гидроакустических осцилляций по перепаду давления на насосе соответствующей линии подачи компонента топлива из теории «пого».
5. Доступ к элементам теории «пого» компания SpaceX получила в конце 2023 – начале 2024 годов, в период между вторым и третьим пусками системы Starship. При этом она постаралась сделать данные об этой теории недоступными для кого бы то ни было.
6. Вследствие того, что компания SpaceX не обладает всей полнотой информации о теории «пого», на новых версиях системы Starship из-за изменения их конструктивных характеристик будут сдвинуты границы областей возникновения и развития «пого». И это может привести и уже привело как к повторному возникновению описанных в работе критических проблем, так и к появлению новых проблем, вызванных попытками решения проблем прежних.
7. Седьмой и восьмой полеты системы Starship со второй ступенью, в которой впервые была существенно изменена конструкция, наглядно и зримо подтвердил правильность предыдущего вывода.

Литература

1. FAILURE: SpaceX Starship 1st Flight. NASASPACEFLIGHT, Reply #263, 30 April 2023 // <https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?topic=58669.msg2483001#msg2483001>
2. SpaceX Starship. Wikipedia // https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceX_Starship
3. Ю. И. Лобановский – Программа Starship: Итоги 2023 года. Synerjetics Group, 06.01.2024, 5 с. // https://www.synerjetics.ru/article/results_2023.htm
4. Starship Flight Test. SpaceX, 20 April 2023 // <https://www.youtube.com/watch?v=-1wcilQ58hI>
5. 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
6. FAILURE: SpaceX Starship 1st Flight. NASASPACEFLIGHT, Reply #161, 20 April 2023 // <https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?topic=58669.msg2477879#msg2477879>
7. Ю. И. Лобановский – Суперспайки – миф или реальность? Synerjetics Group, 17.02.2025, 8 с. // <https://www.synerjetics.ru/article/superspikes.htm>
8. J. Foust – SpaceX changing Starship stage separation ahead of next launch. Spacenews, June 24, 2023 // <https://spacenews.com/spacex-changing-starship-stage-separation-ahead-of-next-launch/>
9. D. Messier – Elon Musk Says SpaceX Completed All Corrective Actions for Next Starship Launch. SpaceRef, September 12, 2023 // <https://spaceref.com/newspace-and-tech/elon-musk-says-spacex-completed-all-corrective-actions-for-next-starship-launch/>

10. Starship's eighth flight test as early as Friday. *SatNews*, February 24, 2025 // <https://news.satnews.com/2025/02/24/starships-eighth-flight-test-as-early-as-friday/#:~:text=The%20eighth%20flight%20test%20of,on%20the%20X%20TV%20app>.
11. Ю. И. Лобановский – Причины аварий обеих ступеней системы Starship во втором полете. *Synerjetics Group*, 04.12.2023, 10 с. // https://www.synerjetics.ru/article/second_flight.htm
12. Ю. И. Лобановский – Механизм взрыва первой ступени системы Starship во время ее возвратного маневра. *Synerjetics Group*, 12.01.2024, 11 с. // <https://www.synerjetics.ru/article/boostback.htm>
13. 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
14. S. Clark – Starbase general manager Kathy Lueders discusses future plans at invite-only Brownsville event. *The Brownsville Herald*, 12 December 2023 // <https://myrgv.com/local-news/2023/12/12/starbase-general-manager-discusses-future-plans-at-invite-only-brownsville-event/>
15. Elon Musk SpaceX All Hands Company Update. *YouTube*, 13 January 2024 // <https://www.youtube.com/watch?v=jgfMkHtONfg>
16. Replay! SpaceX Starship launches on 3rd integrated test flight. *VideoFromSpace* 14.03.2024 // <https://www.youtube.com/watch?v=Dr8ZaMAa5jw>
17. 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>
18. On the Path to Rapid Reusability. *SpaceX, Updates*, 24 May 2024 // <https://www.spacex.com/updates/#flight-3-report>
19. Elon Musk Starship Presentation: IFT-4 Master Plan, Starship V2 & V3, Raptor V3, Mars, IFT-3 & More. *YouTube*, 4 April 2024 // https://www.youtube.com/watch?v=z3B0XIImf_w
20. FULL SpaceX Starship Flight 4 Broadcast re-upload. *SpaceX*, 6 June 2024 // <https://www.youtube.com/watch?v=OZVR2SNjyug>
21. SpaceX Performs Second Wet Dress Rehearsal of Fourth Starship Flight Stack. *NSF/VK Видео*, 28.05.2024 // https://vk.com/video-41152133_456254552
22. Б. И. Рабинович – Неустойчивость жидкостных ракет и космических аппаратов и некоторые фрагменты истории борьбы с ней. *Препринт ИКИ РАН*, 2006, 40 с. // <http://www.iki.rssi.ru/books/2006rabinovich.pdf>
23. C. E. Larsen – NASA Experience with Pogo in Human Spaceflight Vehicles. *NTRS – NASA Technical Reports Server*, NATO-OTAN-RTO-MP-AVT-152, 10 May 10 2017, 23 p. // <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20080018689/downloads/20080018689.pdf>
24. Ю. И. Лобановский – Технические причины катастрофы на Саяно-Шушенской ГЭС (итоги расследования). *Synerjetics Group*, 04.11.2009, 44 с. // <https://www.synerjetics.ru/article/catastrophe.htm>
25. В. Х. Арм, В. Л. Окулов, И. М. Пылев – Неустойчивость напорных систем. *Доклады Академии наук, Энергетика*, 1995, **341**, N 4.
26. Ю. И. Лобановский – Автоколебания напорных систем гидроэлектростанций и Саянская катастрофа. *«Гидроэнергетика Украины»*, N 3 – 4, 2013, 11 с. // <https://www.synerjetics.ru/article/autooscillations.htm>
27. Д. Скрипач – Тестовый прожиг нижней ступени Starship завершился неожиданным отключением движков. *Naked Science*, 07 August 2023 // <https://naked-science.ru/community/870090#>
28. Д. Скрипач – SpaceX снова протестировала ускоритель Super Heavy перед испытательным полетом Starship. *Naked Science*, 28 August.2023 // <https://naked-science.ru/community/876657>

Москва,
08.03.2025

Ю. И. Лобановский