

Второй кризис программы Starship

Ю. И. Лобановский

Краткое содержание

В работе показано, что аварии второй ступени системы Starship – корабля Ship версии Block 2 в последних двух полетах произошли по двум различным причинам. В седьмом полете это случилось из-за возникновения поперечных колебаний трубопроводов новой конструкции для подачи метана к внешним двигателям с вакуумными соплами, а в восьмом – вследствие возникновения продольных автоколебаний типа «пого» с гидроакустическими осцилляциями в магистралях подачи кислорода.

Из анализа следует, что первая же попытка изменения конструкции системы Starship полностью обесценила все достижения компании SpaceX, полученные в ходе преодоления первого кризиса в программе испытаний, связанного с преследующими эту ракетную систему различными вариантами «пого». Это произошло из-за того, что прежние методы его подавления на новом этапе программы стали практически неприменимыми, а также с невозможностью предсказания до полета где, когда и почему возникнет новый автоколебательный процесс и возникнет ли он на этот раз вообще. В этом и заключается основное содержание второго, и, по-видимому, пока самого глубокого кризиса программы Starship. Не имея полноценной теории «пого» вследствие стремления руководства компании скрыть сам факт особой подверженности этой ракетной системы к продольным автоколебаниям, компания SpaceX будет вынуждена долго и вслепую бороться с внезапно возникающими все новыми и новыми автоколебательными процессами такого типа при каждом изменении конструкции системы Starship.

Ключевые слова: *Starship, «пого», продольные автоколебания, поперечные колебания, частота, резонанс*

I. Введение

Основным результатом первых четырех полетов по программе испытаний системы Starship стало то, что обе его ступени: первая – бустер Super Heavy, и вторая – Ship смогли полностью успешно завершить все активные маневры с использованием основных силовых установок и совершить мягкие приводнения на поверхность океана. За это время были преодолены пять возникших в полете однотипных критических проблем, которые сначала привели к подрыву ракетной системы, затем – к срыву траектории, а в трех случаях – к взрывам ее ступеней в полете. Это позволяет выделить первые 4 пуска системы в качестве первого этапа ее испытаний, во время которого были выполнены поставленные первоочередные задачи.

Причиной всех этих проблем было возникновение разных вариантов продольных автоколебаний типа «пого». После первого полета «пого» был устранен введением промежуточного межступенчатого отсека, изменившего частоту собственных колебаний корпуса системы Starship, что и предотвратило возбуждение автоколебаний в этой фазе полета. В полетах, начиная с третьего, компания SpaceX (разработчик системы Starship) использовала для решения проблем «пого» 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 в топливной системе силовой установки – второй составляющей этого автоколебательного процесса, вышла из зоны «пого». Далее полет либо успешно завершается, либо продолжается до момента следующей аварии, с повторением этих действий до тех пор, пока все эти инциденты не прекратятся. Необходимые изменение режима работы двигателей определялись на основании формулы, связывающей с ним частоту гидроакустических осцилляций, к которой SpaceX получила доступ в промежутке между вторым и третьим полетами системы Starship, в ноябре 2023 – январе 2024 годов. Все это, как итоги первого этапа испытаний, было изложено автором в конце января 2025 года в докладе на XLIX Академических чтениях по космонавтике. Краткое изложение этого выступления представлено в работе [1].

Во время пятого и шестого полетов системы Starship решались уже другие проблемы, в основном связанные с возвращением бустера на стартовый комплекс и подхватом его там при посадке его боковыми консолями, а также с теплозащитой корабля при спуске с орбиты. Подхват бустера был успешно осуществлен с первой попытки, а доработка теплозащиты грозит растянуться на неопределенный срок уже на новых версиях этой ракетной системы. Но, ни то, ни другое не входит в круг проблем, рассматриваемых в данной работе. Что касается «пого», то можно отметить, что в пятом полете при бустбэке – маневре возврата бустера к месту старта впервые уход по частоте гидроакустических осцилляций из зоны «пого» был осуществлен не дросселированием, а форсированием работы двигателей по отношению к тому режиму, который первоначально был использован (и который привел к взрыву бустера во втором полете). То же стало делаться и в последующих полетах.

В связи с тем, что масса полезной нагрузки первой версии системы Starship Block 1, особенно, с учетом ограничений на тягу двигателей из-за «пого», оказалась весьма близкой к 0, с седьмого пуска начались испытания системы с увеличенной стартовой массой. Эта, вторая версия Starship Block 2, состоит из прежнего бустера, и удлиненной на 1.8 м второй ступени со значительно увеличенными за счет отсека

полезной нагрузки топливными баками [2]. Масса топлива возросла на 300 т, что должно было позволить вывести полезную нагрузку массой не менее 20 т в виде 10 макетов спутников V3 Starlink [3]. В январе и марте 2025 года было проведено 2 пуска второй версии системы Starship. И оба они достаточно неожиданно, как для компании SpaceX, так и для средств масс-медиа, постоянно следивших за этими испытаниями, завершились двумя взрывами вторых ступеней. В отличие от прошлых времен, SpaceX и ее главный инженер И. Маск спустя более трех недель с половиной после испытания ничего не сообщают хотя бы о предположительных причинах последнего фиаско, а также о том, когда можно ожидать следующий испытательный пуск.

Автор решил впервые после третьего полета снова в текущем режиме времени описать причины последних двух неудачных испытаний, но при этом в написанных им для публичного доступа текстах, по причинам, ясным, например, из работ [1, 4], теперь не будет никаких конкретных данных о предполагаемых количественных характеристиках вновь выявленных аварийных процессов.

II. Траекторные данные трех последних полетов системы Starship

Рассмотрим сначала траекторные данные в трех последних полетах системы Starship: шестой полет (IFT-6) был совершен еще первой версией системы, а седьмой (IFT-7) и восьмой (IFT-8) – с более массивной версией корабля Ship Block 2. Будем рассматривать только их – корабли Ship, так как бустеры во время этих пусков, не считая возможных мелких усовершенствований, были практически идентичными, и, если при этих полетах у них иногда и бывали некоторые проблемы, они имели чисто технический характер, и, как правило, в дальнейшем быстро и успешно решались. В шестом полете из-за небольших проблем со стартово-посадочным оборудованием бустер пришлось затопить в Мексиканском заливе [5], но следующий подхват бустера был проведен четко. А в восьмом полете 2 из 10 двигателей внутреннего кольца не включились при бустбэке, и один из них – также и при финальном торможении [6], но и это не помешало бустеру B15 полностью успешно завершить свой полет.

На рис. 1 показаны скорости полета (в км/час) в зависимости от времени (в секундах) вторых ступеней системы (в том числе, и в составе связи): синяя кривая – в шестом пуске, светло-коричневая – в седьмом, и зеленая – в восьмом пусках [7].

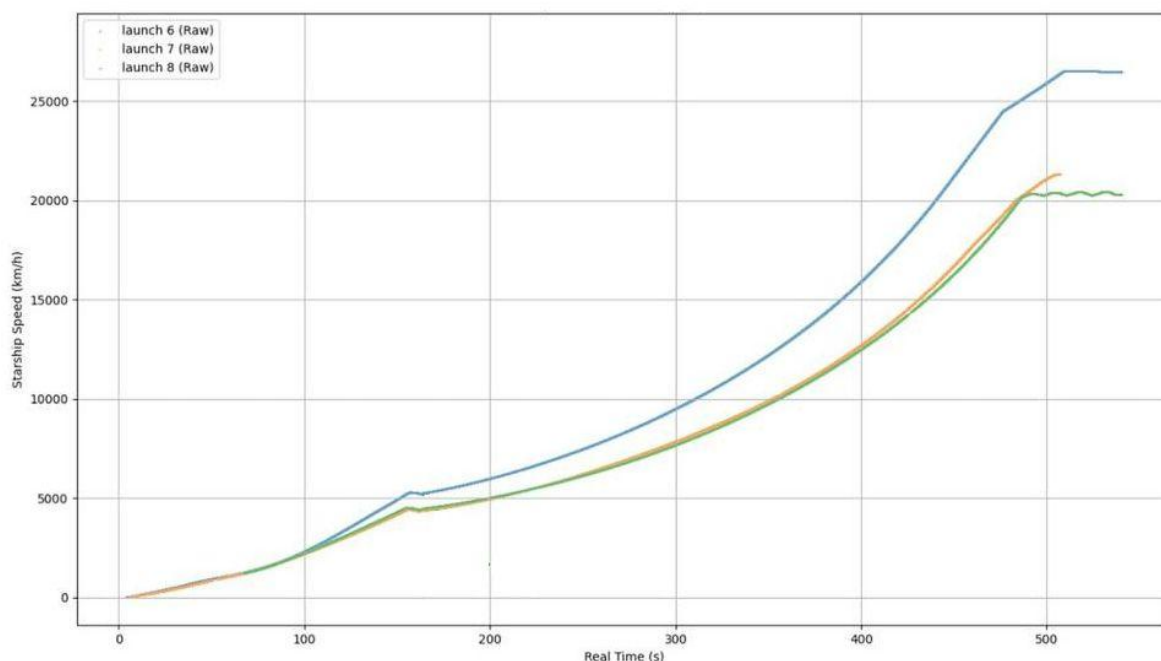


Рис. 1 – Скорость корабля Ship в трех последних полетах (IFT-6 – IFT-8)

Из-за бóльшей массы и прежней силовой установки новая версия корабля Ship разгонялась медленнее, чем старая. В восьмом полете, по крайней мере, на заключительном этапе разгона тяга силовой установки была немного снижена по сравнению с тягой в предыдущем полете, но в обоих случаях полеты завершились разрушениями вторых ступеней.

Ускорения (в долях ускорения свободного падения g) трех вторых ступеней, первой ступени в восьмом полете, а также число работающих в том полете двигателей, представлены на рис. 2 [8]. Как обычно, при рассмотрении подобных графиков следует помнить, что во время бустбэка направление полета первой ступени меняется на противоположное, и ускорения, которые на графиках такого рода показаны отрицательными на самом деле являются положительными (прижимающими топливо к днищам баков).

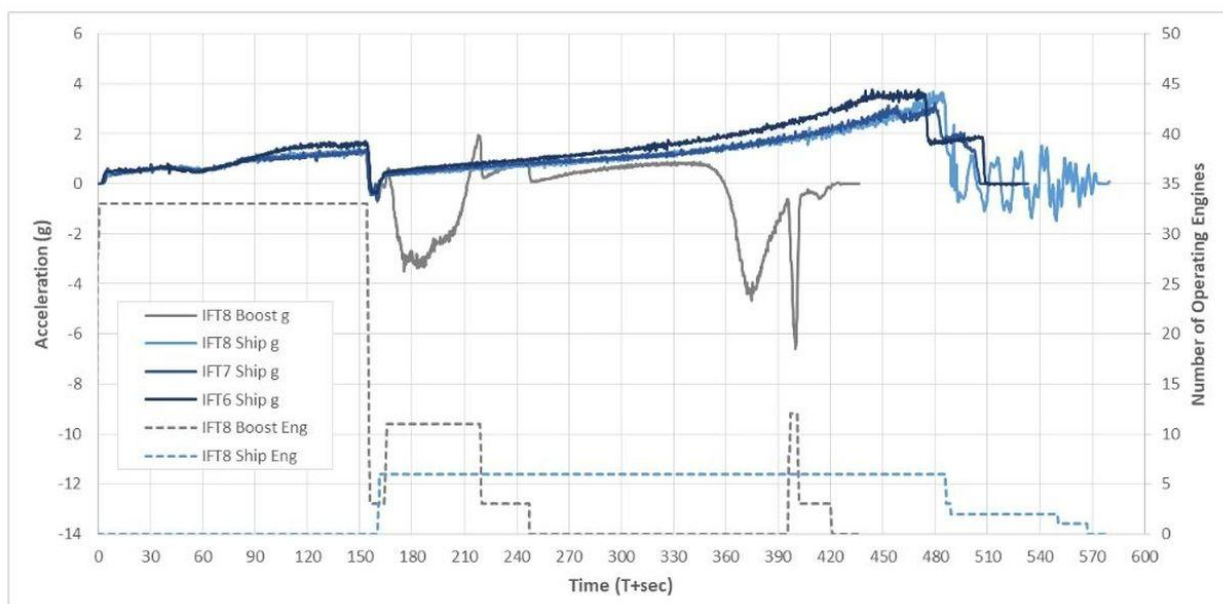


Рис. 2 – Ускорения системы Starship в трех последних полетах (IFT-6 – IFT-8), а также ускорение бустера и число работающих двигателей в восьмом полете (IFT-8)

На рис. 3 более детально показаны ускорения (также в долях g) на заключительных – ключевых для понимания произошедшего участках разгона вторых ступеней в седьмом и восьмом полетах [7]. Поле точек, построенных по кадрам показаний скорости в видеоролике [9] после выглаживания данных отобразилось в виде представленных здесь двух сравнительно гладких кривых.

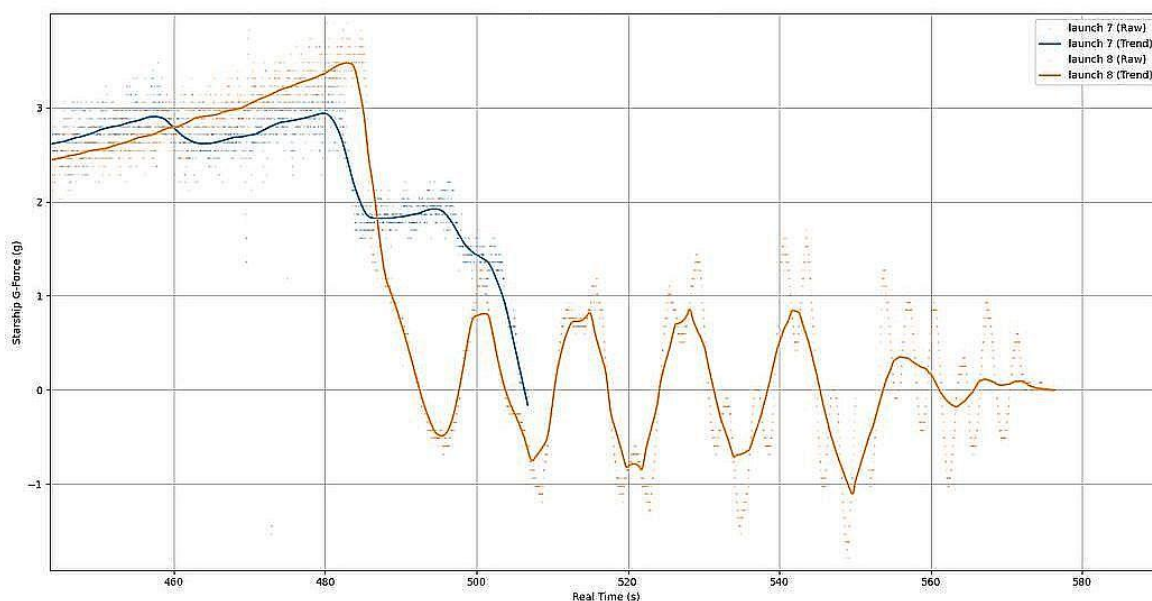


Рис. 3 – Ускорения вторых ступеней (кораблей Ship) на завершающих участках двух последних полетов (IFT-7 и IFT-8)

Вернемся теперь к рис. 1, 2. Разгон второй ступени в шестом полете уже традиционно завершался отключением за 15 – 30 секунд до набора требуемой скорости трех внешних двигателей Raptor-2 с вакуумными соплами, специально предназначенных для работы на больших высотах именно в этих условиях. Это было вызвано тем, что чуть позже по времени они входили бы в зону возбуждения «пого». При этом появлялся излом на графике скорости, и снижалась потенциально возможная полезная нагрузка, но, в этих пусках, в отличие от второго, седьмого и восьмого полетов взрывов на финише участка разгона не происходило. Причем, с каждым полетом от третьего до шестого, время отключения внешних двигателей все увеличивалось.

III. Архитектура линий питания горючим двигателей, установленных на корабле Ship

В первых работах автора [10, 11] по оценке причин возникновения этого варианта «пого» ожидалось, что гидроакустические осцилляции возникали в линиях питания внешних двигателей Raptor-2 кислородом,

так как предполагалось, что линии их питания метаном – настолько длинные, что возможные частоты осцилляций в них никак не могли быть согласованы с собственными частотами упругих колебаний корпуса второй ступени. Следует отметить, что тогда автору не были известны не только длины трубопроводов, но и то, как они были проведены. Только уже непосредственно перед седьмым пуском эти данные, хотя бы приблизительные, стали известны [12].

И тогда выяснилось, что питание метаном всех шести двигателей происходило с помощью одной трубы, проходящей вдоль центральной оси кислородного бака, а уже в самом конце от этой единой трубы отходили 3 боковых отводка к двигателям с вакуумными соплами, а чуть ниже были 3 отвода к центральных двигателям с короткими атмосферными соплами, см. левое изображение на рис. 4 [12]. И это, как было хорошо известно автору из опыта оценок гидроакустических частот в водоводах напорных систем гидроэлектростанций, в корне меняло все дело.

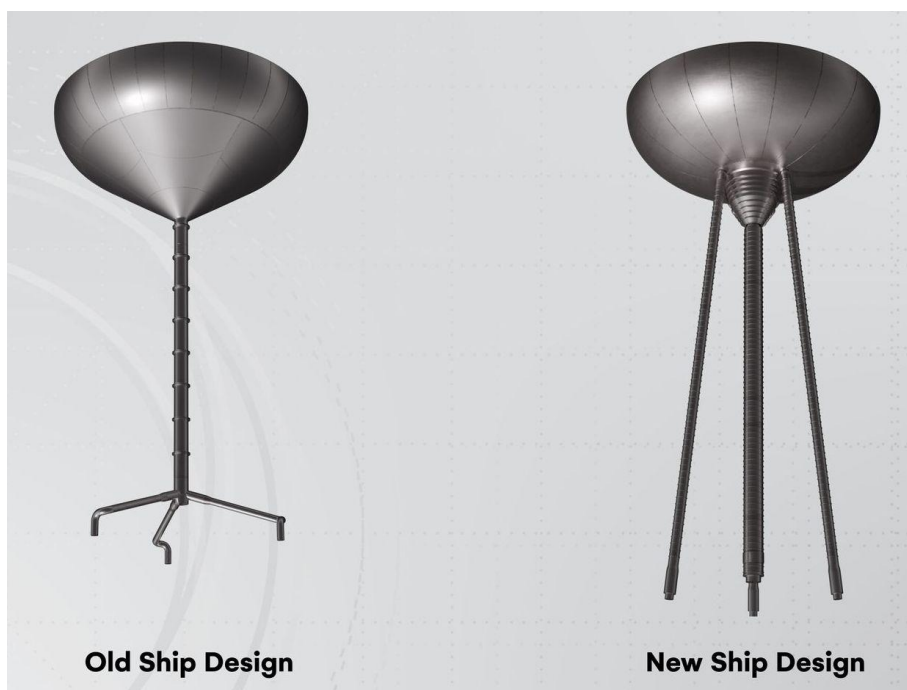


Рис. 4 – Архитектура системы питания силовой установки метаном первой и второй версий кораблей Ship (вторых ступеней системы Starship)

Достаточно часто на гидроэлектростанциях вода подается из водохранилища к каждой турбине по отдельному водоводу, что обычно бывает на ГЭС с бетонными плотинами, через тело которых и проходят эти каналы. Однако, когда плотины делаются каменно-земляными, или когда машинные залы ГЭС существенно удалены от плотин, что бывает в горах, эффективнее оказывается сначала проводить длинные общие туннели для воды, которые уже только потом разветвляются на отдельные водоводы к каждой турбине, что делает их схемы довольно похожими на то, что можно видеть слева на рис. 4.

В качестве примера можно привести Нурекскую ГЭС на реке Вахш в Таджикистане, у которой в напорных системах возникали автоколебания, и за 26 лет до Саянской катастрофы произошел подобный инцидент, но к счастью, меньших масштабов [13]. На рис. 5 можно видеть схему основных объектов и сооружений этой гидроэлектростанции [14]. Центральное пятно сложной формы – каменно-земляная плотина высотой 300 метров, что до 2013 года делало ее самой высокой в мире. Из всего множества изображенных на рис. 5 позиций нас интересует всего несколько: позиция 7 – машинный зал станции с девятью турбинами, позиции 11 – водозаборы трех туннелей для воды, и позиции 9 – разветвление каждого туннеля на три водовода, примерно, в три раза меньшей площади поперечного сечения, подводящих воду к каждой турбине. На позиции 12 и 13 обращать внимание не нужно, так как это – изображения временного туннеля, позволявшего трем турбинам работать еще при заключительной фазе строительства станции. Потом этот туннель был перекрыт.

Численные эксперименты показали, что правильные данные по частотам гидроакустических осцилляций (там все 9 водоводов имели различные длины) получаются, если за длины колебательных контуров от их входов до турбин принимать только длины этих водоводов. При этом длины предшествующих туннелей никак не влияли на частоты. И так было всегда, во всех разветвленных напорных системах.

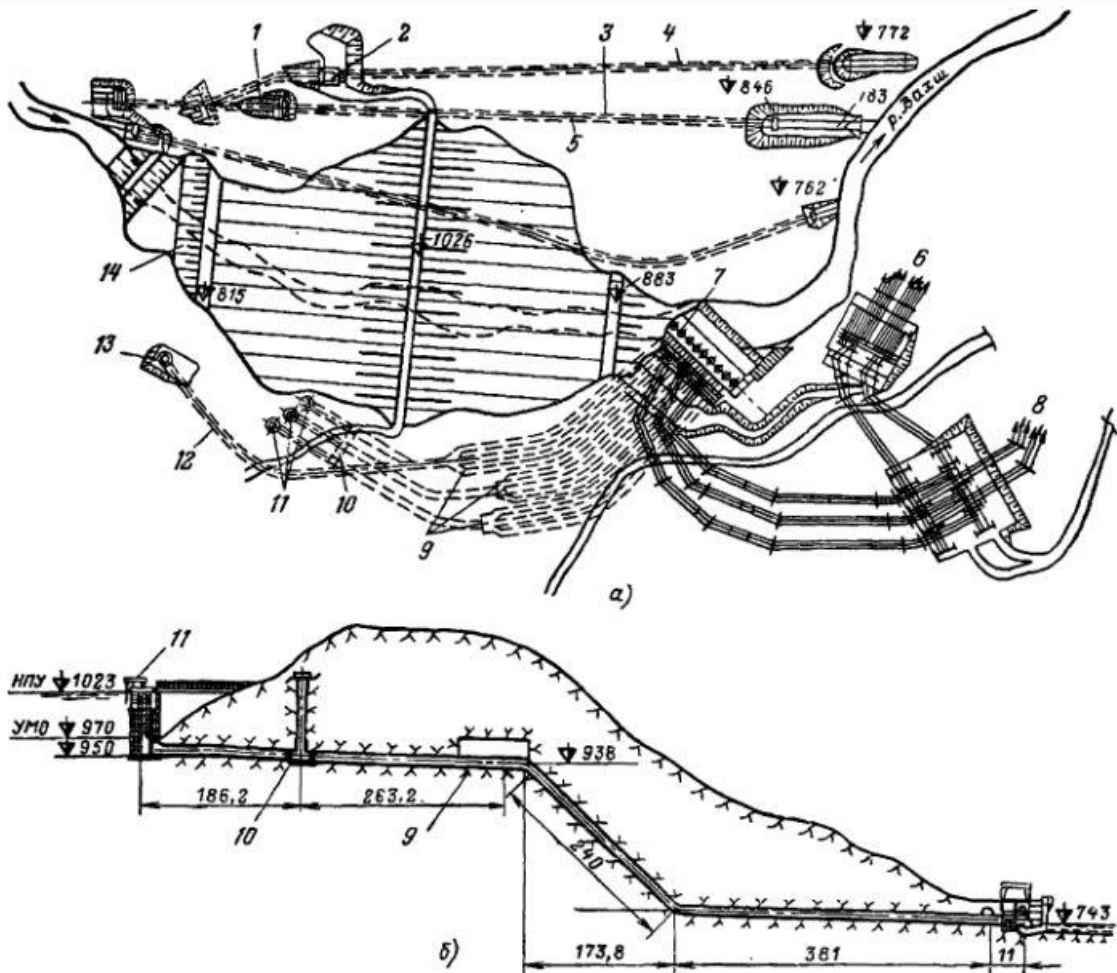


Рис. 5 – Схема основных объектов и сооружений Нурекской ГЭС

Из этого следует простой вывод, что частота гидроакустических осцилляций линий питания метаном внешних двигателей второй ступени никак была не связана с удалением от них бака метана и была гораздо выше, чем получалась в первых расчетах, в которых предполагалось использование системы питания без разветвлений. И тут же стало известно [15], что во второй версии корабля Ship Block 2 компания SpaceX действительно перешла именно к такой схеме с прямым питанием внешних двигателей Raptor-2 с помощью отдельных трубопроводов метана, см. на правую часть рис. 4 (третий трубопровод затеняется оставшейся, как и прежде, толстой центральной трубой, по которой метан подается к 3 центральным двигателям с атмосферными соплами). Очевидно, что в такой конфигурации внешние двигатели «пого» испытывать не могли, в отличие от корабля Ship Block 1. Отростки трубопроводов метана к центральным двигателям были еще короче, и частота их гидроакустических осцилляций была еще выше, чем у внешних двигателей, что тоже выводило их из зоны «пого».

IV. Причины аварии системы Starship в седьмом полете

После того, что было изложено в предыдущих разделах данной работы, подоплека модернизации системы питания метаном внешних двигателей второй ступени, то есть единственного качественного изменения ее конструкции, становится совершенно очевидной. На финальной стадии разгона второй ступени во время второго полета в системе питания метаном, по крайней мере, одного из этих двигателей возникли автоколебания типа «пого», и с третьего по шестой полеты внешние двигатели стали отключать незадолго до возбуждения этого процесса, и чем дальше, тем большее время они не работали. Видимо, это было связано с постепенным ростом массы второй ступени и соответствующим снижением частоты упругих колебаний корпуса. Однако, все это могло быть только временной мерой, так как снижало полезную нагрузку ракетной системы, а также не позволяло использовать эти двигатели именно там, где они и должны были работать. О каких-либо орбитальных маневрах в таком случае и говорить не приходится. Кроме того, на новой второй ступени из-за значительного увеличения ее стартовой массы должна была снизиться частота упругих собственных колебаний конструкции гораздо более существенно, чем в последних полетах корабля Block 1, и, недопущение режима возбуждения «пого» могло привести еще более длительному полету корабля только на трех центральных двигателях.

Так как SpaceX не имеет полного доступа к теории автоколебаний типа «пого», вследствие чего у нее нет и ясного представления, что делать, когда изменяется геометрия системы питания двигателей (в отличие от весьма успешного применения одного из следствий из этой теории по управлению двигателями при фиксированной геометрии системы питания), то компания для решения проблемы решила поступить самым простым образом. В принципе, в условиях дефицита времени это было оправданно и вполне логично.

Они решили, что если при практически прямых трубопроводах во внутренних двигателях второй ступени «пого» не возникает, то нужно сделать такие же прямые и длинные трубопроводы питания метаном и внешних двигателей. То есть пришли к использованию принципа гомеопатии – «подобное излечивается подобным (*similia similibus curantur*)». Хотя, надо полагать, им до сих пор неизвестно, что частота гидроакустических осцилляций в системах питания центральных двигателей, по-видимому, определяется длиной только коротких отрезков от центрального трубопровода метана, а не его полной длиной. Тем не менее, и на полной длине от днища бака с метаном до внешних двигателей, как показывают расчеты, ничего похожего на «пого» не возникает. И после наземных тестов новой системы питания 16 января 2025 года был произведен пуск системы Starship с новой второй ступенью, которая на финише разгона, однако, как и во втором полете, взорвалась.

Прочитируем теперь выдержки из публичного отчета компании SpaceX [16] по результатам седьмого полета: «После отделения корабля шесть его двигателей Raptor вывели корабль на ожидаемую траекторию. Примерно через две минуты после начала работы в кормовой части корабля возле одного из вакуумных двигателей Raptor была замечена вспышка [Точнее, через ~ 140 секунд (в 4:58), если связать ее с ближайшим к этому времени суперспайком (парой направленных вниз – вверх пиков на графике) на рис. 6]. Этот хвостовой отсек представляет собой негерметичную зону между дном бака с жидким кислородом и кормовым теплозащитным экраном. Датчики в нем зафиксировали повышение давления, указывающее на утечку после того, как была замечена вспышка».

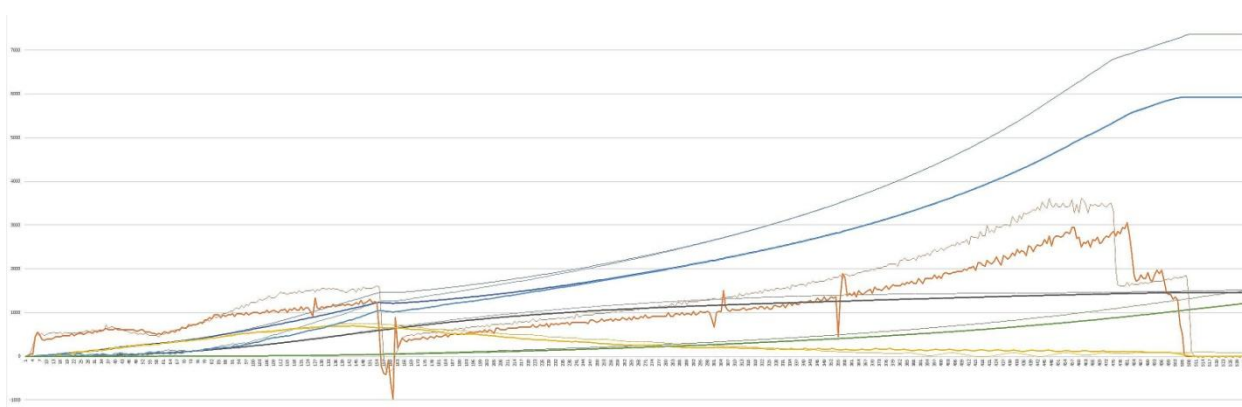


Рис. 6 – Полеты IFT-6 и IFT-7 (вторые ступени), ускорения – тонкая и толстая фиолетовые линии при IFT-6 и IFT-7 соответственно, с резкими скачками [17]

«Спустя еще две минуты [скорее, через 65 с, то есть в момент времени 6:03 – 6:04, см. рис. 6] была замечена еще одна вспышка, за которой последовали устойчивые пожары в хвостовом отсеке. В конечном итоге, это заставило все двигатели Starship, кроме одного, выполнить контролируемые последовательности выключения, и далее это привело к потере связи с кораблем. Телеметрия с корабля в последний раз была получена чуть более чем через восемь минут и 20 секунд полета».

Послеполетный анализ показывает, что система подрыва сработала автономно... и... корабль развалился примерно через три минуты после потери контакта во время спуска. Наиболее вероятной первопричиной потери корабля был определен гармонический отклик, в несколько раз более сильный в полете, чем наблюдалось во время испытаний, что привело к увеличению нагрузки на оборудование в двигательной системе».

Для того, чтобы правильно перевести последние два цитируемых выше абзаца отчета со специфического фирменного языка на русский, снова обратимся к рис. 2, 3, а также к описанию отказов двигателей второй ступени. В 7:40 (через 460 с после старта и через 95 с после второй вспышки) центральный двигатель выполнил «контролируемое отключение», в 8:02 это произошло со вторым центральным двигателем, а в 8:04 – и с соседним внешним двигателем. В 8:18 корабль потерял второй внешний двигатель, в 8:23 вышел из строя последний из трех центральных двигателей, и в 8:26, на высоте 146 км связь с аппаратом была потеряна [18] – за 27 секунд до запланированного выключения двигателей [19]. Осталось неизвестным, когда прекратил работу последний внешний двигатель. Таким образом, отключения двигателей растянулись не менее чем на 46 секунд.

При этом из данных, представленных на рис. 3, можно сделать вывод о том, что колебания ускорения, а, значит, и тяги, начались достаточно задолго до отключения первого двигателя. Количество метана в баке с

момента времени примерно 8:04 стало уменьшаться значительно быстрее, чем кислорода, так что всего лишь через 16 секунд к 8:20 – последней временной отметки, когда фон в кадре позволил сколько-нибудь точно отследить показания индикаторов топлива, остаточная доля метана в баке горючего была не более 60 % от того, что имелось в баке окислителя, см. рис. 7. А момент 8:04 очень близок к моменту отказа первого внешнего двигателя с вакуумным соплом, если они вообще не совпадают, хотя пожары в хвостовом отсеке и продолжались к этому моменту уже чуть дольше трех минут.

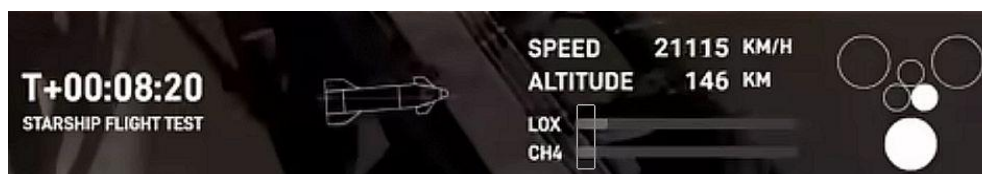


Рис. 7 – Соотношение кислорода и метана в баках корабля Ship при IFT-7 перед потерей телеметрии

Из всего этого следует, что, пожалуй, единственной версией, связывающей описываемые события в в единую причинно-следственную цепь могут быть только интенсивные резонансные колебания новых трубопроводов питания внешних двигателей метаном (названные в отчете «гармоническим откликом»), сопровождавшиеся утечками топлива, а, затем, разрушение одного из них в 8:04, после чего метан стал, по-видимому, изливаться в кислородный бак. Так как продольные колебания типа «пого» для этой версии линий питания двигателей метаном расчетами исключаются, то причиной произошедшего являются поперечные колебания тонких неподкрепленных трубопроводов метана. С первого взгляда на конструкцию, изображенную справа на рис. 4, кажется, у любого инженера должна возникнуть мысль о возможных проблемах с поперечной устойчивости этих линий при их размещении в объекте, в котором существуют внешние колебания широкого спектра, как в любой ракетной ступени. Более того, тысячи, а то и десятки тысяч людей могли наблюдать возбуждение различных мод поперечных колебаний шнуров, на которые они подвешивали какие-нибудь погружные вибрационные насосы, по мере изменения уровня откачиваемой ими жидкости – при выходе шнура из жидкости демпфирование его колебаний снижалось. Так и здесь, при заполненном кислородом баке, как в начале разгона или при наземном тесте, демпфирование было велико, и трубопроводы метана хоть и совершали колебания, но не разрушались. А когда кислорода в баке стало мало, тогда верхний трубопровод, менее всего погруженный в остатки кислорода, оторвался в месте крепления одного из его концов.

Если учесть, что внешние двигатели жестко закреплены, а центральные установлены на карданных подвесах, то колебания корабля, тем более, поперечные, должны были в первую очередь раскачивать их, что и привело к тому, что система управления стала отключать их первыми еще до разрушения первого трубопровода метана, после чего счет пошел уже на секунды.

Необходимость подкрепления длинных и тонких трубопроводов – это известное требование для конструкторов. Видимо, за его нарушение и были, как говорят, уволены сразу после седьмого полета некоторые сотрудники компании SpaceX [20]. Очевидно, срочно были разработаны методы крепления трубопроводов метана, например, с помощью растяжек между ними и боковыми стенками кислородного бака, которые были отработаны во время беспрецедентно длительных наземных испытаний корабля S34 11 февраля 2025 года [21]. После этого компания стала интенсивно готовиться к следующему полету системы Starship.

V. Причины аварии системы Starship в восьмом полете

Итак, к середине февраля проблема, возникшая то ли вследствие небрежности, то ли недостаточной компетенции прежних разработчиков топливной системы новой версии корабля, была решена, и 6 марта 2025 был произведен восьмой пуск системы Starship [6, 9, 22]. Полет должен был пройти по программе, аналогичной предыдущей, только полезная нагрузка в виде четырех макетов спутников Starlink была в 2.5 раза меньше, чем в январе. Судя по различным откликам, с уверенностью ожидалось, что этот полет будет полностью успешным. Однако, примерно в то же полетное время, что и в январе, произошел взрыв двигателя, и корабль был снова потерян. До сих пор, спустя три с половиной недели, компания SpaceX не сообщила о причинах произошедшего, и вообще не сделала каких-либо содержательных заявлений. При этом средствами массовой информации поддерживается мнение, что в восьмом полете произошло то же самое, что и седьмом, и что лекарство, срочно прописанное системе Starship в короткий межполетный период, оказалось хуже болезни.

Но это не так. Анализ второго, седьмого и восьмого полетов позволяет утверждать, что ситуация на самом деле еще хуже – эта работа была выполнена должным образом, но причины двух последних аварий оказались совершенно разными. И что сейчас со всем этим делать – в компании не знают.

Чтобы доказать эти утверждения, сравним известную нам информацию об последних двух полетах. В предыдущем разделе работы было показано, что в седьмом полете аварийная ситуация медленно развивалась в течение не менее, чем трех минут, и колебания конструкции корпуса первоначально привели к

отключению центральных двигателей, закрепленных на подвижных подвесах и из-за этого более подверженных внешним воздействиям. При этом отключения двигателей происходили в течение не менее чем $\frac{3}{4}$ минуты, см., например, рис. 3.

В восьмом полете, несмотря на то, что предвестники грядущей аварии тоже существовали, но первый из них можно было заметить только секунд за 20 до аварии – в 7:45 на кадре из хвостового отсека появился слабый отблеск короткого всполоха пламени где-то в окрестности задней крышки кислородного бака [23], см. рис. 8. Таким образом, время развития аварийного процесса при IFT-8 было на порядок короче, чем при IFT-7, что хорошо соответствует типичным временам развития автоколебаний типа «пого».



Рис. 8 – Отблеск на обресе хвостового отсека корабля от короткого всполоха пламени в его верхней части при IFT-8

Теперь снова вернемся к рассмотрению траекторных данных. На рис. 3 достаточно хорошо виден процесс последовательного отключения системой управления двигателей корабля S33 в седьмом полете, хронология которого приведена в предыдущем разделе данной работы. В то же время в восьмом полете в 8:04, взорвавшись, прекратил работу внешний двигатель (с вакуумным соплом) и, судя по иконографике, за 2 – 3 секунды, а скорее всего еще быстрее, прекратили работу все три центральных двигателя. Два оставшихся внешних двигателя, расположенные дальше от взрыва и прикрытые от него центральными двигателями, тем не менее, продолжили свою работу, заставляя корабль совершать впечатляющие кульбиты, напомнив о первом полете системы Starship. Ответ на вопрос, почему не взорвались они, будет дан ниже в этом тексте.

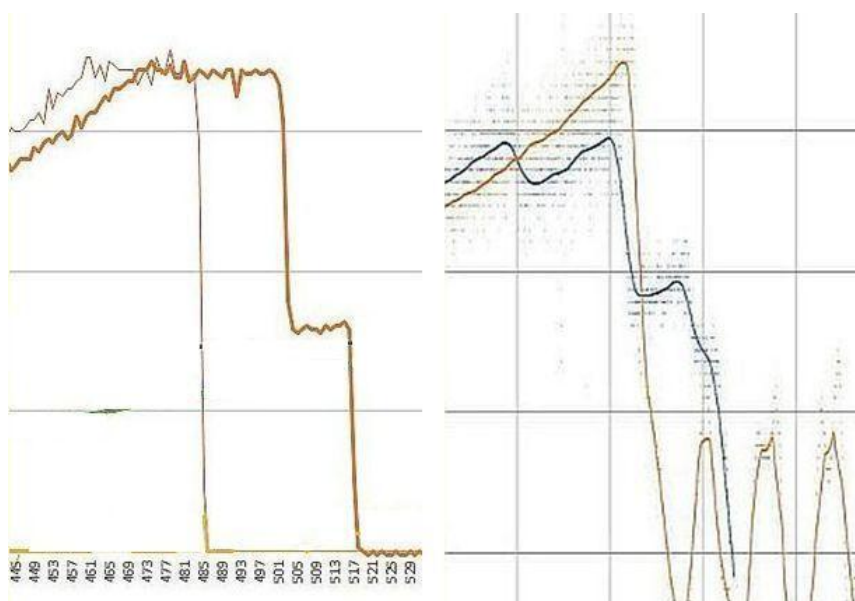


Рис. 9 – Ускорения при завершении разгона кораблей Ship при IFT-2, IFT-3, IFT-7 и IFT-8

Следует отметить, что за исключением этого момента, развитие аварии второй ступени при IFT-8 весьма похоже на то, что происходило 15.5 месяцев назад при IFT-2, см рис. 9, в левой части которого показаны ускорения кораблей Ship перед аварией при IFT-2 и перед завершением разгона при IFT-3, а в правой части аналогичные ускорения при IFT-7 и IFT-8 перед новыми авариями. Графики приведены к одному масштабу, разные критерии выглаживания приводят к различной гладкости сравниваемых кривых. Сходство аварий во втором и восьмом полетах, несомненно, как и отличие их от аварии в седьмом полете.

Продемонстрируем также доли остатков компонент топлива в баках кораблей при IFT-2, IFT-7 и IFT-8 в кульминационные моменты их аварий [9, 18, 24], см. рис. 10.



Рис. 10 – Соотношение долей кислорода и метана в баках кораблей Ship при IFT-2, IFT-7 и IFT-8 в кульминационные моменты трех аварий

При нормальном течении процесса доли остатков топлива в баках ракетной ступени должно быть примерно одинаковым, что, обычно, и происходит. При просмотре видеороликов всех восьми полетов системы Starship можно иногда увидеть некоторые отклонения от равенства долей метана и кислорода, особенно, в моменты развития аварий. Даже на рис. 10 можно заметить, что во втором полете в момент отключения двигателей, доля кислорода была чуть меньше, чем доля метана (см. на верхнее окно рис. 10), а в восьмом – стало чуть меньше метана (см. на нижнее окно). Это могло быть связано с неточностью работы датчиков уровня топлива, а также с утечками его компонент – без этого пожары в хвостовом отсеке корабля, видимо, были бы невозможны. Однако все эти утечки настолько невелики, что их довольно сложно увидеть на соответствующих индикаторах. Но в седьмом полете (см. на среднее окно) различие в долях компонент, возникшее всего за ~ 15 секунд очень велико, при том, что к началу этого явления отключилась уже половина двигателей, и расход топлива снизился, как минимум, вдвое по сравнению с номинальным. Стоит отметить, что в восьмом полете в 8:20 датчики показывали в кислородном баке больше жидкости, чем в седьмом полете за 15 секунд до этого. Достаточно очевидно, что при поперечных колебаниях длинных и тонких трубопроводов их разрушение начинается в месте закрепления их концов, следовательно, можно ожидать, что метан из поврежденного или даже разрушенного трубопровода стал попадать в кислородный бак, вследствие чего в этот момент и возникла беспрецедентная диспропорция в компонентах топлива.

Ничего подобного не было ни во втором, ни в восьмом полетах. Первоначально автором, не имевшим в тот момент схемы проведения трубопроводов метана во второй ступени, предполагалось, что длина колебательного контура от бака метана до насоса двигателя включает и высоту кислородного бака. В таком случае, никакие автоколебания типа «пого» с осцилляциями в линиях подачи метана не могли бы возбудиться. А процесс «пого» с осцилляциями в кислородном контуре в принципе был возможным. Поэтому взрыв второй ступени во втором полете и был объяснен именно этим процессом [11].

Однако незадолго до седьмого полета были выложены схемы топливной системы кораблей Ship, как первой версии, так и второй. И выяснилось, что при реальной конфигурации линий подачи метана, «пого» вполне мог произойти (см. раздел III этой работы). А изменение архитектуры этих линий во второй версии корабля, прямо и недвусмысленно показало, что во втором полете и произошел процесс «пого» с осцилляциями метана. В то же время, реальные параметры трубопроводов кислорода не способствовали возникновению таких автоколебаний по этому каналу в первой версии корабля.

В новой версии вариант «пого» с осцилляциями метана был исключен. Однако, удлинение корабля, увеличение почти на 20 % его массы, а также вероятное изменение длины линий подачи кислорода из-за

уплощения нижней обечайки кислородного бака, привели к некоторому изменению (вероятно, повышению) частоты гидроакустических осцилляций в системе питания двигателей кислородом, и, к еще более значительному снижению частоты собственных упругих колебаний корпуса. И это, как следует из результатов восьмого полета, все-таки привело к появлению варианта «пого» с осцилляциями в потоке кислорода. То есть, не оправдавшаяся из-за отсутствия необходимых данных оценка причин взрыва корабля во втором полете, спустя более чем через год, после внесения конструктивных изменений в корабль, вернулась к разработчикам системы Starship, словно брошенный тогда бумеранг. В этом видится проявления некой высшей справедливости за их деяния годичной давности. Может быть, не зря было когда-то написано: «Мне отмщение и Аз воздам».

Не имея полноценной теории, они, вытащив хвост, увязли носом все том же болоте по самые уши. И более того, тот механизм борьбы с «пого», опиравшийся на формулу пересчета частоты гидроакустических осцилляций по режиму работы двигателей Raptor-2, который они с известным блеском, а также с шумом и взрывами продемонстрировали в первой половине 2024 года, в силу сложившихся обстоятельств перестал работать. И, надо полагать, что теперь делать с «пого», компания SpaceX не знает. Другие более сложные механизмы борьбы с «пого» потребуют значительно больших усилий и времени, а, между прочим, более года ими уже потеряно. Кроме того, не имея теории, они заранее не знают, когда им снова придется столкнуться с «пого», и будут вынуждены многократно продолжать свой путь от аварии к аварии, первый раз пройденный ими в прошлом году.

И напоследок, попытаемся ответить, почему 2 внешних двигателя продолжили работу после аварии. Они, видимо, не были серьезно повреждены при взрыве первого двигателя из-за «пого». В них развитие этого процесса тоже шло, но из-за небольших различий в условиях работы до аварии, они не успели перейти к его завершающей фазе. Различия в условиях работы могли быть следствием того, что в летном положении корабля уровень жидкого кислорода был сильно отклонен от плоскости, нормальной к его продольной оси, и значения гидростатического давления, которые также вносили вклад в уровни давления на входе в насосы двигателей, были различными. А чем выше давление на входе в насос, тем ниже перепад давления на нем, и тем выше частота гидроакустических колебаний. Разница была невелика, но ее хватило, чтобы один двигатель взорвался, а два других не успели этого сделать. А после аварии характеристики системы резко изменились вследствие выбросов жидкого кислорода и газа наддува, а также из-за появления заметных и быстро меняющихся инерционных нагрузок вследствие кувыркания корабля S34, и в таких условиях «пого» уже не мог помешать работе двигателей.

При этом следует отметить, что в седьмом полете из внешних двигателей первым должен был выйти из строя тот, у которого в жидкий кислород была погружена наименьшая часть питающего его метаном трубопровода, а в восьмом – наоборот, двигатель, у которого над заборным отверстием жидкого кислорода находился самый его толстый слой. Следовательно, это должны были быть разные двигатели. И, действительно, если, иконографика седьмого и восьмого полетов одинаково отображала расположение двигателей корабля относительно его горизонтальной плоскости, то, в соответствие с этими данными, так оно и было – в седьмом полете первым прекратил работу левый (по рис. 10) внешний двигатель (см. видео [18]), а в восьмом взорвался правый.

Выводы

1. Аварии второй ступени системы Starship – корабля Ship версии Block 2 в последних двух полетах произошли по двум различным причинам. В седьмом полете – вследствие возникновения поперечных колебаний трубопроводов новой конструкции для подачи метана к внешним двигателям с вакуумными соплами, а в восьмом – из-за возникновения продольных автоколебаний типа «пого» с гидроакустическими осцилляциями в магистралях подачи кислорода.
2. Новая конструкция метановых трубопроводов к внешним двигателям возникла из необходимости предотвратить продольные автоколебания типа «пого» с гидроакустическими осцилляциями в этих линиях.
3. Таким образом, при первой же попытке изменения конструкции системы Starship для того, чтобы она была способна вывести на низкую околоземную орбиту хотя бы минимальную полезную нагрузку, компания SpaceX полностью обесценила все свои достижения, полученные в ходе преодоления первого кризиса программы Starship, связанного с преследующими эту ракетную систему различными вариантами «пого».
4. Подобный казус возник из-за того, что прежние методы подавления «пого» на новом этапе программы стали практически неприменимыми, а также с невозможностью предсказания до полета где, когда и почему возникнет автоколебательный процесс и возникнет ли он на этот раз вообще. Слишком накладно всякий раз при изменении конструкции системы Starship практически заново начинать серию тестовых полетов для ее отработки.
5. Это и составляет основное содержание второго, и, по-видимому, пока самого глубокого кризиса программы Starship. Не имея полноценной теории «пого» вследствие стремления руководства компании скрыть сам факт особой подверженности этой ракетной системы к разным вариантам

продольных автоколебаний, компания SpaceX будет вынуждена вслепую бороться с проявлениями «пого», то тут, то там неожиданно возникающими на новых версиях системы, как подземный пожар на высохшем торфяном болоте.

Ссылки

1. Ю. И. Лобановский – Тайны программы испытаний системы Starship: Анализ основных проблем ее первого этапа. *Synerjetics Group*, 08.03.2025, 10 с. // http://www.synerjetics.ru/article/starship_problems.htm
2. SpaceX Starship. *Wikipedia* // https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceX_Starship
3. J. Roulette – SpaceX's Starship to deploy mock satellites in next test. *Reuters*, January 3, 2025 // <https://www.reuters.com/technology/space/spacexs-starship-deploy-mock-satellites-next-test-2025-01-03/>
4. Ю. И. Лобановский – Два эпизода из истории космонавтики: Сходство и различия. *Synerjetics Group*, 06.05.2024, 10 с. // http://www.synerjetics.ru/article/two_episodes.htm
5. Starship's Sixth Flight Test. *SpaceX*, November 19, 2024 // <https://www.spacex.com/launches/mission/?missionId=starship-flight-6>
6. Starship's Eighth Flight Test. *SpaceX*, March 6, 2025 // <https://www.spacex.com/launches/mission/?missionId=starship-flight-8>
7. Из первых рук: подробности аварии Starship S34. *Техасский Вестник*, 09.03.2025 // <https://t.me/starbasepost/2242>
8. Dedarkener – Starship IFT8 Acceleration Profile. *R/spacex*, March 8, 2025 // <https://www.reddit.com/r/spacex/comments/1j6kj57/comment/mgpbtny/?context=3&rdt=62211>
9. Video. *SpaceX*, March 6, 2025 // <https://www.spacex.com/launches/mission/?missionId=starship-flight-8>
10. 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
11. 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
12. Bigger is Better: Starship's Extended & Optimized Tanks. *Ringwatchers*, December 24, 2024 // <https://ringwatchers.com/article/s33-tanks>
13. Ю. И. Лобановский – Гидроакустическая теория и проблемы Нурекской ГЭС. *Гидроэнергетика Украины*, N 4, 2014 // <http://www.synerjetics.ru/article/nurek.htm>
14. Н. Н. Аршеневский, М. Ф. Губин, В. Я Карелин и др. – Гидроэлектрические станции. Москва, Энергоатомиздат, 1987, 82 с. // <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/gidroelektricheskie-stancii.html>
15. SpaceX. X, January 3, 2025 // <https://x.com/SpaceX/status/1875219215390757043>
16. New Year. New Ship. New lessons. *SpaceX*, February 24, 2025 // <https://www.spacex.com/updates/#flight-7-report>
17. OneSpeed – Re: Starship Flight 7 UPDATES : Starbase TX : 16 Jan 2025 (22:37 UTC). *NASASPACEFLIGHT*, Reply #198, January 17, 2025 // <https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?topic=61946.msg2657209#msg2657209>
18. Video. *SpaceX*, January 16, 2025 // <https://www.spacex.com/launches/mission/?missionId=starship-flight-7>
19. Starship flight test 7. *Wikipedia* // https://en.wikipedia.org/wiki/Starship_flight_test_7
20. Space Sudoer – From what I'm hearing... X, February 2, 2025 // <https://x.com/spacesudoer/status/188570775017398321>
21. Starship long-duration static fire ahead of the eighth flight test #IFT8. *YouTube*, February 11, 2025 // <https://www.youtube.com/watch?v=NRmvhof08sE>
22. Starship flight test 8. *Wikipedia* // https://en.wikipedia.org/wiki/Starship_flight_test_8
23. Replay! SpaceX Starship launches on flight 8, catches booster but loses ship again. *YouTube* // <https://www.youtube.com/watch?v=32Z1ZUxxObs>
24. Video. *SpaceX*, November 19, 2024 // <https://www.spacex.com/launches/mission/?missionId=starship-flight-6>

Выражаю благодарность В. И. Конькову за полезные обсуждения рассмотренных в работе вопросов.

Москва,
30.03.2025

Ю. И. Лобановский