

## Программа Starship: Итоги 2023 года

Ю. И. Лобановский

Время разбрасывать камни, и время собирать камни; время обнимать, и время уклоняться от объятий.  
Екклесиаст, 3:5

### Краткое содержание

В работе кратко описываются основные события 2023 года в программе Starship, оценивается общее положение дел, показывается беспрецедентная ранее важность анализа автоколебаний типа «пого» для успешности разработки этой ракетной системы, а также указывается на ошибки руководства компании SpaceX в ходе выполнения программы.

**Ключевые слова:** «пого», автоколебания, авария, Starship, частота, возбуждение, гидроакустические колебания, собственные колебания, сокрытие информации

### I. Основные технические итоги 2023 года

В течение 2023 года в ходе программы Starship было проведено 4 статических огневых теста силовой установки первой ступени системы Starship (бустера Super Heavy) в полном составе, а также 2 полета (см. [1 – 3]). Наземные тесты проводились только с первой ступенью, а оба полета произошли в полной комплектации системы из двух ступеней. Обобщенной характеристикой результатов этих испытаний автором было выбрано число отказавших в их ходе двигателей, так как именно этот показатель и связан с процессами, которые сейчас определяют успешность или не успешность проведенного испытания. Как известно, на первой ступени (Super Heavy) двигателей Raptor-2 было 33 штуки, а на второй (Ship) – 6 штук.

Эти данные представлены в таблице 1, в ней приняты следующие обозначения:

- A** – число двигателей, не включившихся на старте;
- B** – число двигателей, остановившихся во время наземного теста или в полете;
- C** – из них, возможно, выключившихся не полностью;
- Σ** – общее число двигателей, не отработавших все расчетное время по внутренним причинам.

Во втором полета (тест N 5), время работы бустера B9 разделено на 2 этапа: первый – разгон системы Starship (173 с) и второй – торможение и разворот бустера (от повторного запуска двигателей внутреннего кольца до взрыва – 27 с). При этом 3 центральных двигателя свою работу не прекращали со старта.

Вполне успешный в течение долгого времени полет второй ступени завершился неожиданным и мгновенным отключением телеметрии, так что из нее было невозможно определить причины данного инцидента. Но вполне очевидно, что это был взрыв двигателей [3]. Сколько же их взорвалось? Так как там было две группы по 3 двигателя – обычные двигатели Raptor-2 и двигатели Raptor-2 с вакуумным соплом, несколько отличающиеся также и по расположению относительно бака кислорода, то резонно предположить, что, скорее всего, взорвалось 3 двигателя из той группы, которая была менее устойчивой к взрывному процессу. Более точный вывод можно будет сделать, если будут известны точные чертежи силовой установки второй ступени.

Таблица 1

N	Дата	SH/Ship	Событие	Длительность (с)	A	B	C	Σ
1	09.02.2023	B7	Тест	~ 6	1	1	0	2
2	20.04.2023	B7	Пуск	~ 100/145	3	5	2	8
3	07.08.2023	B9	Тест	2.7	0	4	0	4
4	25.08.2023	B9	Тест	~ 6	0	2	0	2
5	18.11.2023	B9	Пуск	173/27	0/1	0/9	0/0	0/13
		S25		322	0	3?	0	3?
6	29.12.2023	B10	Тест [10]	~ 10	–	–	–	–

Во время первого полета все отключения двигателей произошли примерно к 100-й секунде полета, после 145-й секунды, когда ракета стала совершать нерасчетные маневры типа «мертвой петли», оценивать

состояние двигателей, по-видимому, стало совершенно невозможно. При этом двигатели второй ступени в первом полете не запускались. В статических огневых тестах зимы – осени за 3 – 6 секунд терялось от 1 до 4 двигателей, причем их число даже выросло с февраля по август. Отключение двигателей перед стартом, видимо, вызывалось либо последствиями предыдущих огневых тестов, в том числе и с меньшим числом двигателей, либо случайными причинами.

Во втором полете все двигатели первой ступени отработали на разгонном участке траектории без каких-либо проблем, исключая один нюанс, о котором далее будет упомянуто отдельно. То же самое можно сказать и о работе двигателей второй ступени, за исключением самого конечного участка ее разгонной траектории. В качестве резюме, на основе анализа, представленного в работе [3], можно сказать, что в этом полете абсолютно все 39 двигателей системы Starship показали вполне надежную работу в тех условиях, на которые они были рассчитаны, что, безусловно, является большим достижением компании SpaceX. Проблемы с двигателями начинались только тогда, когда они попадали в условия, не предвиденные их разработчиками, и в которых ни один ракетный двигатель нормально работать не способен. Эти условия в ходе полета возникали 3 раза, и в первом случае Starship «проскочил» опасный режим вследствие его краткости, а 2 следующих завершились двумя взрывами успешно разделившихся перед этим ступеней. Анализ показал, что причиной аварии в первом полете, а также всех трех опасных режимов во втором – возникновение колебаний типа «пого», но разбор всех нюансов этих процессов, с которым можно познакомиться в статьях [1, 3], не входит в круг задач данной работы. Здесь лишь кратко названы общие причины, и описана деятельность компании SpaceX по их выявлению и устранению.

В самом конце 2023 года был проведен четвертый статический тест. Впервые о числе отказавших на этом тесте двигателей не сообщается. Поэтому в таблице 1 в последней строке – только прочерки. И, судя по всему, политика компании SpaceX в области гласности с середины декабря 2023 года резко изменилась. Впрочем, почему это произошло, автор, возможно, напишет в отдельной работе.

## **II. Общее положение дел в программе Starship, сложившееся к исходу 2023 года**

Кратко описать положение дел в программе Starship, сложившееся к исходу 2023 года, как нам представляется, можно следующим образом:

1. Важнейшим препятствием на пути к успеху первого испытательного полета Starship (IFT-1) и, в то же время, его важнейшим результатом, стал автоколебательный процесс типа «пого» при разгоне системы в виде сборки из двух ступеней. Гидроакустические возмущения в линиях подачи метана к двигателям первой ступени и собственные упругие колебания корпуса ракеты вызвали «пого-процесс», борьба «умной» системы управления Starship с которым привела к низкочастотным колебаниям этой системы с так называемыми суперспайками, повторяющимися через каждые 12 секунд. В конечном итоге это привело к крушению Starship во время его первого полета.
2. Компания SpaceX осознала это не позднее начала июня и в течение июня-августа приняла меры по предотвращению возникновения описанного выше процесса, создав и интегрировав в Starship так называемый межступенчатый отсек горячего разделения (FHSI). Этот отсек, благодаря своей жесткости, значительно превышающей жесткость обеих ступеней Starship, разделил единый колебательный контур сборки на 2 части, заметно изменив собственные частоты системы, устранил положительную обратную связь между двумя типами колебаний и, таким образом, не позволил этому «пого-процессу» возникнуть снова. В то же время отсек FHSI позволил осуществить горячее разделение ступеней и, в принципе, увеличить полезную нагрузку системы за счет снижения гравитационных потерь.
3. По неясным причинам компания SpaceX решила скрыть появление «пого» в системе Starship во время первого полета IFT-1, а меры по подавлению «пого» представила исключительно как действия, направленные на увеличение полезной нагрузки. Однако, таким образом «пого» был устранен.
4. Тем не менее, неожиданно, во втором испытательном полете IFT-2 возникли сразу три «пого-процесса» вместо одного. И устранить их прежним способом уже не представлялось возможным. Несмотря на несомненный успех IFT-2 по сравнению с IFT-1, уже на старте, когда двигатели выходили на номинальный режим работы, возникали колебания «пого» с появлением гидроакустических осцилляций в линиях подачи кислорода первой ступени. Из-за быстрого прохождения этого опасного режима процесс не успел проявиться в полной мере и самопроизвольно затух.
5. Следующий случай автоколебаний произошел на первой ступени (бустере B9) при возвратном маневре торможения (бустбэке). Этот случай оказался довольно трудным для анализа. Однако можно отметить, что его главные особенности, например, такие, как выключение двигателей перед взрывом поочередно

в 2 этапа со значительным перерывом между ними, то, что первые 3 двигателя выключались сначала с одной стороны ступени, а остальные 9 – после с другой стороны, были целиком получены путем решения уравнений с использованием весьма неточных количественных данных о конструкции ступени. Это свидетельствует о том, что качественная структура явления весьма устойчива и может быть выявлена даже при наличии такой совершенно недостаточной количественной информации. Здесь также сыграли свою роль кратность вибраций корпуса с гидроакустическими возмущениями в линиях подачи кислорода.

6. Объяснение возникновения «пого-процесса», приведшего к взрыву второй ступени незадолго до завершения ее разгона, предельно простое – положительная обратная связь между гидроакустическими возмущениями в линиях подачи кислорода к двигателям при их дросселировании и собственными колебаниями корпуса второй ступени с кратностью 2.
7. Для отдельных ступеней ракеты никакое введение дополнительных отсеков не поможет. Теперь необходимо подавить гидроакустические колебания в питающих магистралях двигателей.
8. Можно отметить, что SpaceX продолжает скрывать информацию о проявлениях «пого» в системе Starship и, скорее всего, решила провести работы по подавлению опасных гидроакустических возмущений в топливных магистралях системы под видом подготовки к эксперименту по перекачке топлива в невесомости (если они вообще имеют сейчас какое-либо определенное мнение о причинах взрывов при IFT-2). Любой подобный предлог задержит третий полет, как рассчитывает SpaceX, на время, достаточное для осуществления необходимых работ. Однако из-за того, что подобные процессы никогда ранее не могли быть посчитаны, проведение мероприятий по их подавлению всегда занимало очень много времени.
9. Кроме того, подавление только экспериментально обнаруженных «пого» не гарантирует, что на новых этапах полета не возникнут новые их варианты, не проверенные в предыдущих летных экспериментах. Более того, любая модернизация системы Starship, например, увеличение ее длины, массы, уменьшение толщины стенок или увеличение тяги двигателя за счет повышения давления в камере сгорания, приведет к тому, что летные испытания системы необходимо будет начинать по существу, еще раз с самого начала.
10. Таким образом, использование предложенного в работе [1] численного метода расчета гидроакустических осцилляций в системах питания жидкостных ракетных двигателей с большими перепадами давления для выявления «пого-процессов» является одним из необходимых условий как для быстрого и успешного завершения программы испытаний Starship, так и для оценки других вариантов этой ракетной системы.

В итоге, наряду, видимо с главным достижением 2023 – созданием и отработкой в составе силовой установки системы Starship надежных жидкостных ракетных двигателей Raptor-2 с чрезвычайно высокими характеристиками, а также почти полной отработкой ее разгона, на пути ее развития возникли ранее не предвиденные препятствия в виде возникновения автоколебаний типа «пого», приводящих к взрывам двигателей, оказывающихся в условиях, в которых ракетные двигатели не могут работать в принципе. Первый такой процесс, обнаруженный в первом полете, был подавлен, однако, взамен его во втором полете снова возникло уже 3 непредвиденных процесса такого же типа, причем для их подавления не может быть использовано то, что было сделано для предотвращения самого первого процесса «пого». И сколько таких процессов может возникнуть при отработке еще не опробованных этапов полной программы полета системы Starship, а также при ее модернизации, сейчас никому не известно. Поэтому, представляется, что наиболее необходимым инструментом для успешного развития этой ракетной системы сейчас должно быть то, что способно предсказывать и оценивать эти «пого-процессы» в настоящем и будущем.

### **III. Почему анализ процессов «пого» настолько важен именно для системы Starship?**

Автоколебания типа «пого» и раньше создавали большие трудности для разработчиков различных ракетных систем. Более того, имеется вполне обоснованное мнение, что именно процесс «пого» при четвертом пуске не только прервал вначале развивавшийся практически без проблем полет советской лунной ракеты Н1, но и привел к закрытию программы ее разработки [4]. Тем не менее, вероятно, никогда доселе влияние «пого» ни на одну ракетную систему никогда ранее не могло быть так велико, как сейчас на Starship.

Это связано со следующими обстоятельствами: «пого» возникает, когда частота собственных упругих колебаний корпуса ракеты (или ее ступени) близка или почти кратна частоте гидроакустических осцилляций в ее топливной системе. Корпус у ракеты один, и его собственная частота более-менее определена. Она,

конечно, меняется после разделения ступеней, но и тогда у них оказываются достаточно определенные частоты собственных колебаний.

А со стороны гидроакустики за «пого» играет целый оркестр. Во-первых, в ракетах с ЖРД всегда имеется 2 потенциальных гидроакустических колебательных контура – горючего и окислителя. Во-вторых, в ракетах с большим числом двигателей, таких как Starship, для разных групп двигателей может быть несколько различающихся длин у различных конфигураций топливных магистралей, а, значит, может появиться несколько колебательных контуров с немного разными частотами. В-третьих, из-за многократности системы Starship возникло требование создать ракетные двигатели Raptor-2/3 с высочайшими характеристиками. У них рекордные давления в камере сгорания, а, значит, и рекордные перепады давления на насосе. Кроме того, у их также необычайно широкий диапазон рабочих тяг, и, соответственно, давлений. А как показывает созданная в мае этого года после IFT-1 теория, при высоких перепадах давления на насосе частота гидроакустических колебаний приблизительно обратно пропорциональна квадратному корню из него. Таким образом, при сильном варьировании тяги двигателя значительно изменяется и частота гидроакустических колебаний. В-четвертых, «пого» может возникнуть не только при резонансе гидроакустической и «упругой» частот, но и при их кратности, что еще в минимум в 3 раза увеличивает число возможных опасных колебательных режимов. В-пятых, многократные ступени должны работать без «пого» и при их индивидуальном возвращении, когда частоты собственных упругих колебаний становятся совершенно иными, чем при разгоне ракетных ступеней в составе сборки.

Таким образом, за «пого» играет не просто оркестр, в нем из-за многократности системы Starship вырастают настоящие виртуозы с очень широким спектром своей игры. И чем совершеннее ракетная система, чем выше оказываются характеристики ее двигателей, чем больше требований предъявляется к системе для того, чтобы она была многократной, тем более виртуозной становится их игра. И противостоять им всем, используя инструмент, способный лишь однократно изменить собственную частоту упругих колебаний, как это было сделано введением отсека горячего разделения (FHSI), становится невозможно. По сути, это и продемонстрировал эксперимент IFT-2. Требуется изменять гидроакустические частоты. В принципе, известно, как это делать (см. [4, 5]). Но при этом нужно иметь их значения, а до сих пор это получалось только экспериментально, что чрезвычайно осложняло подобные работы. Расчетный метод может резко упростить эту деятельность, многократно снижая временные и прочие затраты.

#### **IV. Время собирать камни**

Попробуем теперь оценить, что можно ожидать от компании SpaceX по программе Starship в ближайшей перспективе. Конечно, внешнему наблюдателю мало что известно о том, что сейчас там происходит. Однако, кое-что наружу не может не просачиваться, и дело аналитика связать казалось бы разнородные и противоречивые сигналы. Тем более что первый цикл: полет IFT-1 – реакция компании SpaceX на него, длившийся более полугода, сейчас полностью завершился, и может использоваться в качестве стандарта для оценки поведения компании в ближайшем будущем.

Этот цикл проходил по модели А. Тойнби [6] в режиме: вызов – ответ. Прямая угроза, выявленная в IFT-1, была осознана в должной мере и устранена введением дополнительного элемента в систему Starship. При этом угроза была скрыта от внешнего мира, а также, что весьма вероятно, и от государственного регулирующего и лицензирующего органа – FAA. Кроме того, как показал результат IFT-2, анализ и действия завершились на первом ходу игры с природой – на ее ход в виде «пого» сборки в IFT-1 ответный ход устранил прямую угрозу, но не было сделано ничего, чтобы рассмотреть варианты возможных ответов противоположной стороны на свой ход.

И они не заставили себя ждать. Появилось сразу 3 новые угрозы того же типа. В связи с этим, самое первое заявление И. Маска о том, что к третьему полету (IFT-3) Starship будет готов «через три-четыре недели» после IFT-2 [7], вскоре было вытеснено сообщениями о том, что во время IFT-3 будет проведен эксперимент по переливу компонент топлива в невесомости [8] (если, конечно, Ship в этот раз долетит до орбиты), что отодвигает проведение IFT-3, «определенно, на первую четверть 2024 года» [9] – все снова становится весьма похоже на то, что говорилось и делалось в период времени между IFT-1 и IFT-2, который из «шести-восьми недель» [10] постепенно растянулся до тридцати.

Интересно также отметить, что вновь назначенная в мае этого года (вскоре после IFT-1) на должность руководителя Starbase Кэти Людерс даже спустя 3 недели после IFT-2 (12 декабря) заявляла, что «группа по расследованию аномалий Starship все еще выясняет, почему были активированы автоматизированные системы завершения полета 18 ноября» [9], при том, что непредвзятому аналитику к тому времени было уже совершенно ясно, что поиск причины активации этих систем подобен поиску в темной комнате черной кошки, которой к тому же там нет. Так что при подобном ходе дел в программе Starship до перелива в невесомости дойдет еще не скоро, если дойдет вообще.

Этому способствует и заметание мусора под ковер. Вероятно, сначала это было связано с тем, что по контракту компании SpaceX с NASA уже к концу 2024 года должно было быть продемонстрирована способность лунной версии системы Starship совершить посадку на Луну [11], что невозможно без перелива топлива на орбите. Несмотря на то, что эта дата недавно уже официально была передвинута на более поздний срок [12], непредвиденные проблемы, выявляемые в ходе испытаний, и ставящие под сомнение даже и сдвинутые сроки, вызывают напряжение у руководства компании, что не способствует фундаментальному разрешению проблем, а порождает новые, а также попытки скрыть их от всех. Причем последнее, в отличие от первого, кажется, до сих пор весьма неплохо удавалось. Но, как сказано в писании, всему приходит конец: «Всему свое время... разбрасывать камни, и время собирать камни».

### Выводы

1. В ходе первого проведенного тестового полета системы Starship при ее разгоне в виде сборки из двух ступеней был выявлен автоколебательный процесс типа «пого», который привел к разрушению ракетной системы. С помощью введения межступенчатого отсека горячего разделения (FHSI) в следующем полете эти колебания были подавлены.
2. Однако, во втором тестовом полете это не помешало возникнуть трем новым видам аналогичных колебаний, вызвавших взрывы обеих ступеней системы уже после их успешного разделения.
3. Судя по заявлениям руководства компании SpaceX ему даже спустя почти месяц после второго полета, были неизвестны причины этих инцидентов, хотя по некоторым данным в период с 11 по 16 декабря 2023 года информацию об этом оно должно было получить.
4. При этом политикой компании, насколько об этом можно судить извне, до сих пор являлось скрытие от внешнего мира всей информации, которую можно было скрыть, попытки сделать вид, что все процессы в программе Starship находятся под их полным контролем, а также нежелание знакомиться с иными подходами в оценке происходящего.
5. Достаточно очевидно, что подобные действия руководства компании не способствуют успешному развитию этой программы.

### Литература

1. Ю. И. Лобановский – Причина аварии системы Starship в первом полете. *Synerjetics Group*, 05.10.2023, 20 с. // [https://www.synerjetics.ru/article/starship\\_crash.pdf](https://www.synerjetics.ru/article/starship_crash.pdf)
2. Ю. И. Лобановский – Причина отказов двигателей Super Heavy во время статических тестов. *Synerjetics Group*, 05/18.11.2023, 6 с. // [http://www.synerjetics.ru/article/ground\\_tests.pdf](http://www.synerjetics.ru/article/ground_tests.pdf)
3. Ю. И. Лобановский – Причины аварий обеих ступеней системы Starship во втором полете. *Synerjetics Group*, 04.12.2023, 10 с. // [http://www.synerjetics.ru/article/second\\_flight.pdf](http://www.synerjetics.ru/article/second_flight.pdf)
4. 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>
5. С. Е. 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>
6. А. Дж. Тойнби – Исследование истории: Возникновение, рост и распад цивилизаций. Москва, АСТ, 2009, 670 с.
7. M. Wall – SpaceX's epic Starship liftoff didn't damage launch pad, Elon Musk says. *Space.com*, 21 November 2023 // <https://www.space.com/spacex-starship-launch-pad-good-condition>
8. S. Clark – NASA says SpaceX's next Starship flight could test refueling tech. *ArsTechnica*, 06 December 2023 // <https://arstechnica.com/space/2023/12/nasa-wants-to-see-gas-stations-in-space-but-so-far-its-tanks-are-empty/2/>
9. 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/>
10. M. Wall – SpaceX should be ready to launch Starship again in 6 to 8 weeks, Elon Musk says. *Space.com*, 02 May 2023 // <https://www.space.com/spacex-ready-launch-starship-six-eight-weeks-musk>
11. E. Berger – NASA awards lunar lander contracts to Blue Origin, Dynetics – and Starship. *ArsTechnica*, 30 April 2020 // <https://arstechnica.com/science/2020/04/nasa-awards-lunar-lander-contracts-to-blue-origin-dynetics-and-starship/>
12. J. Foust – NASA concerned Starship problems will delay Artemis 3. *SpaceNews*, 08 June 2023 // <https://spacenews.com/nasa-concerned-starship-problems-will-delay-artemis-3/>