

Старшип 2 впервые потерпел аварию из-за взрыва ракетного двигателя



Дата 6 марта 2025 года оказалась богатой на космические события, но скорее со знаком минус. Про не получившуюся высадку американского зонда IM-2 возле Южного полюса Луны мы подготовили отдельный обзор, а сейчас проанализируем неудачу восьмого испытательного полета американской сверхтяжелой ракеты Super Heavy / Starship.

Восьмой полет Super Heavy и второй полет Starship Block 2

Восьмой испытательный полет Super Heavy / Starship стал вторым испытанием новой версии космолета Starship Block 2, про которую мы подробно рассказали в нашем недавнем отчете про седьмой испытательный полет. Испытание IFT-8 (Integrated Flight Test 8) должно было решить задачу прерванного седьмого полета - вывести Старшип 2 на суборбитальную траекторию и провести в полете отделение макетов спутников Старлинк 3. Но вместо этого полет высветил новые проблемы американского космолета.

Сверхтяжелый ускоритель Super Heavy B15 по-прежнему относится к первому поколению Block 1. Это значит, что он не обеспечивает достаточную тягу для выполнения всех задач по выведению большой полезной нагрузки - но на данном этапе испытаний Старшипа это и не требовалось. В грузовом отсеке Starship S34 разместили всего 4 макета Starlink v3 третьего поколения, каждый весом около 1900 кг и их не надо было выводить на замкнутую околоземную орбиту, а всего лишь "прокатить" до Индийского океана с испытанием механизма развертывания.

В предыдущем полете, для сравнения, в грузовом отсеке находились 10 макетов спутников Starlink v3. Но, поскольку космический "грузовик" в том полете сломался, для его повторного испытания число макетов уменьшили.

Почти 20 тонн груза в седьмом полете - это была достаточно большая дополнительная нагрузка на предельную облегченную конструкцию многоразовой ракеты, которая до этого летала вообще порожняком. Как заключили в компании SpaceX "гармонический отклик в полете, в несколько

раз более сильный, чем наблюдался во время наземных испытаний", мог стать причиной разрушения топливопроводов Старшипа во время седьмого полета.

Напомним, что по своим целевым характеристикам Старшип 2 должен поднять на околоземную орбиту 100 тонн полезной нагрузки (ПН), после чего его собираются заменить вдвое более грузоподъемным Старшипом 3.

Испытательный полет Суперхэви / Старшип 6 марта 2025 года

6 марта 2025 года сверхтяжелая ракета Super Heavy B15 / Starship S34 была заправлена жидким метаном и жидким кислородом. Вечером в 17:39 по местному времени EST (GMT-6) она стартовала с космодрома Starbase в Техасе.

Все 33 ракетных двигателя (РД) первой ступени отработали штатно. Через 2 мин 40 секунд после старта прошло горячее разделение ступеней, Суперхэви развернулась и направилась к своей стартовой площадке на одиннадцати РД Раптор 2 из тринадцати для этого предусмотренных. Два двигателя второго кольца не включились. При заключительном торможении заработали двенадцать двигателей, кроме одного. Скорость была погашена и сверхтяжелая ракетная ступень вошла на трех центральных двигателях в захваты "Мехазиллы" (Mehazilla). Три удачных захвата Суперхэви в трех попытках - такой результат еще недавно казался невероятным!

По программе Rapid Reuse (быстрое повторное использование) сверхтяжелый ускоритель должен стартовать каждые несколько часов, разгоняя космолеты Старшип до скорости около 1.5 км/сек и отправляя их в полет до орбиты. Но эту методику пока еще только предстоит осуществить, а пока для каждого полета ракетные ступени Суперхэви / Старшип производятся заново.



Возможный прогар сопла вакуумного РД Starship S34

Пока мы наблюдали за успешным возвращением Суперхэви, космолет Старшип 2 боролся за выход на траекторию полета в Индийский океан. Поначалу все шло исправно, но на исходе седьмой минуты полета появились первые признаки прогара сопла одного из трех вакуумных РД Раптор 2. На отсчете 8 минут 4 секунды проблемный двигатель взорвался, повредив центральные Рапторы 2 - все три. Произошло это всего за 40 секунд до планового отключения двигательной установки, еще меньше времени оставалось до завершения работы вакуумных двигателей, которые отключаются раньше, чем центральные.

В результате произошедшей аварии в работе остались два вакуумных РД Раптор 2, жестко закрепленных на внешнем кольце без возможности управления вектором тяги - поэтому космолет ушел в закрутку на высоте 146 км и скорости 20 тыс. 332 км/с. Через некоторое время Старшип развалился на обломки, которые были видны над Флоридой и Багамскими островами. Так драматически, на последней минуте выведения, завершился восьмой испытательный полет Super Heavy / Starship.



Обломки Starship S34

Обломки космолета создали угрозу для воздушного движения в регионе, поэтому FAA (Federal Aviation Administration - Федеральное управление гражданской авиации) временно запретило полеты в близлежащих аэропортах. Причины двух космических аварий подряд, произошедших в регионе с интенсивным воздушным движением, будут расследованы.

Об эффективности системы аварийной защиты РД Раптор

Наблюдаемая причина аварии Starship S34 - взрыв РД внешнего кольца с повреждением трех центральных РД. Это серьезный отказ, который должен вовремя компенсироваться с помощью САЗ - системы аварийной защиты РД (но этого не произошло).

Как было объявлено по результатам расследования, исходная причина аварии - та же что и в седьмом полете, гармонические колебания в разводке топливных магистралей для вакуумных двигателей Raptor, которые усиливаются при пустых баках. Из-за этих колебаний произошли утечки топлива, разрыв ТНА (турбонасосного агрегата) и сопла двигателя Raptor Vacuum, который был выброшен из двигательного отсека.

В Старшине 2 топливная система была модернизирована для увеличенного объема баков, в ней появились три отдельных топливопровода горючего для вакуумных двигателей. Срочные меры по исправлению конструктивной ошибки, предпринятые после седьмого полета, оказались недостаточными или даже усугубили ситуацию с колебаниями, сейчас потребуется более глубокая переработка топливной системы космолета.

После восьмого полета мы можем предварительно оценить вероятность аварии РД Раптор. Всего за семь полетов Super Heavy / Starship с второго по восьмой прошли 273 отработки Raptor 2 с одной аварией. При оценочной вероятности безотказной работы ВБР РД 0.99 это дает коэффициент охвата САЗ (отношение числа своевременных отключений РД к общему числу аварийных ситуаций) $KoCAЗ = 0.63$. Эта оценка соответствует картине, которую мы наблюдали в седьмом полете, где происходили АД (аварийные выключения двигателей) без их взрыва, видимо, в результате работы САЗ. АД пяти РД из шести привели к потере управляемости космолета. В восьмом полете РД взорвался раньше, чем был отключен.

Арифметика надежности Super Heavy / Starship

Почему авария РД произошла именно на этапе полета второй ступени Starship, хотя число РД на ней в 5.5 раз меньше, чем на первой ступени Super Heavy - 6 против 33? Это можно объяснить тем, что время работы второй ступени - примерно 360 секунд в 2.25 раза больше времени работы первой ступени - 160 секунд. Поэтому, несмотря на меньшее число ракетных двигателей, вероятность аварии РД на первой и второй ступени вполне сопоставима.

В восьмом полете проблема возникла в топливной системе и развилась в системе регенеративного охлаждения сопла вакуумных Рапторов, которые устанавливаются только на Старшине, в то время как все остальные РД гигантской ракеты снабжаются менее габаритными земными соплами. Этот момент был пропущен в работе САЗ, которая должна была выключить аварийный двигатель прежде, чем развитие процесса повредило соседние РД.

Понятно, что аварийное разрушение РД по различным причинам может произойти и на этапе работы первой ступени, и в этом случае обе ступени будут потеряны. Вероятность неблагоприятного развития события на этапе выведения с потерей одной или обеих ступеней Суперхэви / Старшип может быть грубо оценена как:

$$1 - (272 / 273)^{39} = 0.133$$

Т.е. каждый 7-8 полет нынешнего Старшипа может сопровождаться потерей корабля на этапе выведения, что недопустимо для любой РН, тем более - для многоразового космолета с ресурсом до сотни полетов.

Полная многоразовость всех ступеней - это не только техническая фишка, но и экономическая необходимость Старшипа. Без нее, только с многоразовой первой ступени новая ракета становится сверхтяжелым

подобием Фалкона-9 и вступает в конкуренцию с его многочисленными последователями, такими как "Алая птица" и New Glenn.

Скоро на прибыльной полянке частично многоразовых ракет станет тесно - и в SpaceX делают ставку на полную многоразовость, чтобы быть впереди. Но полная многоразовость требует также и достижения полной надежности.

Понятно, что реальная эксплуатация Суперхэви / Старшип будет проходить с РД Раптор 3 следующего поколения, у которого будет своя, ожидаемо лучшая статистика. Но в условиях, когда безаварийность Старшипа надо поднимать не менее, чем на порядок, требуется проработка различных конструктивных решений, а не только упование на мощь и безотказность РД следующего поколения.

Как SpaceX будет поднимать надежность Старшипа?

Безаварийная работа РД, обеспечиваемая работой САЗ, исключительно важна для ракет с многодвигательной установкой. Существует несколько путей увеличения эффективности САЗ, и здесь мы обсудим один из них, который представляется нам наиболее вероятным в будущем.

При проектировании САЗ разработчики делают выбор между эффективностью ее работы, т.е. коэффициентом охвата КоСАЗ и вероятностью ложного отключения работоспособного РД. Обратим внимание на то, насколько часто первая ступень Суперхэви тормозит не всеми 13-ю РД повторного включения, а меньшим их числом - 11 или 12. Это происходит благодаря предусмотренной разработчиками избыточности числа РД. Соответственно, работа САЗ может быть настроена на отключение РД при малейших отклонениях в рабочих процессах.

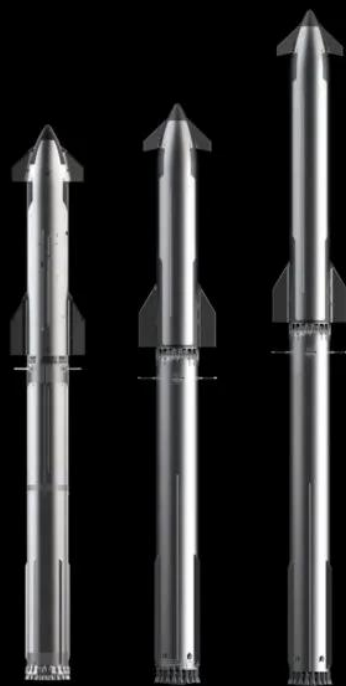
В случае Старшипа 2 ситуация выглядит несколько иначе. 52% его максимальной тяги создают три вакуумных РД внешнего кольца и 48% - три центральных РД. Отключение любого вакуумного РД приводит не только к потере 1/6 тяги, но и к перекосу тяги, который компенсируется отклонением вектора тяга центральных РД - при этом снижается интегральный УИ (удельный импульс) тяги и запас энергетика корабля. В зависимости от момента отключения РД, это приведет к невыходу на орбиту, потере ПН и самого корабля из-за недолета до базы. Поэтому возможности для эффективной настройки САЗ РД Старшипа 2 ограничены и устранение выявленных недостатков конструкции космолета может не привести к достижению желаемой безаварийности полетов.

Лучшие условия будут наблюдаться в следующей итерации корабля - Старшипе 3, который несет вдвое большее число вакуумных РД. При наличии шести вакуумных РД внешнего кольца можно отключить аварийный РД и симметризовать тягу путем отключения симметрично расположенного РД, как это было предусмотрено в советской лунной ракете Н-1. А также улучшаются условия для стабилизации ступени разнотягом вакуумных РД, а не только отклонением центральных РД, которые тоже могут оказаться аварийными. Наконец, увеличение тяговооруженности ракетной ступени позволяет выбрать менее напряженный режим работы РД с уменьшением тяги по мере расходования топлива.

PERFORMANCE

FULLY REUSABLE

	FLIGHT 3	STARSHIP 2	STARSHIP 3
PAYLOAD TO ORBIT (t)	N/A	100+	200+
BOOSTER PROP LOAD (t)	3300	3650	4050
SHIP PROP LOAD (t)	1200	1500	2300
BOOSTER LIFTOFF THRUST (tf)	7130	8240	10000
SHIP INITIAL THRUST (tf)	1250	1600	2700
SHIP SL ENGINES	3	3	3
SHIP VAC ENGINES	3	3	6
BOOSTER HEIGHT (m)	71	72.3	80.2
SHIP HEIGHT (m)	50.3	52.1	69.8
TOTAL HEIGHT (m)	121.3	124.4	150



Планы разработки Super Heavy / Starship

Поэтому можно ожидать ускорения работ по Старшипу 3, возможно, появления его промежуточной версии с увеличенным числом РД и ограниченным запасом топлива. Космолет будет развиваться и модернизироваться, а его нынешняя версия Старшип 2 фактически является экспериментальной, предназначенной для отработки различных конструктивных решений - что мы и наблюдаем во всех происходящих его полетах.