

История гибели Челленджера

Николай Товеровский, 4 мая 2009

Гибель челнока

28 января 1986 на 73-й секунде полета космический челнок «Челленджер» взорвался в воздухе на высоте 14 километров.

После взрыва кабину с экипажем оторвало от остального корабля, и семеро космонавтов возможно всё еще оставались живы до тех пор, пока не упали в океан на скорости 334 км/ч, испытав при этом перегрузку в 200 G.



Эта история рассказана Эдвардом Тафти в книге VISUAL EXPLANATION (*The Decision to Launch the Space Shuttle Challenger*, с. 39).

www.edwardtufte.com

Материалы взяты из отчёта «Президентской комиссии по происшествию с космическим челноком „Челленджер“»,

<http://history.nasa.gov/rogersrep/genindex.htm>

Причина случившегося была обнаружена быстро. Проблема была в уплотнительных кольцах одного из твердотопливных ускорителей шаттла.



Шаттл состоит из орбитера, в котором находится экипаж, большого наливного бака, с топливом для орбитера, и двух твердотопливных ускорителей. Ускорители состоят из от-

дельных частей, а для уплотнения используются резиновые кольца 12 м в окружности. В одном из таких соединений и произошла утечка, и раскаленные газы прожгли наливной бак.

Температура окружающей среды в момент запуска была около 2 °С. Из-за столь низкой температуры уплотнительные кольца потеряли эластичность и не смогли обеспечить достаточного уплотнения.

Иллюстрация (↑) сделана Вейлином Ву и Эдвардом Тафти, перевод — Николай Товеровский.

Уже через 1 (одну) секунду после запуска двигателей на правом ускорителе появился серый дым, означающий, что уплотнительные кольца прогорели и шаттл обречён.

Причина гибели

По прогнозам температура на день старта должна была быть от -3 до -1 °C. Понимая, что кольца перестанут выполнять свою функцию, инженеры фирмы Тайкокол (фирмы, которая выпускает ускорители) попытались предотвратить запуск. За день до старта они отправили свои опасения в НАСА по факсу. Как сказал один из чиновников в НАСА — он был «потрясён» предложением отложить запуск и предложил фирме Мортон Тайкокол пересмотреть своё решение, не смотря на то, что отложить полет фирма порекомендовала впервые за 12 лет. Другие официальные лица в НАСА нашли существенные недостатки в присланных материалах и заявили, что связь температуры с проблемами с уплотнительными кольцами неубедительна. Получив ответ из НАСА, инженеры Тайкокола передумали и дали согласие на запуск шаттла.

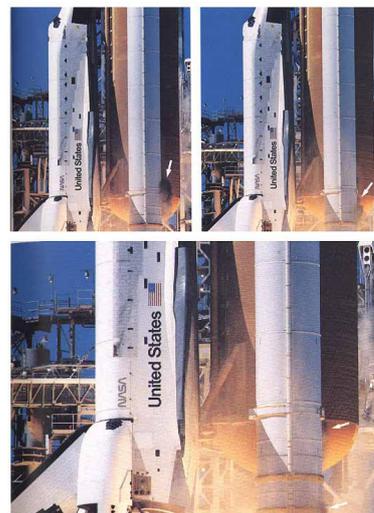
Таким образом, конкретная причина катастрофы обсуждалась за день до запуска. Несколько часов инженеры Тайкокола и НАСА пытались ответить на вопрос — будет ли обеспечено достаточное уплотнение при такой низкой температуре или нет. К полуночи они пришли к выводу — уплотнение будет обеспечено, а утром Челленджер взорвался.

Причина принятия неверного решения проста: инженерам Тайкокола не удалось ясно показать, что повреждения уплотнительных колец, которые наблюдались ранее, связаны с низкой температурой и что запуск Челленджера в тот день — большой риск. Те материалы, что были посланы в НАСА, просто не смогли это доказать.

Для того чтобы понять почему доводы инженеров Тайкокола показались неубедительными достаточно взглянуть на них.

На титульной странице (фрагмент справа), как и на всех остальных материалах, не указана фамилия автора, что само по себе уже вызывает недоверие. Отчеты, презентации, доклады не делаются фирмами и организациями, их всегда подготавливают вполне конкретные люди. Указание авторства означает ответственность как перед теми людьми, которым непосредственно адресовано сообщение, так и перед теми, кто будет изучать материалы в будущем. Кроме того, зная фамилию автора, читатели могут вспомнить что они знают об авторе и насколько ему можно доверять.

Следом за титульной страницей идёт таблица «Истории эрозии уплотнительных колец» (справа вверху), где содержится конкретная информация о том, какая опасность может угрожать Челленджеру, но не показывается причина этой опасности — температура¹. В таблице использованы 6 (шесть) параметров, характеризующий повреждение уплотнительных колец (эрозия, наличие сажи, глубина, место, протяжённость, внешний вид). Такой способ подачи не даёт возможности быстро понять общий уровень повреждения. Гораздо лучше было бы использовать для этого один индекс. В таблице, кстати, нет информации о состоянии колец миссии STS 61-C, которая состоялась 12 января, а тот факт, что таблица напечатана, а не написана от руки (как остальные), говорит о том, что она была подготовлена до обсуждения по проблеме с Челленджером.



0,678 секунд после старта. Камера Ебо зафиксировала появление дыма на правом ускорителе.



Шлейф от двигателей и облако от взрыва.

TEMPERATURE CONCERN ON
SRM JOINTS
27 JAN 1986

Аббревиатура SRM означает Solid Rocket Motor (твердотопливный ракетный двигатель).

¹ В действительности, в материалах, отправленных фирмой Тайкокол, нет ни одного места, где бы температура (причина) находилась рядом с уровнем повреждения уплотнительных колец (следствием).

HISTORY OF O-RING DAMAGE ON SRM FIELD JOINTS

SRM No.	Cross Sectional View			Top View		Clocking Location (deg)
	Erosion Depth (in.)	Perimeter Affected (deg)	Nominal Dia. (in.)	Length Of Max Erosion (in.)	Total Heat Affected Length (in.)	
61A LH Center Field**	22A	None	None	None	None	36° -- 66°
61A LH CENTER FIELD**	22A	NONE	NONE	NONE	NONE	338° - 18°
51C LH Forward Field**	15A	0.010	154.0	4.25	5.25	163
51C RH Center Field (prim)***	15B	0.038	130.0	12.50	58.75	354
51C RH Center Field (sec)***	15B	None	45.0	None	29.50	354
41D RH Forward Field	13B	0.028	110.0	3.00	None	275
41C LH Aft Field*	11A	None	None	None	None	--
41B LH Forward Field	10A	0.040	217.0	3.00	14.50	351
STS-2 RH Aft Field	2B	0.053	116.0	--	--	90

*Hot gas path detected in putty. Indication of heat on O-ring, but no damage.
 **Soot behind primary O-ring.
 ***Soot behind primary O-ring, heat affected secondary O-ring.

Clocking location of leak check port - 0 deg.

OTHER SRM-15 FIELD JOINTS HAD NO BLOWHOLES IN PUTTY AND NO SOOT NEAR OR BEYOND THE PRIMARY O-RING.

SRM-22 FORWARD FIELD JOINT HAD PUTTY PATH TO PRIMARY O-RING, BUT NO O-RING EROSION AND NO SOOT BLOWBY. OTHER SRM-22 FIELD JOINTS HAD NO BLOWHOLES IN PUTTY.

Далее инженеры представили историю утечек газов для srm-15 и srm-22 (слева) хотя эта информация уже была в первой таблице, причем последняя строка сообщает о прорыве сопла, что вообще не связано с запуском Челенджера в холодную погоду. Кроме того, только SRM-15 из этого списка был запущен в относительно холодную погоду (11 °C).

BLOW BY HISTORY

SRM-15 WORST BLOW-BY
 o 2 CASE JOINTS (80°), (110°) ARC
 o MUCH WORSE VISUALLY THAN SRM-22

SRM 22 BLOW-BY

o 2 CASE JOINTS (30-40°)

SRM-13A, 15, 16A, 18, 23A 24A

o NOZZLE BLOW-BY

HISTORY OF O-RING TEMPERATURES (DEGREES-C)

MOTOR	MBT	AMB	O-RING	WIND
DM-1	68	36	8,3	10 MPH
DM-2	76	45	11,1	10 MPH
QM-3	72.5	40	8,8	10 MPH
QM-4	76	48	10,6	10 MPH
SRM-15	52	64	11,6	10 MPH
SRM-22	77	78	23	10 MPH
SRM-25	55	26	-1,7 -2,8	10 MPH 25 MPH

А дальше появляется таблица с историей температуры колец (справа). Тут опять упоминаются те же ракеты SRM-15 и SRM-22 (SRM-25 — это Челленджер).

Совместив левую таблицу с правой, специалисты НАСА нашли серьёзный аргумент в пользу запуска. Хотя при запуске SRM-15 утечка действительно произошла в холодную погоду, пуск SRM-22 состоялся в теплый день. Один из инженеров НАСА сказал: «У нас есть утечка на самой холодной и самой горячей ракете»¹. То, что фокус был сделан на утечках, а не на эрозии разрушил доводы тех, кто был против запуска шаттла, не смотря на то, что из-за обширной эрозии SRM-15, запущенный при 11 °C, скорее всего ели уцелел, а при запуске SRM-22 в теплую погоду эрозии не было, была только утечка связанная, видимо, с другими причинами.

В оригинальных материалах, посланных инженерами Тайокола, температура, как это принято в США, указана в градусах Фарингейта (°F). Для удобства все температуры переведены в градусы Цельсия.

¹ Diane Vaughan, *Challenger Launch Decision*, с. 296-297.

Инженеры Тайкола основали свои доводы на выборке из всего двух запусков. Они проигнорировали данные о 22 предыдущих запусках. Вместо этого они добавили в таблицу данные о тестовых ускорителях (QM и DM), которые запускались в горизонтальном положении в штате Юта и которые, конечно, не испытывали нагрузок настоящего запуска.

Проигнорировав 92% данных, инженеры Тайокола, тем не менее, сделали верный вывод и рекомендовали отменить запуск. В заключении было написано, что температура колец должна быть не мене 11,6 °C, но это был чисто эмпирический результат, который был сделан на основе выборки в один элемент (SRM-15). Инженеры Тайокола пришли к верному заключению, но не смогли обосновать свою точку зрения так, чтобы им поверили.

MOTOR	O-RING
DM-4	8,3
DM-2	11,1
QM-3	8,8
QM-4	10,6
SRM-15	11,6
SRM-22	23
SRM-25	-1,7 -2,8

DM — development motors (экспериментальные ракеты).

QM — qualifying motors (квалификационные ракеты).

CONCLUSIONS :

- TEMPERATURE OF O-RING IS NOT ONLY PARAMETER CONTROLLING BLOW-BY
- SRM 15 WITH BLOW-BY HAD AN O-RING TEMP AT 11,6°C
SRM 22 WITH BLOW-BY HAD AN O-RING TEMP AT 23°C
FOUR DEVELOPMENT MOTORS WITH NO BLOW-BY WERE TESTED AT O-RING TEMP OF 8,3° To 11,1 °C
- DEVELOPMENT MOTORS HAD PUTTY PACKING WHICH RESULTED IN BETTER PERFORMANCE
- AT ABOUT 10°C BLOW-BY COULD BE EXPERIENCED IN CASE JOINTS
- TEMP FOR SRM 25 ON 1-28-86 LAUNCH WILL BE -1,7°C 9AM
3,3°C 2PM
- HAVE NO DATA THAT WOULD INDICATE SRM 25 IS DIFFERENT THAN SRM 15 OTHER THAN TEMP

RECOMMENDATIONS :

- O-RING TEMP MUST BE $\geq 11,6^\circ\text{C}$ AT LAUNCH
- DEVELOPMENT MOTORS AT 8,3° To 11,1°C WITH PUTTY PACKING HAD NO BLOW-BY
- SRM 15 (THE BEST SIMULATION) WORKED AT 11,6 °C
- PROJECT AMBIENT CONDITIONS (TEMP & WIND) TO DETERMINE LAUNCH TIME

Температура уплотнительных колец на момент запуска должна быть $\geq 11,6^\circ\text{C}$

Таблица ниже показывает историю состояний и температур уплотнительных колец для всех пусков, предшествовавших пуску Челленджера.

История температур и состояний уплотнительных колец

Полёт	Дата	Температура °C	Случай эрозии	Случай утечек	Индекс повреждения	Комментарии
51-C	24.01.85	11,7°	3	2	11	Наибольшая эрозия; утечка; нагрев второго кольца.
41-B	03.02.84	13,9°	1		4	Глубокая протяженная эрозия.
61-C	12.01.86	14,4°	1		4	Эрозия кольца при запуске за две недели до Челленджера.
41-C	06.04.84	17,2°	1		2	Следы нагрева на кольце, но нет повреждений.
1	12.04.81	18,9°			0	Самая холодная температура (18,9°), где не было проблем с кольцами.
6	04.04.83	19,4°			0	
51-A	08.11.84	19,4°			0	
51-D	12.04.85	19,4°			0	
5	11.11.82	20°			0	
3	22.03.82	20,5°			0	
2	12.11.81	21,1°	1		4	Причина эрозии не установлена.
9	28.11.83	21,1°			0	
41-D	30.08.84	21,1°	1		4	
51-G	17.06.85	21,1°			0	
7	18.06.83	22,2°			0	
8	30.08.83	22,8°			0	
51-B	29.04.85	23,9°			0	
61-A	30.10.85	23,9°		2	4	Отсутствие эрозии. Сажа найдена за вторым кольцом.
51-I	27.08.85	24,4°			0	
61-B	26.11.85	24,4°			0	
41-G	05.10.84	25,6°			0	
51-J	03.10.85	26,1°			0	
	27.06.82	26,7°			?	Состояния колец не известны; ракета потеряна в море.
51-F	29.07.85	27,2°			0	

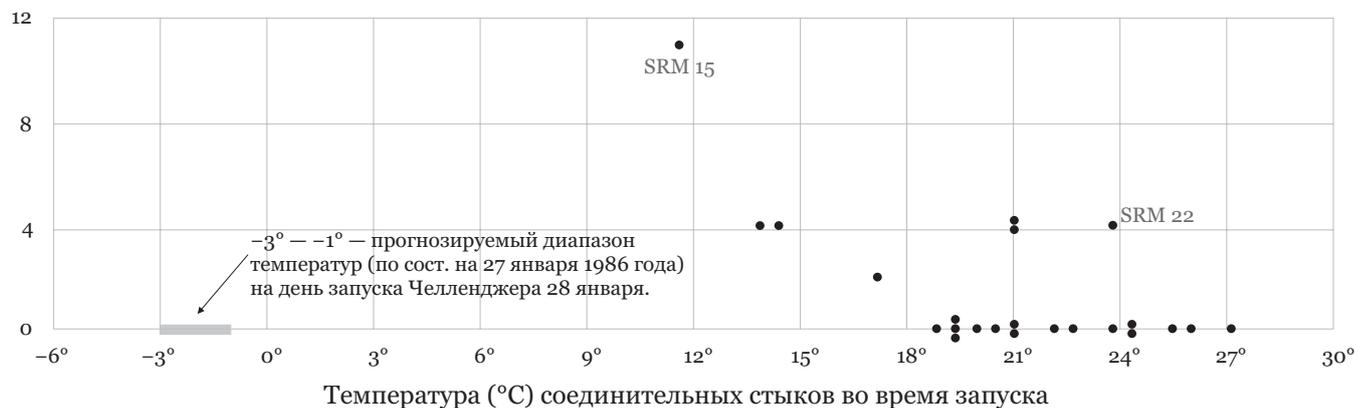
Записи отсортированы по возможной причине — температуре. Жирным показаны значения, которые упоминали инженеры Тайокола.

Таблица ясно показывает связь между повреждением колец и температурой. Из неё видно, что по сравнению с теплой погодой в холодную количество проблем увеличивается. Такое сравнение очень важно, потому что *числа могут что-либо показать только в сравнении*.

Еще лучше — представить эту информацию наглядно в виде графика, чтобы дать возможность увидеть все данные сразу.

Как и таблица график показывает серьёзную опасность запуска шаттла при температуре меньше -1° .

Индекс повреждения уплотнительных колец по каждому пуску



Годами у шаттлов возникали проблемы с кольцами при запуске в холодную погоду. В действительности каждый запуск ниже 18°C заканчивался повреждением колец.

График намеренно продолжен до -6° градусов, наглядно показывая, какого эффекта можно ожидать при запуске в шаттла в холодный день.

Урок

Есть правильные и неправильные способы отображения данных. Если предмет обсуждения важен, то *правильное или неправильное отображение может иметь моментальные последствия*.

Показывать правильно можно научиться.

Связь с автором

Пишите по адресу kolan@ksoftware.ru.

Читайте ещё на сайте www.ksoftware.ru/wiki.