



ТРИЗ ПРАКТИКА

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДЛЯ ОТРАБОТКИ
АВАРИЙНОГО ОСТАНОВА ГТД

XI Международный технологический форум
«ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ. ПРОИЗВОДСТВО»

17- 18 апреля 2025 года

г. Рыбинск, Ярославская область



Диденко Роман Алексеевич, 1984 г.р.

- ведущий специалист СГК ПАО «ОДК-Сатурн»;
- кандидат технических наук;
- специалист 3-го уровня международной ассоциации ТРИЗ.

Компетенции и навыки:

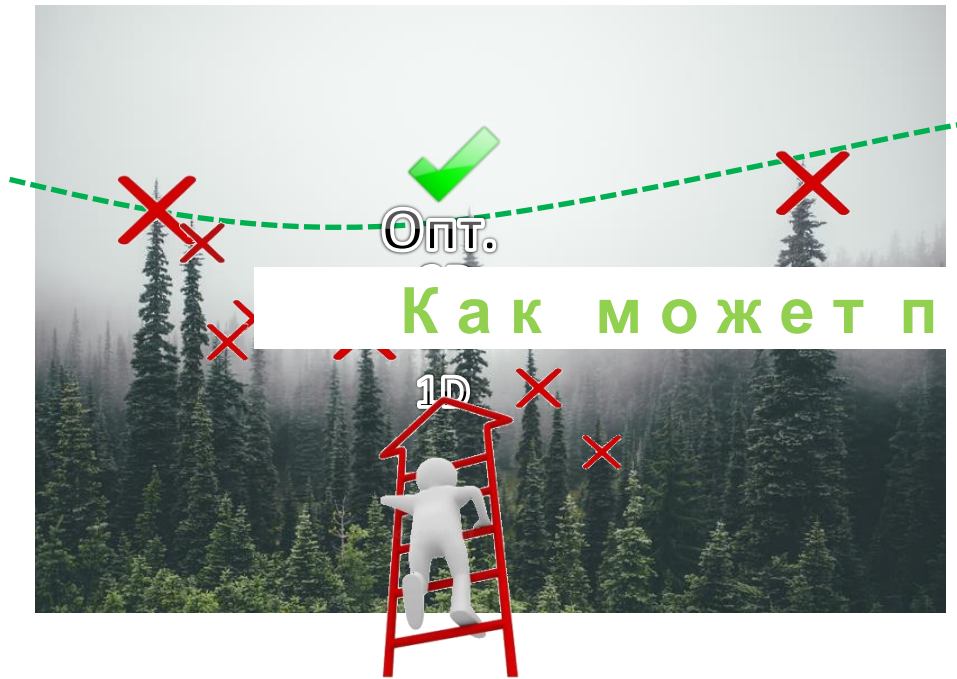
- Теория и конструкция ГТД;
- Вычислительная газовая динамика, теплообмен, вибрации и прочность ГТД;
- Испытания ГТД;
- Создание стендов для испытаний ГТД и поузловой доводки.

Повышение квалификации в ТРИЗ-Школе ГК «РОСТЕХ» (1, 2 и 3 уровни)



Ожидание

Высокие целевые значения параметров...



Как может помочь ТРИЗ?

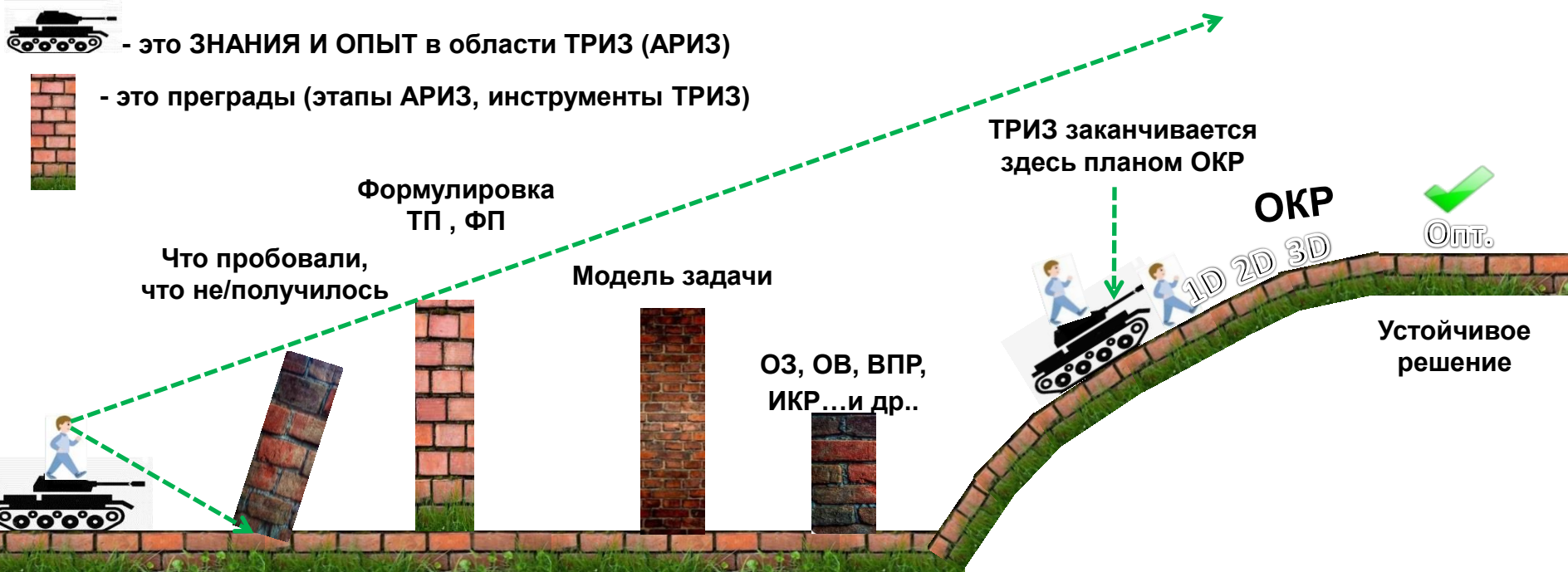
Современные 3D численные методы моделирования...
Робастное проектирование и оптимизация...

Реальность

«Ветер» испытаний «сдувает» с неустойчивой «оптимальной» вершины



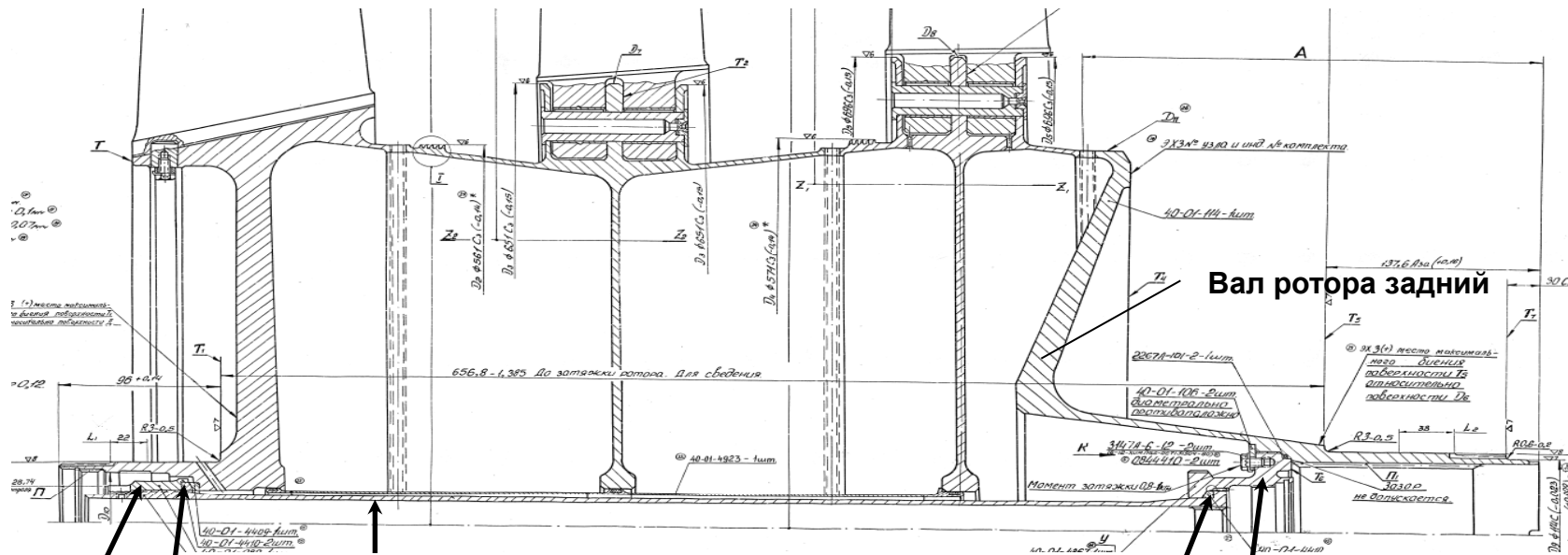
Вперед, на новую вершину!



ГЛАВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ТРИЗ

- **принципиальное решение не видно в начале пути,**
- **наличие большого количества инструментов, позволяющих заглянуть за горизонт интуитивного, коллективного (не) понимания, имеющего место быть на совещаниях с мозговым штурмом и у МПиО.**

ЦЕЛЬ: Для отработки системы аварийного останова двигателей необходимо гарантированно разрушить стяжной болт между КНД и ТНД после выхода на взлётный режим. Проблема в труднодоступности болта для механизмов разрушения.



Стяжной болт обеспечивает кинематическая связь КНД и ТНД - удержание вала ротора заднего с тремя дисками КНД.

Опора стяжного болта
Шайба сферическая

Шайба сферическая
Гайка стяжного болта

Проблема в явном виде (с параметрами):

Гарантированное разрушение стяжного болта должно произойти на взлётном режиме $N_1=1.0$, длительность которого составляет порядка **5 минут**. В явном виде проблему можно сформулировать следующим образом:

- а) каким образом разрушить;
- б) каким образом обеспечить это разрушение именно на взлетном режиме,
- в) каким образом гарантировать это разрушение.

Нежелательный эффект:

Если болт разрушится не на взлетном режиме, то систему аварийного останова проверить не полностью удастся, двигатель разрушится, это большие финансовые потери.

ФАКТ: В эксплуатации болт разрушался на взлетном режиме 6 раз.

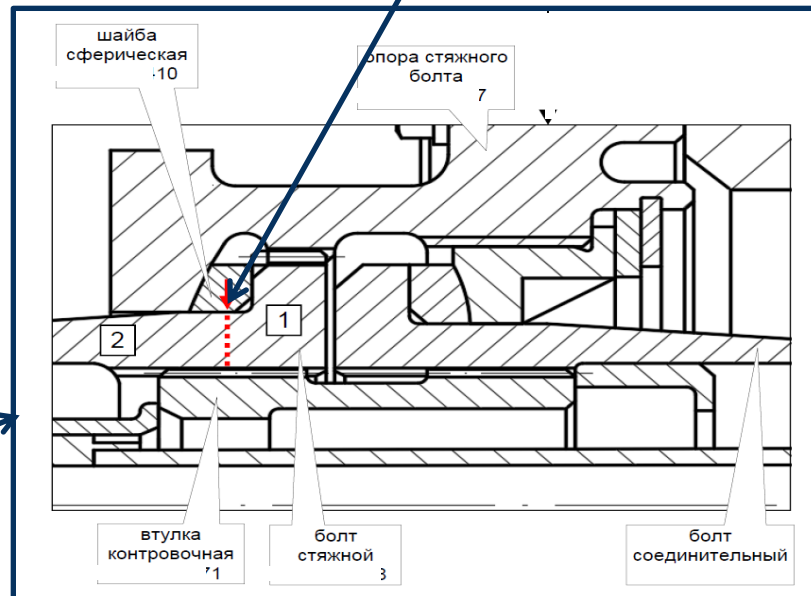
СЛЕДОВАТЕЛЬНО: если повторить условия эксплуатации на стенде, то есть большая вероятность, что болт гарантированно разрушится при испытаниях на стенде на взлетном режиме.

1). АНАЛИЗ МЕСТА НАЧАЛА РАЗРУШЕНИЯ

Очаги разрушения располагаются на расстоянии 2...3,3 мм от опорного торца головки болта в зоне фреттинга в результате контакта с шайбой.

Место разрушения всех болтов

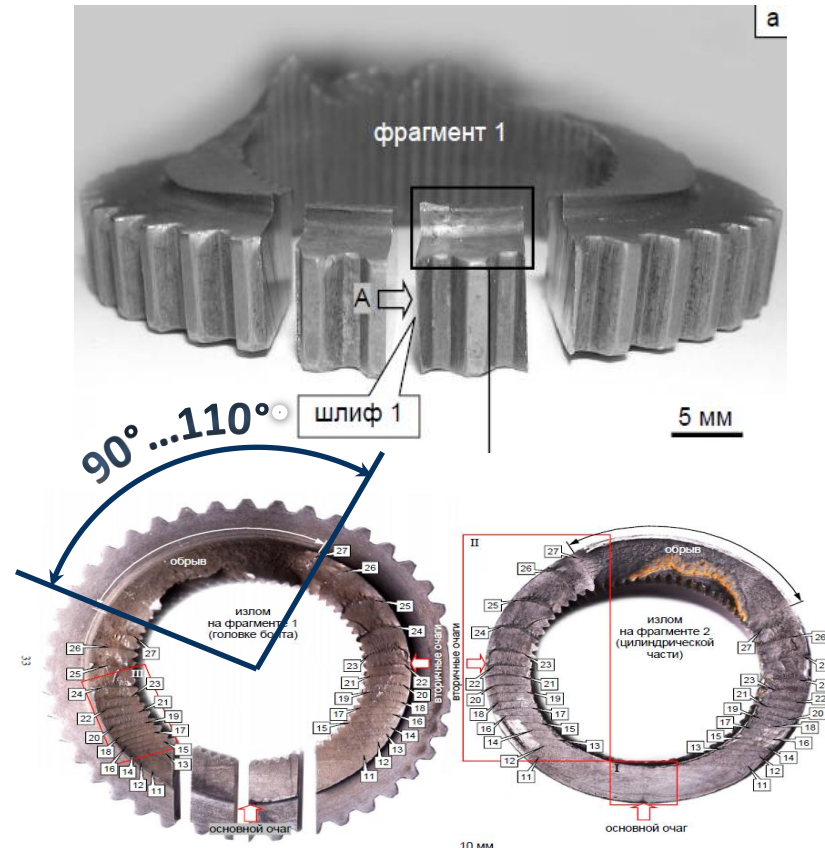
зв КНД и ТНД - удержание вала ротора заднего с тремя дисками



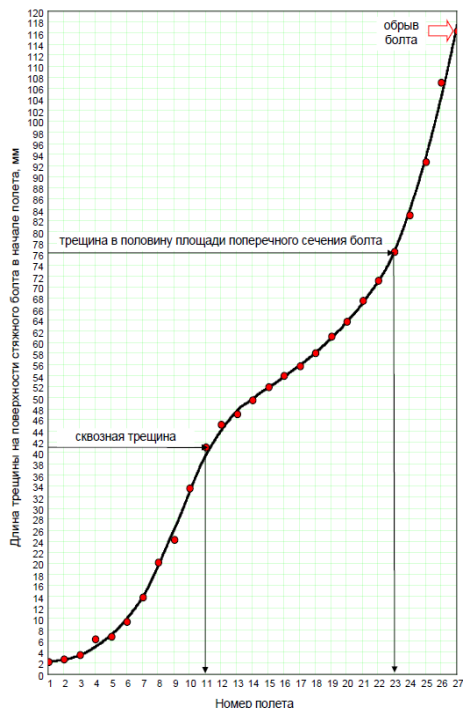
2) АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА И КИНЕТИКИ РАЗРУШЕНИЯ:

Сквозная трещина развивалась при циклически повторяющемся комбинированном нагружении – в каждом цикле происходило кратковременное интенсивное квазистатическое воздействие, приводящее к локальному надрыву, а за ним следовала продолжительная высокочастотная циклическая нагрузка невысокого уровня, под действием которой трещина распространялась по механизму многоциклового усталости;

Площадь поверхности разрушения по трещине перед обрывом болта составляла $\approx 75\%$ площади поперечного сечения болта;



Кинетическая диаграмма

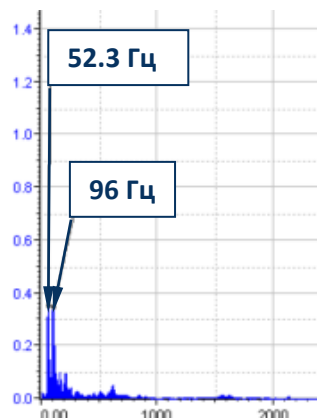


4) АНАЛИЗ КИНЕТИЧЕСКОЙ ДИАГРАММЫ РАЗРУШЕНИЯ: из кинетической диаграммы видно, что интенсивный рост трещины начинается, когда трещина занимает 50% поперечного сечения болта, после этого требуется ~4 полета чтобы болт разрушился на максимальном режиме.

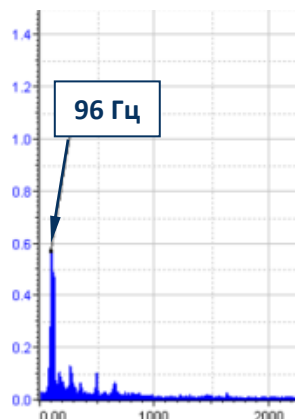
5) АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК: по результатам тензометрирования выявлено наличие вынужденных колебаний стяжного болта на всех режимах работы двигателя с максимальной амплитудой на взлетном режиме. Частота колебаний соответствует частоте скольжения роторов $N2-N1 \approx 96$ Гц.

6) АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК: определены величины монтажной вытяжки (~1 мм) и режимной вытяжки болта (~1.4 мм).

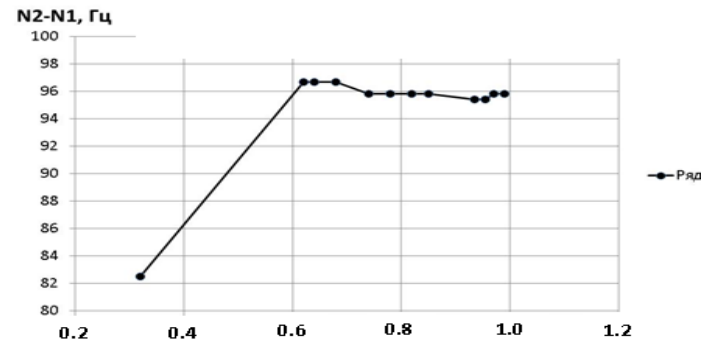
7) АНАЛИЗ СТАТИСТИКИ ПО СКОЛЬЖЕНИЮ РОТОРОВ



Режим $N_1=0.6$



Режим $N_1=1.0$



Режим N_1

ВОПРОС: КАК НА ОСНОВАНИИ 6-ТИ СЛУЧАЕВ РАЗРЫВА БОЛТА НА ВЗЛЕТНОМ РЕЖИМЕ ГАРАНТИРОВАНО РАЗОРВАТЬ БОЛТ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА СТЕНДЕ НА РАБОТАЮЩЕМ ДВИГАТЕЛЕ?



ОТВЕТ: СДЕЛАТЬ ПРОПИЛ – ИМИТАЦИЯ ТРЕЩИНЫ



Переформулировка задачи:

КАКОЙ ДОЛЖНА БЫТЬ ВЕЛИЧИНА ПРОПИЛА, ЧТОБЫ ГАРАНТИРОВАНО БОЛТ РАЗОРВАЛО НА ВЗЛЕТНОМ РЕЖИМЕ?

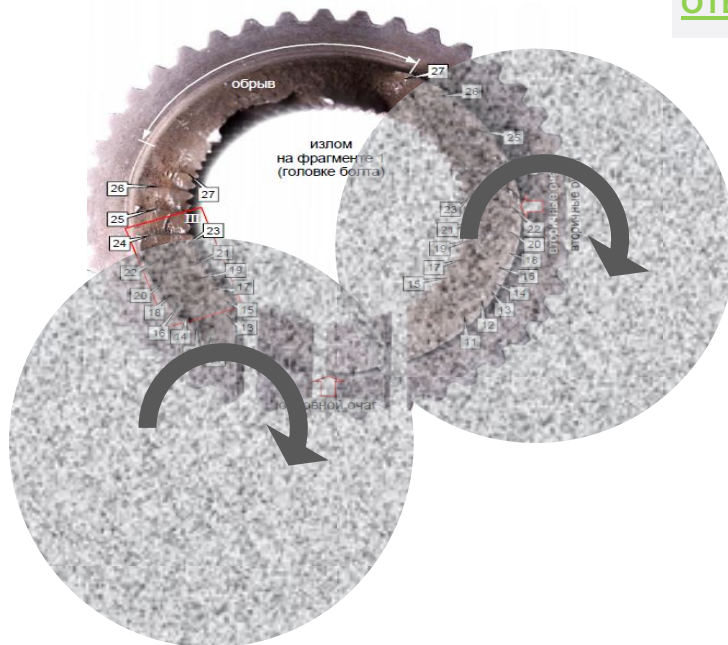


Вид ТРИЗ проекта:

«Улучшение продукта или процесса» - то есть какой должна быть система нам известно, задача сводится к получению нужных свойств системы.



ТРИЗ-инструмент - АРИЗ



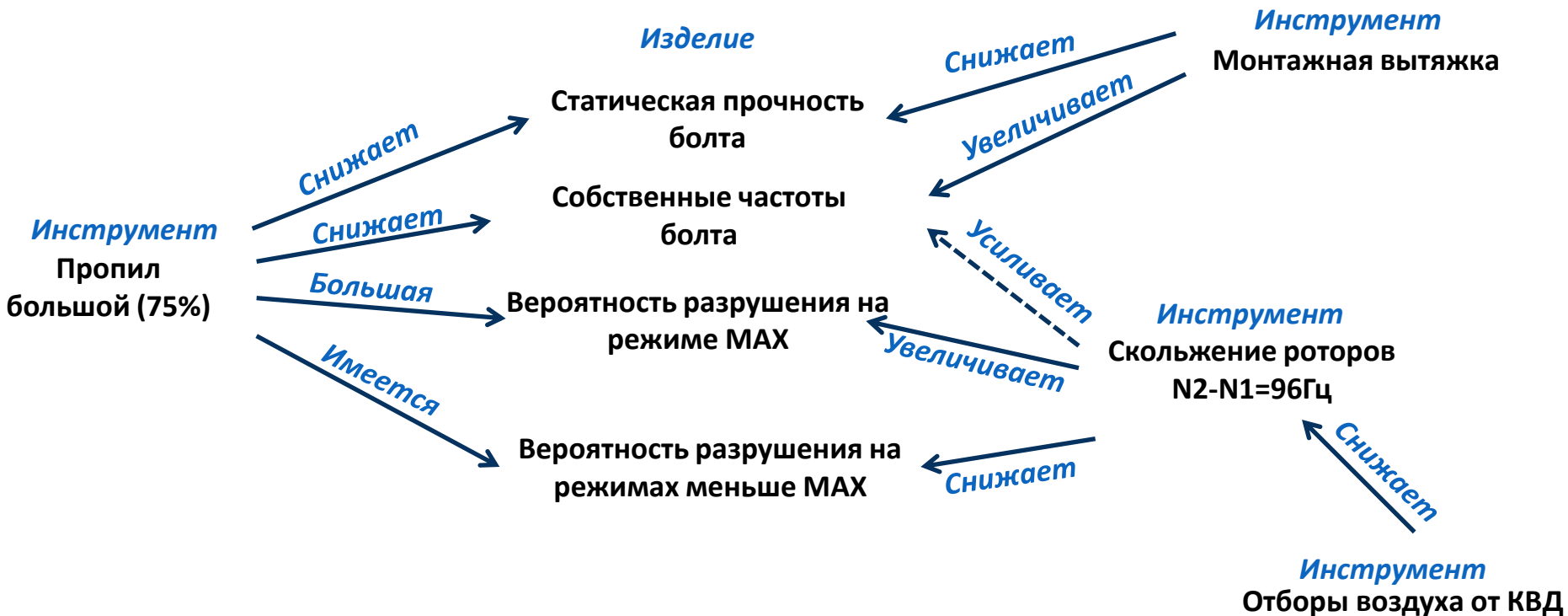
Техническое противоречие №1 (ТП1):

ЕСЛИ величина пропила 75%, **ТО** статическая прочность болта маленькая и он может разрушиться на режиме **MAX (N₁=1.0)**, **НО** из-за маленькой статической прочности и других режимных параметров болт может порваться раньше.

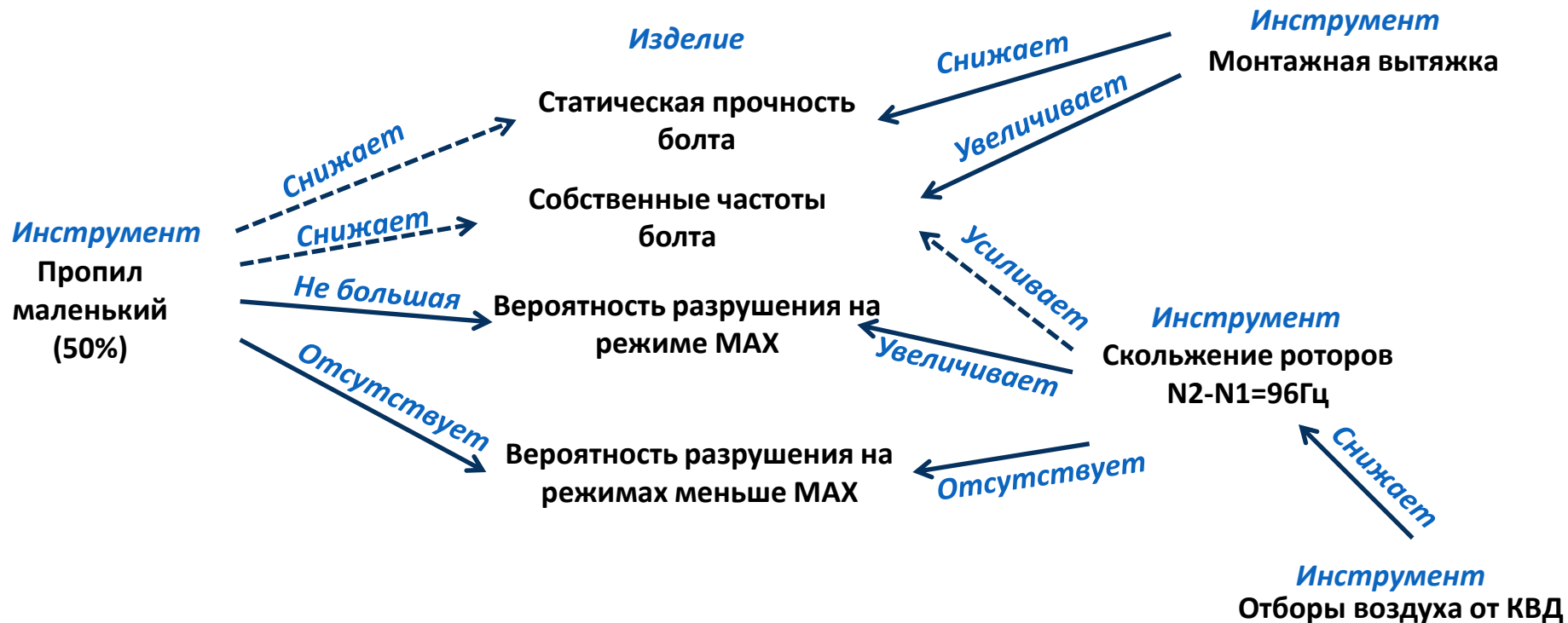
Техническое противоречие №2 (ТП2):

ЕСЛИ величина пропила 50%, **ТО** статическая прочность болта большая, **НО** на режиме **MAX (N₁=1.0)** болт может не порваться вовсе.

Графическая схема технического противоречия №1 (ТП1)



Графическая схема технического противоречия №2 (ТП2)



Выберем из двух схем конфликта (ТП1 или ТП2) ту, которая обеспечивает наилучшее осуществление главного производственного процесса (основной функции технической системы, указанной в условиях задачи).



ПРЕДЛАГАЕТСЯ ВЫБРАТЬ ТП2, ТАК КАК У ДАННОГО ВАРИАНТА ОТСУТСТВУЕТ
ВЕРОЯТНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ НА РЕЖИМЕ МЕНЬШЕ МАХ

Графическая схема технического противоречия №2 (ТП2)



УСИЛИМ КОНФЛИКТ, УКАЖЕМ ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ (ДЕЙСТВИЯ) ЭЛЕМЕНТОВ



- 1. Частота скольжения роторов N2-N1 совпадает или кратна собственной частотой болта на режиме MAX.**
- 2. Монтажная и режимная вытяжка снизила статическую прочность болта на столько, что болт готов разорваться на режиме MAX.**
- 3. Вероятность разрушения на режиме MAX равна 100%.**

ПЕРЕФОРМУЛИРУЕМ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ, В ВИДЕ:

1. КОНФЛИКТУЮЩАЯ ПАРА:

Вероятность разрушения на режиме MAX VS Вероятности разрушения на режиме меньше MAX

2. УСИЛЕННАЯ ФОРМУЛИРОВКА КОНФЛИКТА:

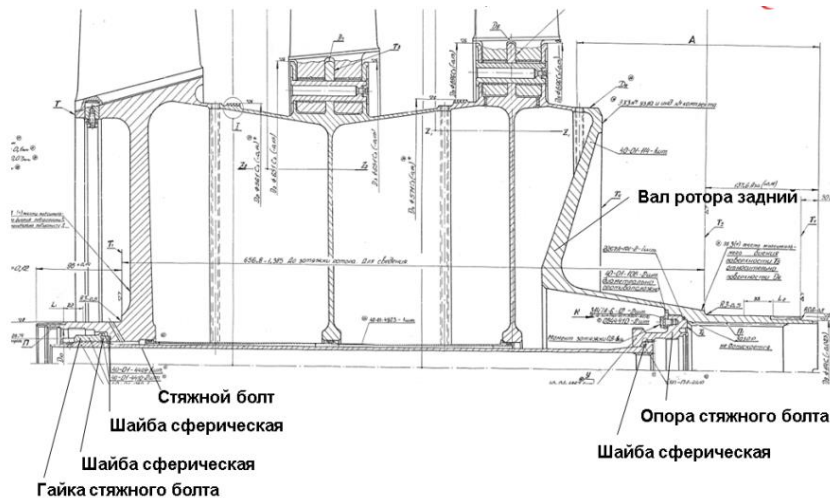
Вероятность разрушения на режиме MAX = 100%, вероятность разрушения на режимах меньше MAX = 0%.

3. Что должен сделать вводимый для решения задачи X-элемент (что он должен сохранить и что должен устранить, улучшить, обеспечить и т.д.).

X ЭЛЕМЕНТ ДОЛЖЕН УВЕЛИЧИТЬ ВЕРОЯТНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ НА РЕЖИМЕ MAX ДО 100%.

Запомним этот вывод, он нам пригодится дальше.

Оперативная зона (ОЗ) – определяется деталями ротора КНД, окружающими болт

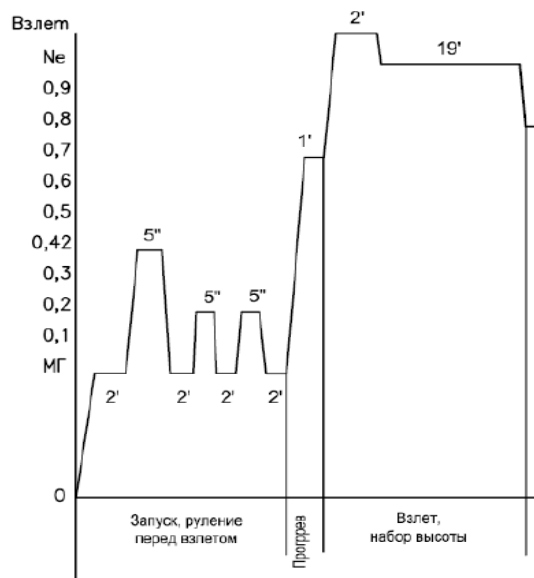


Левая граница: Шайба сферическая, шайба сферическая, гайка стяжного болта. Данные элементы обеспечивают прижатие болта к полотну диска КНД 1 ст.

Верхняя нижняя границы: Диски и барабан КНД, вал ротора задний. Данные элементы обеспечивают растягивающие усилия в болте. Особенно вал ротора задний за счет своей упругости. Также данные элементы обеспечивают вращение болта.

Правая граница: Шайба сферическая. Опора стяжного болта. Обеспечивают натяжение стяжного болта.

Оперативное время (ОВ) – определяется типовым полетным циклом (ТПЦ)



Промежуточные режимы (0.1...0.7): **С 1 по 25 минуту испытаний.**

Взлетный режим (0.96...0.99): **С 25 по 30 (45) минуту. Стоянка на режиме MAX допускается 15 минут.**

Максимальный продолжительный (0.92...0.94): **С 30 по 50 минуту.**

Список ВПР

1. Место расположения пропила по длине болта.
2. Величина пропила в поперечном сечении (25, 50, 75%).
3. Собственная частота первой формы колебаний болта при монтажной и рабочей вытяжке.
4. Частота скольжения роторов ГТД на режиме МАХ (N2-N1).
5. Программа стендовых испытаний (на основе ТПЦ).
6. Количество выходов на режим МАХ.
7. Длительность выдержки на режиме МАХ (согласно РЭ допускается увеличить до 15 минут).
8. Отборы от КВД на самолетные нужды на режиме МАХ.
9. Температура газа $T^*_{г}$ (увеличение $T^*_{г}$ в диапазоне допуска увеличивает нагрузку на болт).
10. Температура воздуха на входе T_n (чем ниже, тем больше нагрузка на стяжной болт).

УСИЛЕННАЯ ФОРМУЛИРОВКА ИКР-1 (В СИСТЕМУ НЕЛЬЗЯ ВВОДИТЬ НОВЫЕ ВЕЩЕСТВА И ПОЛЯ, НЕОБХОДИМО ИСПОЛЬЗОВАТЬ ИЗМЕНЕННЫЙ ВПР):

Х элемент представляет собой уже имеющийся в конструкции элемент с незначительными измененными свойствами, при этом абсолютно не усложняя систему и не вызывая вредных явлений устраняет вероятность разрушения болта на промежуточных режимах и обеспечивает разрушение болта на максимальном режиме МАХ.

ФОРМУЛИРОВКА ФИЗИЧЕСКОГО ПРОТИВОРЕЧИЯ НА МАКРОУРОВНЕ:

Ротор КНД должен быть прочным на промежуточных режимах и не должен быть прочным на максимальном режиме.

ФОРМУЛИРОВКА ФИЗИЧЕСКОГО ПРОТИВОРЕЧИЯ НА МИКРОУРОВНЕ:

Внутри ротора первого каскада компрессора (оперативная зона) должен быть не прочный **Х-элемент** абсолютно не усложняя систему и не вызывая вредных явлений который исключает разрушение болта на промежуточных режимах с 1 по 25 минуту испытаний, при этом обеспечивает способность разрушить болт на максимальном режиме с 25 по 30 (45) минуту.

ФОРМУЛИРОВКА ИДЕАЛЬНОГО КОНЕЧНОГО РЕЗУЛЬТАТА ИКР-2:

Ротор КНД (оперативная зона) должен быть прочным на промежуточных режимах ($N_1 = 0$ до 0.92) с 1 по 25 минуту (оперативное время 1) испытаний не должен быть прочным на оборотах ($N_1 = 0,92...1.0$) с 25 по 30 (45) минуту испытаний (оперативное время 2).

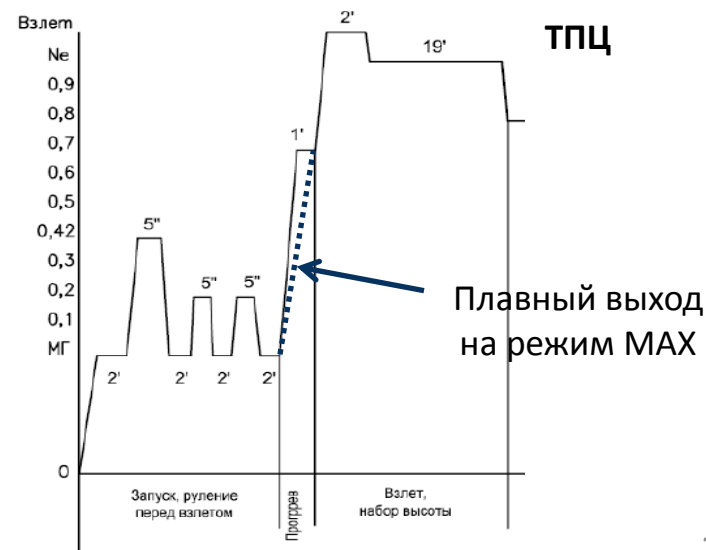
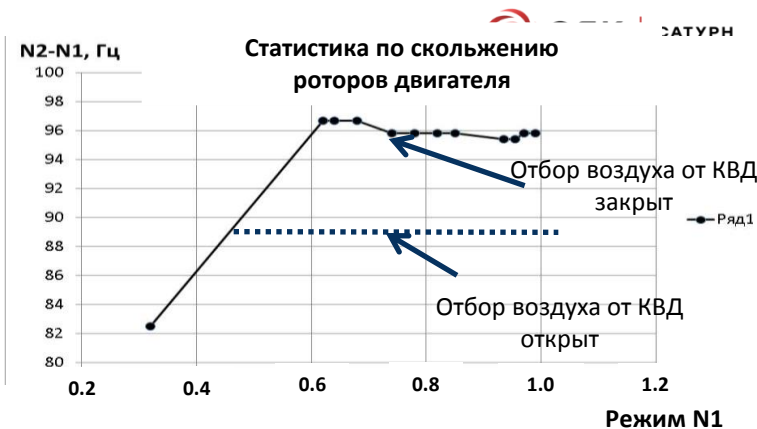
То есть какой должна быть система нам известно, задача сводится к получению нужных свойств системы. Какой участок болта рвется на режиме MAX нам тоже известно.

ПРИ ПОМОЩИ МОБИЛИЗАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ ВПР НЕОБХОДИМО МАКСИМАЛЬНО СНИЗИТЬ ВЕРОЯТНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ БОЛТА НА РЕЖИМЕ МЕНЬШЕ MAX И МАКСИМАЛЬНО УВЕЛИЧИТЬ ЕЕ НА РЕЖИМЕ MAX:

Мобилизация ВПР: предлагается для значительного (в десятки раз) увеличения динамической нагрузки на болт на режиме MAX обеспечить **совпадение (кратность) частоты первой собственной формы колебаний болта с частотой скольжения роторов на режиме MAX.**

1. Совпадение частот можно добиться путем настройки величины отборов от КВД на самолетные нужды при стоянке на режиме MAX. (Увеличение отборов воздуха от КВД снижает частоту скольжения $N_2 - N_1$)
2. Снизить время воздействия на режиме 0.7 Ne, для этого горизонтальный участок на режиме 0.7 предлагается заменить эквивалентным по времени наклонным участком.

Резонанс частот это и есть искомый X-элемент,



1. В болте необходимо выполнить пропил на расстоянии 2...3,3 мм от опорного торца. Здесь будет место разрушение болта. Ширина пропила ~1.5 мм.
2. Пропил необходимо выполнять итерационно 25, 50 и 75% площади поперечного сечения болта.
3. Для каждого из вариантов пропила необходимо в определить собственные частоты колебаний с преднагружением в составе ротора I каскада компрессора (КНД). Преднагружение должно обеспечиваться вытяжкой болта:
 - монтажная (рабочая) вытяжка (~1мм);
 - режимная (как при испытаниях) вытяжка (~1.4мм).
4. По результатам экспериментальных работ по п.3 определить величину пропила такую, чтобы с режимной вытяжкой частота первой формы колебаний $f_1(\text{нагр})$ равнялась или была кратна 96Гц.
5. Необходимо определить запас по статической прочности болтов с пропилами 25, 50, 75% и с пропилом по пункту 4 при монтажной и режимной вытяжке.
6. Точная величина пропила выбирается на основании пунктов 1-5 учитывая, что глубина и форма пропила в поперечном сечении перед разрушением должна соответствовать геометрии для 6 предыдущих случаев разрушения в эксплуатации с запасом, то есть с пропилом от 50% до 60%.

7. Балансировка болта (ротора) должна быть выполнена после выполнения пропила.
8. При сборке двигателя необходимо обеспечить штатную монтажную вытяжку болта, момент затяжки гайки болта снизится соответственно. Растяжение болта при сборке должно быть таким как на стенде при испытаниях на собственные частоты. **Необходимо при сборке и испытаниях контролировать деформацию (напряжения) болта по тензодатчику в районе пропила.**
9. Программа стендовых испытаний должна соответствовать эксплуатационному полетному циклу (ТПЦ), с плавным эквивалентным по времени выходом на режим MAX, без остановки на режиме 0.7 Ne.
10. После выхода на режим MAX кратно увеличить динамическую нагрузку на болт путем изменения величины отборов воздуха от КВД на самолетные нужды – **ДОЛЖНО ПРОИЗОЙТИ РАЗРУШЕНИЕ БОЛТА ОТ КОМБИНАЦИИ СТАТИЧЕСКОЙ И УСИЛЕННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ (РЕЗОНАНС – это искомый X элемент).**

Если разрушения не произошло, то варианты для дальнейшей мобилизацию ВПР следующие:

- 10.1 Увеличиваем выдержку на режиме **MAX** до 15 минут (допускается в соответствии с РЭ).
- 10.2 Повторяем выход на режим **MAX** 5...7 раз, или столько раз, пока болт не разрушится.
- 10.3. Увеличиваем режим **MAX** в диапазоне допуска по температуре газа $T^*_{г.}$,
- 10.4 Снижаем температуру на входе в двигатель T_n (испытания в ночное время).