

МИНОБРНАУКИ РФ

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Самарский государственный аэрокосмический
Университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)»**

Исаченко. Э.Д.

Испытания и обеспечение надежности авиационных ГТД и энергетических установок

презентация краткого курса лекций

Омск 2011

ВИДЫ И ЗАДАЧИ ИСПЫТАНИЙ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Каждый авиационный двигатель пройдя этапы проектирования, конструирования и изготовления подвергается *испытанию*.



Вертолетный ГТД ТВ7-117В

С помощью газотурбинных двигателей авиация в настоящее время достигла высокой степени совершенства. При этом, как в гражданской, так и в военной авиации на первый план выдвигаются требования надежной работы и обеспечение параметров, заложенных при проектировании. Единственная возможность убедиться в этом – это провести испытание двигателя

Испытания – это экспериментальное определение (оценивание) и контроль количественных и качественных характеристик свойств объекта испытаний, как результат воздействия на него при его функционировании.

Результаты испытаний зависят от условий – совокупности воздействующих факторов и режимов функционирования объекта при испытаниях.

Испытание авиационного двигателя преследует три цели:

- проверка соответствия основных технических данных двигателя (ОТД) параметрам заданным в технических условиях (ТУ).
- определение ресурса, проверка работоспособности и надежности двигателя.
- определение фактического состояния рабочего процесса и напряжений в конструкции двигателя.

В зависимости от характера проводимых экспериментов различают:

- научно-исследовательские испытания (научно-исследовательский эксперимент);**
- испытания отдельных узлов создаваемого двигателя;**
- доводочные и специальные испытания опытного двигателя;**
- государственные испытания двигателя;**
- испытания серийных двигателей.**

Научно-исследовательские эксперименты

Главная задача – изучение и анализ происходящих в двигателе процессов, определение характеристик элементов и возможных средств их улучшения.

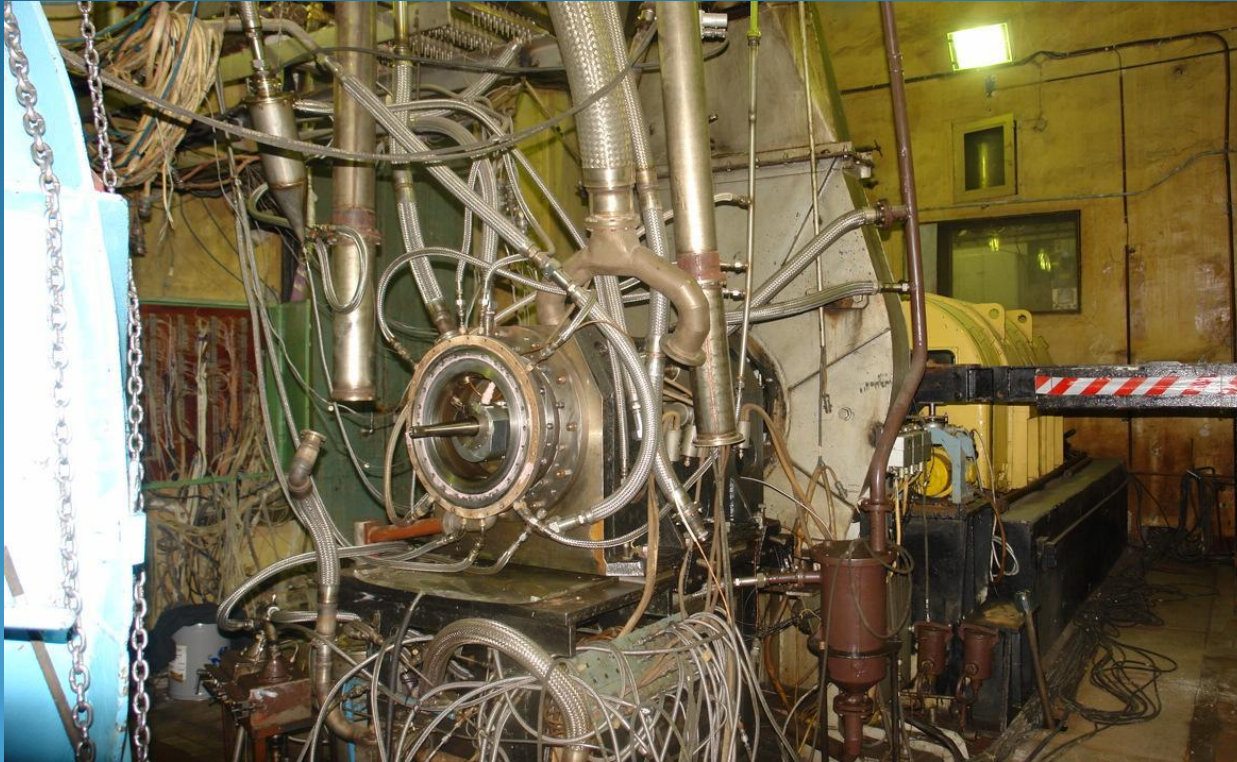
Конечная цель НИР – разработка рациональных методов расчета, конструирования и производства двигателя, накопление справочного материала применительно к условиям использования в будущих проектах и конструкциях

Среди различных исследовательских экспериментов по ГТД обычно выделяют следующие:

- продувки элементов лопаточных машин;
- изучение рабочего процесса основных и форсажных камер;
- изучение свойств новых конструкционных материалов, покрытий, шумоглушащих конструкций, контактных уплотнений, конструкций опор, демпферных устройств и других элементов.

Узловые испытания

Испытания отдельных узлов двигателя на автономных стендах являются эффективным средством опережающей отработки новых технических решений, позволяющим сократить объем, стоимость и общие сроки работ по созданию нового ВРД.



**Установка
для
испытания
компрессоров
ГТД**



Установка для испытания камер сгорания ГТД



**Установка испытательная разгонная (УИР-3) для
испытания дисков компрессоров и турбин**

Доводочные и специальные испытания опытных ГТД

Доводка опытного двигателя занимает значительный промежуток времени (6-7 лет) и ставит целью выйти на заявленные в проекте двигателя величины параметров во всех условиях эксплуатации и по ресурсу, путем внесения изменений в конструкцию и рабочий процесс двигателя.

В процессе **газодинамической доводки** решается множество дополнительных задач:

- отработка запуска двигателя;
- обеспечение выхода элементов двигателя при их совместной работе на расчетные или оптимальные режимы;
- отработка взаимодействия элементов и систем при переменных режимах – приемистости, дросселировании, включении и выключении форсажа;
- определение фактических запасов газодинамической устойчивости;
- уточнение выбранных законов управления и ограничения режимов.

Эффективность всех вводимых мероприятий по улучшению параметров определяется, в первую очередь, контролем его **дрессельной** **стендовой характеристики**.

Ряд доводочных работ требует проведения испытаний опытного двигателя на **высотных стендах**, где имитируются условия работы двигателя в **высотно-скоростных условиях**.



**Высотный стенд Ц-4Н для
испытаний двигателей и
газогенераторов**

**Позволяет проводить
испытания на переходных
режимах работы, с имитацией
динамики условий полета и
неоднородности потока воздуха
на входе.**

Прочностная доводка, целью которой является обеспечение надежной работы двигателя в течение установленного ресурса, включает в себя следующие испытания:

- **определение уровня переменных напряжений в лопатках, дисках, валах компрессора и турбины; проверка отсутствия автоколебаний лопаток компрессора (вентилятора);**
- **термометрирование деталей горячей части с целью проверки возможности работы при требуемой температуре газа;**
- **определение осевых сил в подшипниках, определение их температурного состояния;**
- **определение уровня вибраций на корпусе двигателя и на установленных агрегатах; тензометрирование трубопроводов внешней обвязки двигателя;**
- **ресурсные испытания.**

Для того чтобы двигатель мог быть предъявлен для прохождения государственных испытаний (ГИ) и сертифицирован, он должен успешно пройти также целый ряд специальных испытаний.



**Установка для
циклических испытаний
валов ТНД и КНД
двигателя Д30 при
рабочих температурах
при прочностной
доводке**



**Специальные
испытания на заброс
града на вход в ГТД**

Государственные испытания ГТД

Государственные испытания проводит Государственная комиссия, создаваемая из представителей Заказчика и Исполнителя.

В задачу государственных испытаний входят:

- **установление соответствия параметров двигателя параметрам заданным в ТЗ.**
- **проверка двигателя по 150-часовой программе испытаний.**
- **оценка уровня внедрения на двигателе унифицированных и стандартизованных изделий и конструкций.**
- **оценка эксплуатационного совершенства двигателя, контролепригодности, ремонтпригодности, обслуживаемости;**
- **установление эталона двигателя для серийного производства.**

Двигатель, предназначенный для государственных испытаний, предъявляется комиссии в разобранном виде после прохождения чистовых доводочных испытаний. Сборка производится под наблюдением представителей комиссии.

Испытания серийных ГТД

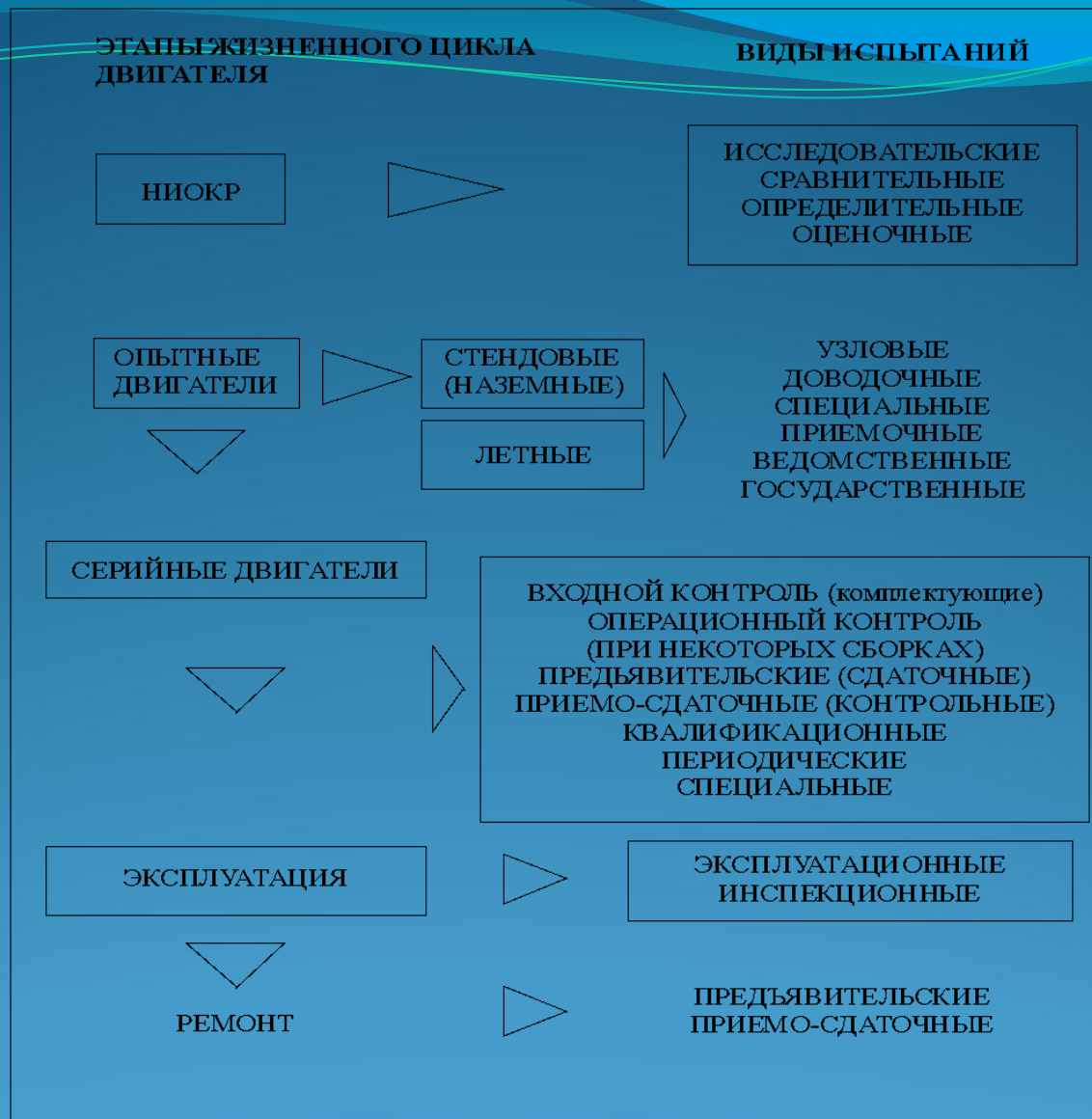
Задача испытаний серийных ГТД – всесторонняя проверка качества выпускаемой заводом серийной продукции. Эти испытания регламентируются для каждого двигателя специальными ТУ, разработанными соответствующими ОКБ.

Кратковременные испытания:

- предъявительские (сдаточные) испытания, принимаемые ОТК предприятия-изготовителя;
- приемо-сдаточные (контрольные испытания), проводящиеся в присутствии как представителя ОТК, так и заказчика;
- квалификационные испытания;

Периодические испытания:

- заводские периодические испытания по проверки ресурса и данных (150...300 ч);
- технологические испытания по проверке допустимости изменений, вводимых серийным заводом за прошедший период;
- специальные испытания.



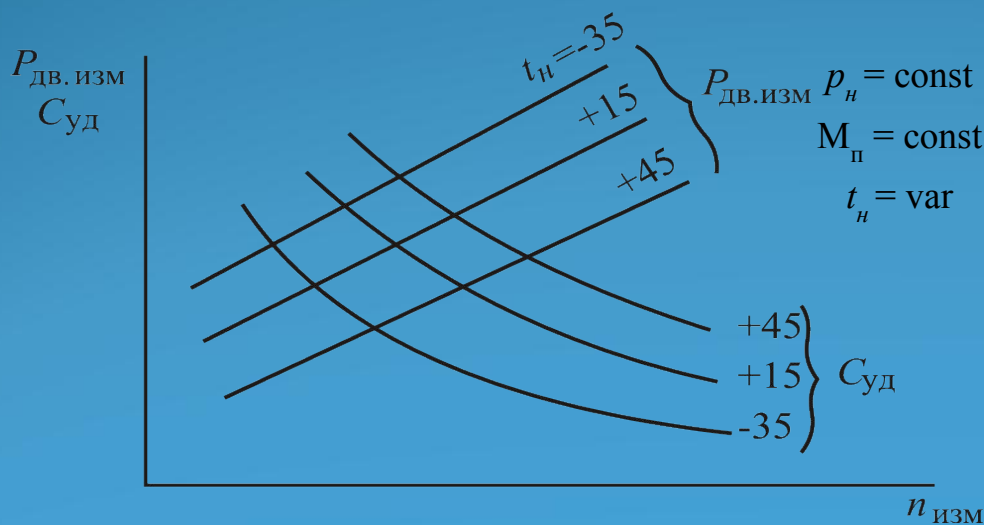
Виды испытаний авиационных ГТД

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВИАЦИОННЫХ ГТД

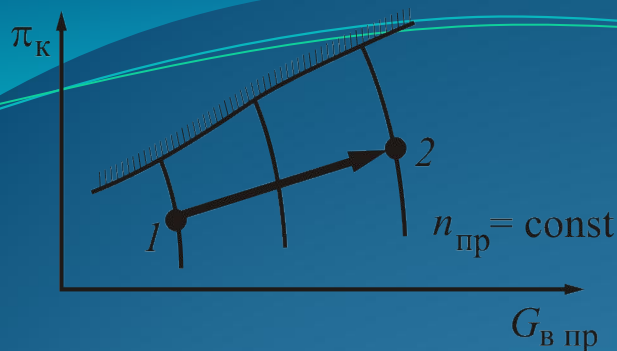
На экспериментальные характеристики ГТД оказывают влияние

- атмосферная температура;
- атмосферное давление;
- атмосферная влажность.

Влияние атмосферной температуры



Измеренная при разных значениях температуры
наружного воздуха дроссельная
характеристика ТРД

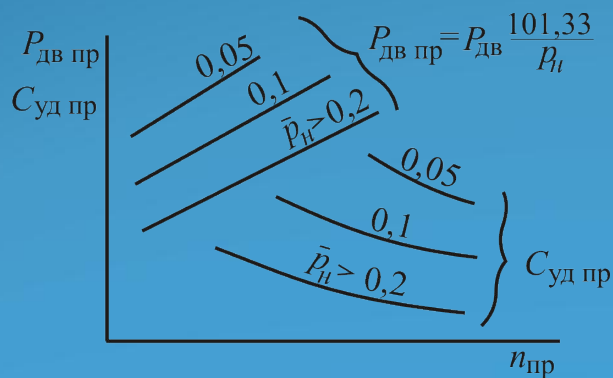


Влияние понижения температуры t_n на изменение положения рабочей точки:
 $1 - t_n = + 20^\circ C$; $2 - t_n = - 10^\circ C$

Влияние атмосферного давления

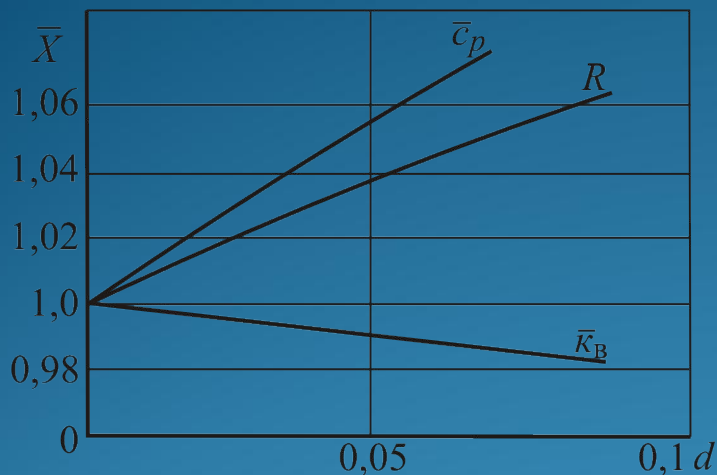
Из экспериментов установлено, что изменение p_n при $t_n = \text{const}$ в зоне автомодельности, т.е. в определенном диапазоне чисел Re (Рейнольдса), приводит к пропорциональному изменению давлений в тракте двигателя, а также расхода топлива G_t , расхода воздуха G_v и тяги $P_{дв}$. Температуры и скорости газа во всех сечениях двигателя в этом случае остаются неизменными.

При значительном уменьшении давлениях p_n (для ТВД $\leq 50\%$ от $p_n = 101,33$ кПа (760 мм рт.ст.), а для ТРД $\leq 20\%$ от 101,33 кПа) изменение атмосферного давления начинает влиять на безразмерные параметры течения в проточной части.

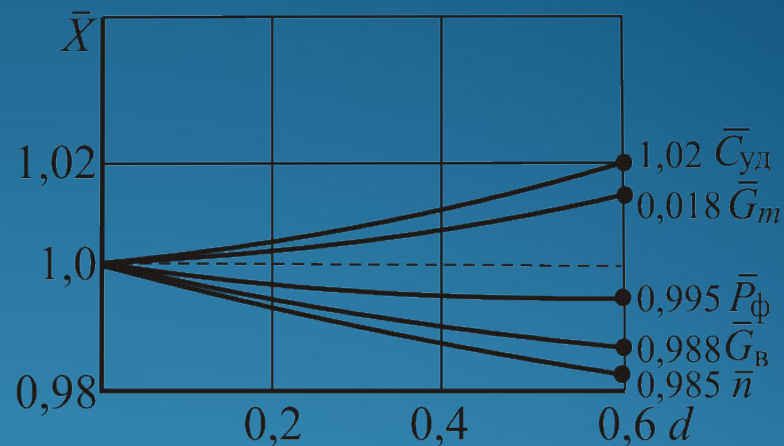


Влияние на дроссельную характеристику ТРД пониженного атмосферного давления при выходе из зоны автомодельности по числу Re

Влияние атмосферной влажности

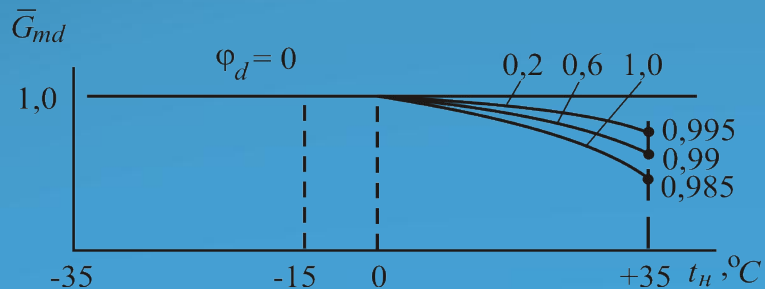


Относительное изменение теплоемкости при постоянном давлении \bar{c}_p , газовой постоянной R и показателя адиабаты \bar{k}_B при изменении удельной влажности



Влияние влажности на характер изменения основных выходных данных ГТД

Для учета влияния влажности на параметры испытываемых ГТД на испытательных станциях удобнее иная форма представления этого влияния



Учет влияния относительной влажности и температуры атмосферного воздуха на параметры ГТД (на примере часового расхода топлива)

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТАНЦИИ, СТЕНДЫ

Экспериментальное исследование авиационных ГТД проводят в испытательных цехах, в испытательных станциях и в испытательных лабораториях заводов и НИИ на специальных стендах, которые, представляют собой сложные сооружения



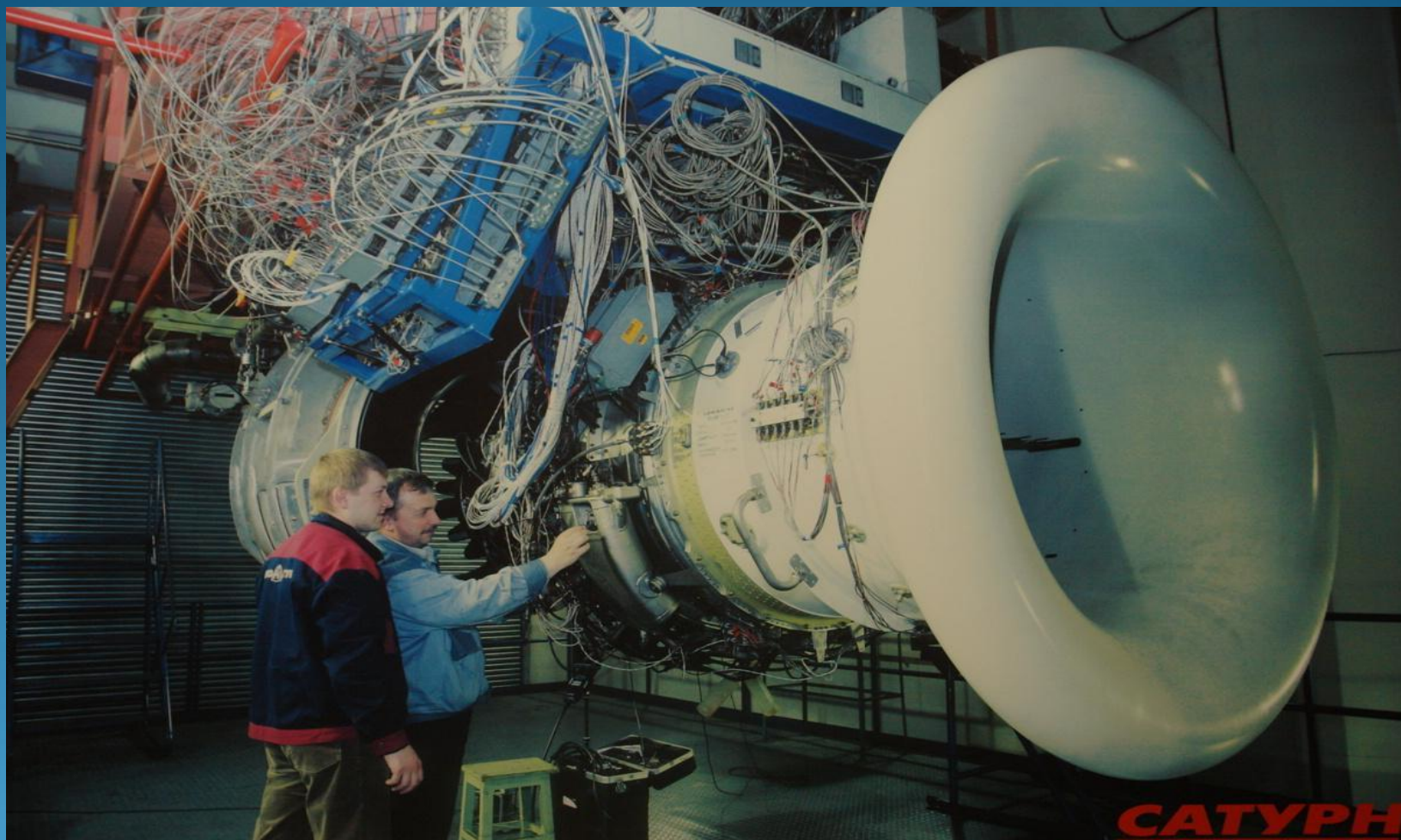
**Испытательные
стенды
(внешний вид)**



**Зал подготовки ГТД
к испытаниям.
Стапеля для
крепления
двигателя**



**Испытательный
стенд со
смонтированным
двигателем**



Обслуживание двигателя на испытательном стенде



Пульт контроля и управления



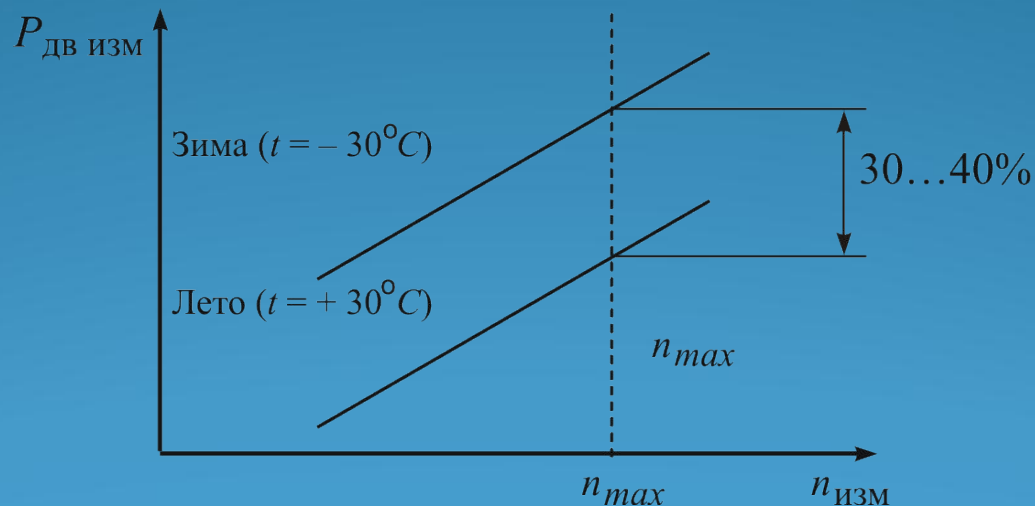
Стенд для испытания ГТД наземного применения

Конструкцию и функционирование стендовых устройств для измерения различных параметров ГТД изучают на лабораторных работах.

Основная задача испытаний ГТД на таких стендах – это определение ОТД двигателя.

ОТД – это те параметры и характеристики ГТД по которым судят о его соответствии ТУ и контролируют качество сборки.

К числу важнейших основных параметров ГТД, входящих в состав ОТД, у газотурбинных двигателей относят габариты и массу двигателя, а также $P_{дв}$ ($N_{э}$ или N_e), $C_{уд}$ ($C_{э}$, C_e), $G_{в}$ $лк$, $G_{т}$ час, n и термодинамические параметры потока.



Измеренная по физическим параметрам дроссельная характеристика ГТД

НОРМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГТД

Если построить **дроссельную характеристику** авиационного ГТД, снятую в САУ, то, для определения его ОТД и сопоставления их со значениями, заданными в ТУ, на ней требуется выделить конкретные режимы, оговоренные в ТУ (например, взлетный, мах. продолжительный и др.). Кроме этого, в типовых ТУ, например, для ТРДД, обычно оговариваются, например для взлетного режима следующие ограничения ($H_{п} = 0$, $M_{п} = 0$, САУ):

$R_{дв\ взл} = 161,83 \text{ кН (16 500 кгс)}$; $S_{уд} \leq 39,2 \text{ кг/кН ч (0,38 кг/кгс ч)}$; $T^*_{т} = 846 \text{ К} + 10 \text{ К}$.

Найденные значения всех ОТД испытанного двигателя должны соответствовать тому случаю его испытания в САУ, когда регулирующие органы находятся в позиции соответствующей их отладке на заданную для данного режима техническими условиями норму тяги (161,83 кН).

Такие параметры двигателя принято называть **нормальными**.

Нормальные значения параметров ГТД должны удовлетворять ограничениям оговоренным ТУ т.е. $T^*_{т\ норм} \leq T^*_{т\ max}$; $S_{уд\ норм} \leq S_{уд\ max}$ доп .

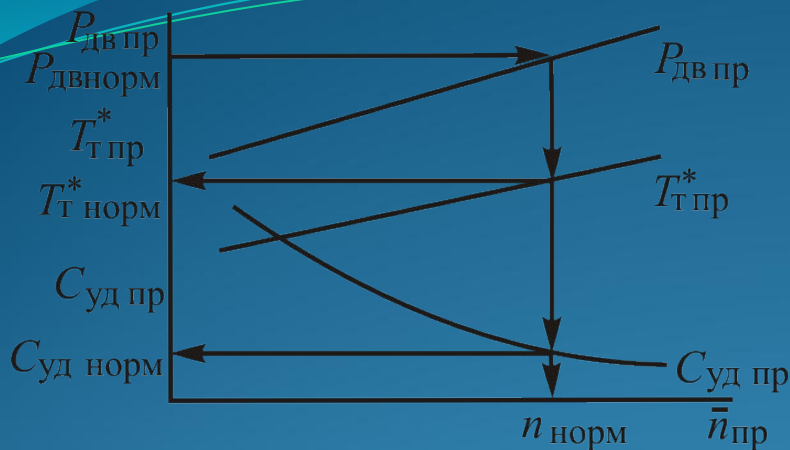
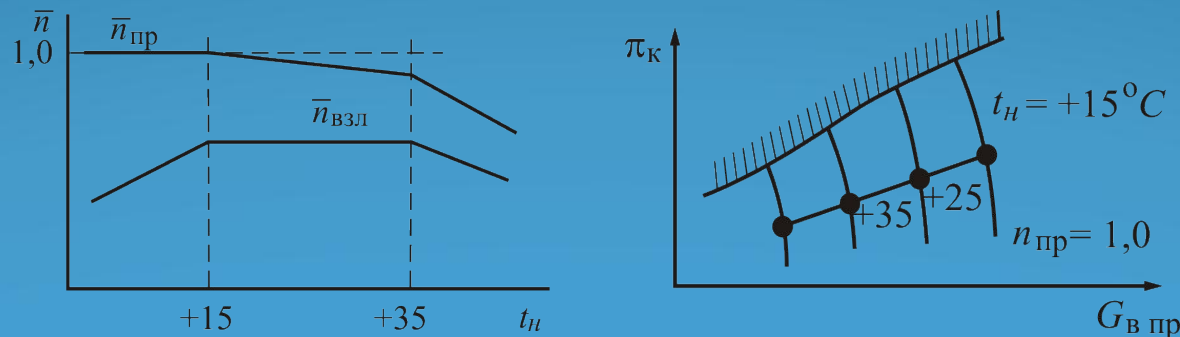


Схема определения нормальных значений параметров ТРДД (ТРД)

Нормальными значениями параметров (НЗП) называют параметры двигателя замеренные в САУ при заданной норме тяги (или мощности) для данного режима, т. е. параметры замеренные на данном режиме в конкретных атмосферных условиях и пересчитанные к САУ с учетом закона управления двигателя.

Однако непосредственное определение НЗП с приведенной дроссельной характеристики не всегда бывает возможным. Пример представлен на рисунках:



К определению НЗП с учетом закона управления двигателя

В таких случаях приходится использовать особый метод определения НЗП с помощью специальных коэффициентов пересчета, определяемых по результатам испытаний аналогичных двигателей в САУ. Существуют несколько способов определения НЗП:

- путем испытания ГТД на режимах подобных его работе в САУ;
- путем использования заранее вычисленных специальных коэффициентов пересчета параметров ГТД к НЗП (т.е. нормализующих коэффициентов);
- путем использования заранее вычисленных специальных коэффициентов пересчета параметров ГТД к НЗП (т.е. нормализующих коэффициентов).
- путем обеспечения стендовыми системами заданных значений $t^*_{вх} = t^*_н = t_{ГУ}$, $p^*_{вх} = p^*_н = p_{ГУ}$, $M_{п} = M_{ГУ}$.

В последнем случае требуются дорогие и сложные сооружения – аэродинамические трубы и термобарокамеры (ТБК)

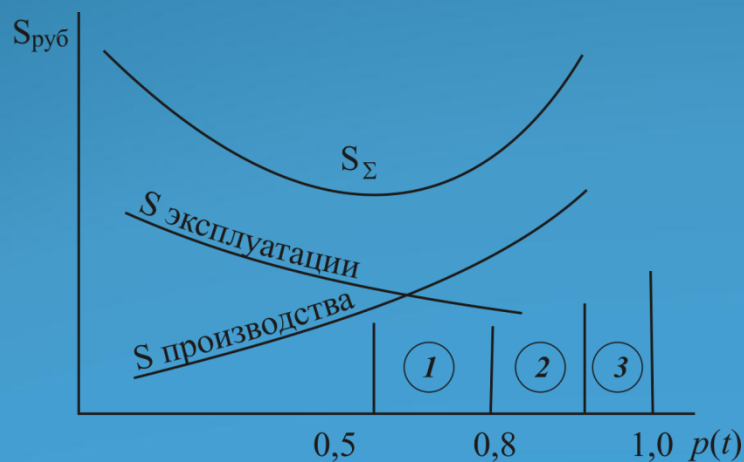
РЕСУРСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГТД

Надежность и **ресурс** ГТД являются составляющими более общего показателя ГТД- качества.

Под **надежностью авиационных ГТД** чаще всего понимают только узкое понятие – его **безотказность** в работе, т.е. свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в течении всего заданного срока службы в заданных условиях эксплуатации. Безотказность в работе у авиационных ГТД весьма высокая. Так, например, по статистике ИКАО из 100 % авиационных катастроф за последние 15 лет, менее 10 % произошли за счет отказа двигателей.

Под **ресурсом** подразумевается обычно – срок службы двигателя между ремонтами в газочасах. Величина ресурса входит в состав ОТД двигателя.

Следует различать возможные и рациональные значения надежности и ресурса:



К формулированию оптимальной
вероятности

безотказной работы:

1 – бытовая техника; 2 – авиация; 3 – космос

Назначенным ресурсом двигателя (или его детали – напр. лопатки, диска) называют ожидаемую (расчетную) величину суммарной наработки до некоторого его предельного состояния, при достижении которого эксплуатация должна быть прекращена независимо от состояния ГТД.

Такое понятие ресурса может быть удовлетворительно описано физическими или статистическими моделями только для отдельных деталей ГТД. Когда же переходят от элемента двигателя к такой сложной системе как ГТД, включающей в себя многие элементы с разнообразными процессами их нагружений, то понятие назначенного ресурса становится менее определенным. Поэтому его принимают равным минимальному значению назначенного ресурса у тех **основных деталей ГТД**, которые не подлежат замене.

В НЛГС «основными деталями» ГТД называют детали, разрушение, или последствия разрушения, которых могут привести к катастрофическим последствиям. К таким отказам относятся:

- **разрушение элементов ротора, обломки которых не удерживаются внутри корпуса;**
- **нелокализованные пожары;**
- **невозможность выключения двигателя.**

К основным деталям, лимитирующим ресурс, чаще всего относятся **рабочая лопатка турбины ВД и диск последней ступени турбины НД**

Межремонтный ресурс – это ресурс определяемый временем наработки, в течение которого целесообразно (экономически) и допустимо (по надежности) использовать двигатель в данных условиях эксплуатации

При назначении ресурса ГТД важнейшим моментом является правильный учет взаимосвязи между величиной ресурса и надежностью. Эффективность системы установления ресурса определяется с помощью модели оптимизации ресурса ГТД, которая формулируется следующим образом: «экономическая эффективность ресурса должна быть максимально возможной:

$$S(\tau) \rightarrow \max \text{ при } \Phi_1(\tau) \geq \Phi_0,$$

где $S(\tau)$ – экономическая эффективность использования данного ресурса (которую следует максимизировать);

Φ_1 – критерий характеризующий выполнение ГТД своих функций с требуемой надежностью;

Φ_0 – предельно-допустимый уровень критерия Φ_1 ;

τ – величина ресурса, являющаяся в данном случае зависимой переменной.

Однако аналитическое установление оптимального ресурса является чрезвычайно трудной задачей.

Экспериментальная доводка опытных ГТД до 150-часового ресурса

На практике для того, чтобы достигнуть оптимального ресурса используют различные виды испытаний ГТД. На ранних этапах доводки ГТД при небольших его ресурсах, когда суммарная наработка газочасов невелика, испытания ГТД ведут на первоначальный типовой ресурс: $\tau_0 = 150$ часов.

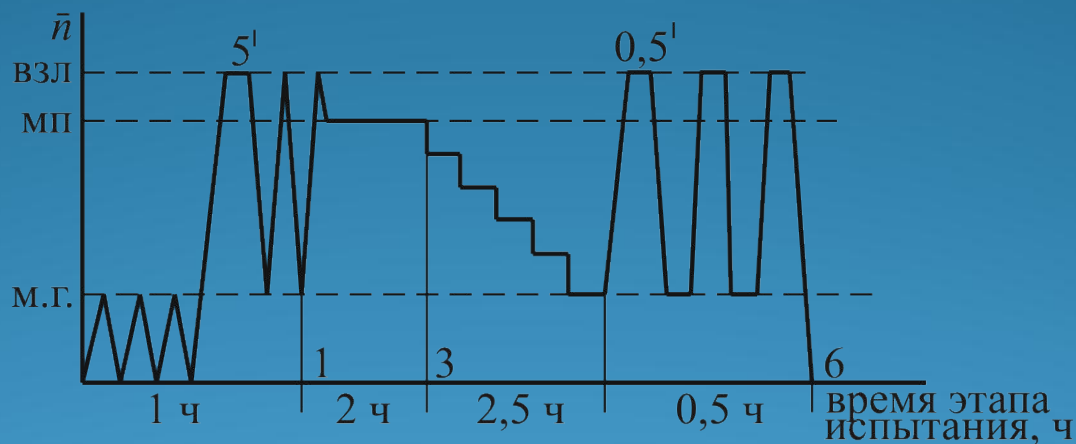
В процессе такой доводки ГТД решаются 2 основные задачи:

1. Идентификация опытных образцов ГТД с их проектными математической моделями для внесения при необходимости изменений в конструкцию чтобы обеспечить получение запроектированных характеристик и свойств двигателя.
2. Выявление слабых мест, неудачных конструктивных и технологических решений и их устранение.

Современными прогрессивными методами ускоряющими доводку являются

- а) поузловая доводка ГТД, параллельно с доводкой двигателя в целом;
- б) опережающая отработка газогенератора.

Типовое 150-часовое длительное испытание по проверке надежности двигателя и его пригодности к летной эксплуатации (по программе ЭЦИ – она эквивалентна приблизительно 600-часовой эксплуатационной программе) проводится этапами по 6 ч в зависимости от назначения ГТД и особенностей эксплуатации ЛА как показано на рисунке:



По окончании испытания двигатель разбирают и контролируют состояние деталей. Если во время испытания и по результатам дефектации деталей отклонений от ТУ не наблюдалось, дается положительное заключение о годности двигателя к началу летной эксплуатации.

Эксплуатационные испытания с опережающей наработкой ресурса на самолетах-лидерах

Цель таких испытаний – доводка ГТД на увеличенный ресурс. Они проводятся на самолетах-лидерах .



Грузовой самолет-лидер ИЛ-76

Этапы эксплуатационных испытаний на самолетах-лидерах:

1. После отработки «первыми» двигателями установленного ресурса до 1 капитального ремонта (1-го межремонтного ресурса – t_{m1}) они снимаются с самолетов, и отправляются в ремонт, а некоторые из них (2 – 4) разбирают для дефектации.

2. В дополнение к этому на 1 – 2 выработавших ресурс двигателях без разборки проводят стендовые испытания продолжительностью Δt , где Δt – разница между действующим и увеличенным ресурсом (100...300 часов, а чаще 10 % t_{m1}). По окончании этих испытаний двигатели также разбирают и проводят дефектацию деталей.

3. При положительных результатах дефектации дается разрешение на летную эксплуатацию на самолетах-лидерах остальных двигателей до выработки увеличенного на величину Δt ресурса.

4. После выработки увеличенного ресурса все двигатели лидерного самолета дефектируют, а один из них без разборки нарабатывает на стенде еще 10...20 % от Δt .

Положительные результаты таких испытаний и удовлетворительное состояние деталей позволяют разрешить увеличенное (фиксированное) значение ресурса для всех двигателей данной модификации.

Стендовые ускоренные испытания по доводке и проверке ресурса ГТД

Рассмотренным выше методом повышения ресурса ГТД при эксплуатации непосредственно на ЛА присущ тот недостаток, что эти испытания получаются сильно растянутыми во времени. Так для налета 3000 часов ресурса летной эксплуатации требуется больше 1 года.

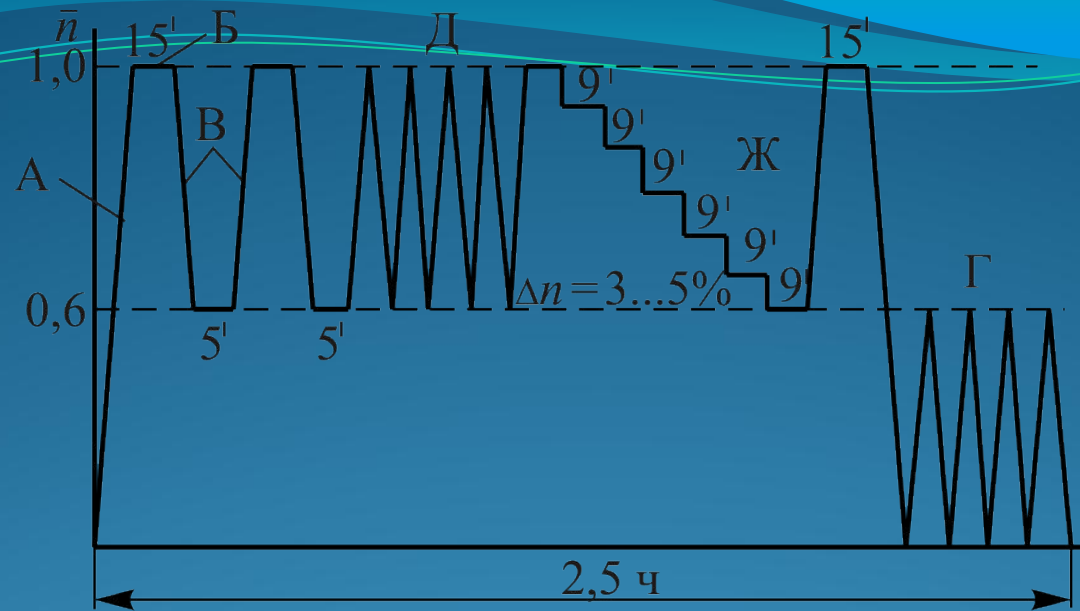
Разработанные на сегодня программы **эквивалентно-циклических испытаний** позволяют **сокращать** длительность доводочных ресурсных испытаний в **4 – 7 раз**, а при больших ресурсах ГТД (до 10 000..15 000 ч) в **10 – 15 раз**.

Основой для разработки такого испытания является осредненный полетный цикл, представляющий собой изменение во времени давления и температуры воздуха на входе в двигатель, частот вращения роторов, тяги, расхода топлива и других параметров, характеризующих режимы работы двигателя на самолете. На основании полетного цикла разрабатываются испытательный цикл.

Выделяют три основных принципа составления программы эквивалентно-циклических испытаний ГТД:

1. Увеличивается наработка двигателя на более нагруженных режимах (взлетный или максимально-продолжительный).
2. Вводится наработка на резонансных частотах, обеспечивающая при этом так же подтверждение достаточной усталостной прочности.
3. Проверка на малоцикловую усталость (повторные статические нагружения и теплосмены) обеспечивается полным воспроизведением переходных процессов (запусков, приемистостей и способов нагрузки, включения реверса и т.д.) с учетом коэффициента запаса по соответствию полетного и испытательного циклов.

С учетом различных прочностных факторов программа эквивалентно-циклического испытания должна состоять из небольших этапов, в каждом из которых проверяется влияние всех определяющих ресурс факторов. Например, этап длительностью 2,5 часа повторяют 100 раз с остановками на 2...3 часа (для остывания – прогрева) и получают результат эквивалентный 1500 часовой программе длительного испытания.



ЭЦИ
 позволяют в
 короткие сроки
 выявить
 основные
 дефекты ГТД,
 проверить
 мероприятия
 по их
 устранению и
 оценить ресурс
 двигателя!

Типовой этап программы ЭЦИ

А – холодный запуск с выходом на взлет;

Б – работа на взлетном режиме;

В – сброс газа и приемистость;

Г – повторные запуски;

На этих участках в основном
 проверяется долговечная
 прочность и малоцикловая
 усталость (повторные
 статические нагрузки и
 теплосмены) малоцикловая
 усталость

Д – повторные приемистости (7 приемистостей);

Ж – резонансные площадки для проверки
 режимов двигателя на резонансные напряжения
 (проверка на выносливость).

Циклические испытания ГТД

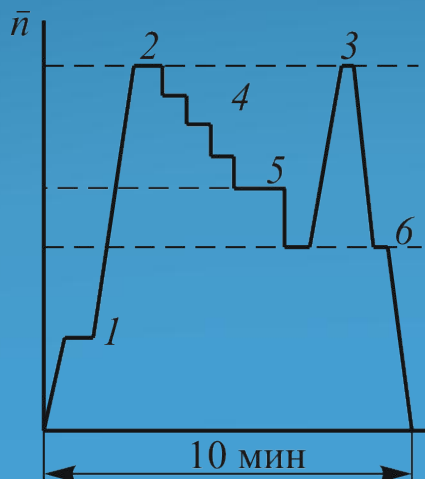
Для проверки прочности элементов горячей части и роторов ГТД при малоцикловой усталости широко используются циклические испытания. Малая продолжительность цикла нагружения позволяет воспроизвести их за короткое время много тысяч раз. Число циклов испытаний определяется как

$$N_{\text{исп}} = C N_{\text{рес}} / \eta,$$

где $N_{\text{рес}}$ – число циклов за проверяемую циклическими испытаниями величину ресурса;

C – запас по числу циклов;

η – коэффициент соответствия эксплуатационного и испытательного цикла (при циклических испытаниях не детали, а двигателя $\eta = 1$).



**Вариант
испытательного цикла:**
1 – земной малый газ; 2 –
взлетный режим; 3 –
реверсирование тяги;
4 – крейсерские режимы;
5 – режим снижения;
6 – полетный малый газ

ДОВОДОЧНЫЕ СПЕЦИСПЫТАНИЯ ГТД

Специспытания это особый вид испытаний ГТД на всякого рода предельные характеристики при оценке надежности двигателей. Объем специальных испытаний, которым подвергают ГТД в последние годы, значительно возрос. На сегодня насчитывается уже свыше 30 видов стендовых специспытаний ГТД и свыше 10 видов – летных, а в 50-х годах было всего только 8–10 видов специспытаний).

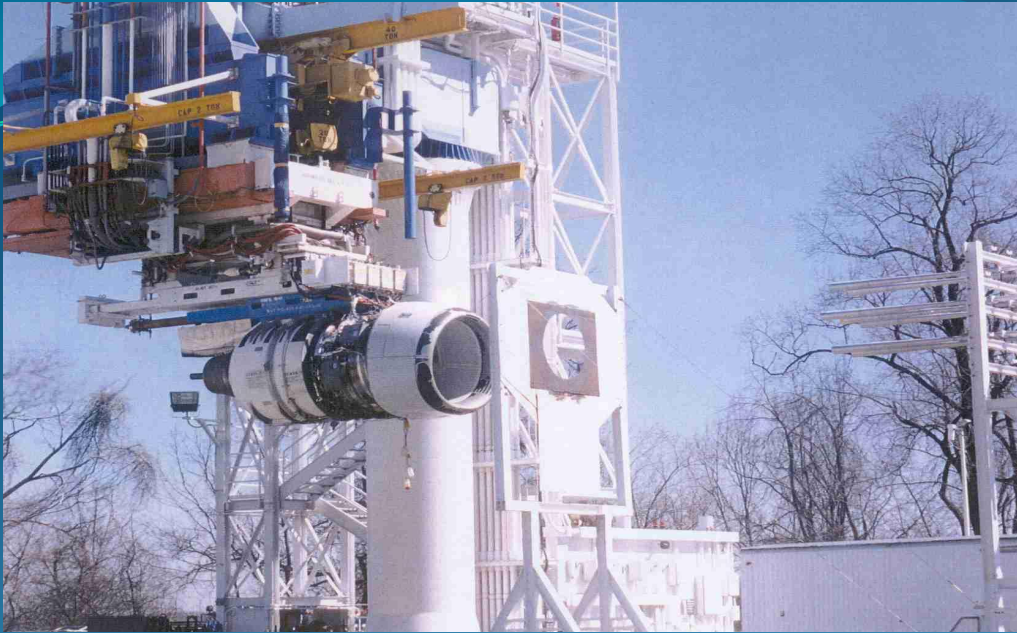
- сюда входят: тензометрированию важнейших элементов ГТД;
- проверка работоспособности горячей части;
- испытания по проверке запасов газодинамической устойчивости;
- испытания по проверке вибрационного состояния ГТД;
- акустические испытания;
- испытания по контролю эмиссии выхлопных газов;
- испытания при подогреве масла до t_{max} и давлении p_{min} ;
- испытания при подогреве топлива до t_{max} ;
- в условиях ливневого дождя, обледенения, на попадание птиц и т.п.



**Установка имитации
бокового ветра**



**Оборудование
открытого
испытательного стенда
для испытания ГТД с
турбулентностью на
входе для оценке запасов
ГДУ**



**Испытание на
обледенение**