

# Испытания композитных материалов и конструкций

Сапронов Дмитрий Владимирович

## Структура курса

№	Тема	Виды занятий, часы			
		Л	С	ЛР	СР
1	Основные понятия и определения, виды испытаний, этапы и последовательность их проведения	6	6		10
2	Методы и средства воспроизведения тепловых нагрузок и измерения при тепловых испытаниях	11	11	17	47

## Рекомендуемая литература

1. Геращенко О.А., Федоров В.Г. Техника теплотехнического эксперимента. Киев: Наукова думка, 1964. 156 с.
2. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М.: Мир, 1972. 386 с.
3. Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем /О.М. Алифанов, П.Н. Вабищевич, С.В. Резник и др.. М.: Логос, 2001. 400 с.
4. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 396 с.

**Лекция 1.** Структура дисциплины. Рекомендуемая литература. Основные понятия и определения. Теплонагруженные объекты ракетно-космической и авиационной техники. Роль тепловых испытаний в разработке ракетно-космической техники.

+

Виды тепловых испытаний: лабораторные исследования, стендовые испытания, летно-конструкторские испытания. Их взаимосвязь с этапами проектирования объектов ракетно-космической техники.

*Только серия неудачных экспериментов  
создаёт настоящего эксперта  
Э. Йокель*

**NASA: “Failure is not an option”  
(«Отказ невозможен»)**

**Pratt&Whitney: “Dependable engines”  
(«Надежные двигатели»)**

**Rolls Royce: “Теплопрочностные испытания  
составляют более 80 % от общего объема испытаний  
при создании двигателя”**

# Внешние нагрузки, действующие на ЛА и их системы

№	Действующие факторы	Предстартовая подготовка	Старт	Выведение и разделение ступеней	Орбитальный полет	Вход в плотные слои атмосферы	Посадка
1	Атмосферное давление	+	+				+
2	Аэродинамический нагрев			+		+	
3	Акустическое нагружение		+	+		+	
4	Вибрации		+	+		+	+
5	Ударные нагрузки		+	+		+	+
6	Химическое воздействие	+	+				
7	Дождь/снег/пыль ...	+	+				+
8	Вакуум, захлаживание				+		
9	Солнечная радиация				+		
10	Невесомость				+		

Естественные факторы - климатические условия, искусственные – результат функционирования ЛА (тепловые и механические нагрузки, возникающие из-за работы двигателей и аэродинамического нагрева; пневматические и электрические...)

# Особенности тепловых режимов в ракетно-космической технике

Конструкция	$q_w \cdot 10^{-4} / \eta,$ Вт/м <sup>2</sup>	$\tau, \text{с}$	$T_{\min} - T_{\max}, \text{К}$	$S, \text{м}^2$
Силовые элементы орбитальных космических платформ, станций, систем связи	$\frac{0,14}{1}$	$(1-5) 10^8$	120–420	$10-10^6$
Солнечный парус	$\frac{2,24}{1}$	$10^8$	120–700	до $10^8$
ТЗП воздушно-космических самолетов	$\frac{\text{до } 50}{\text{до } 0,1}$	$1 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$	20–2500	$10-10^3$
ТЗП межорбитальных транспортных аппаратов	$\frac{\text{до } 10^2}{\text{до } 0,9}$	$10^2$	120–2500	$10^2-5 \cdot 10^3$
Сопловые блоки ракетных двигателей	$\frac{\text{до } 10^3}{0,1}$	$10^2$	2500–4000	1–5
Головные части баллистических ракет	$\frac{\text{до } 10^3}{0,1}$	$10-10^2$	2000–4000	0,5–1

**Примечание.**  $\eta = q_{w,R} / q_{w,\Sigma}$ ,  $q_{w,\Sigma} = q_{w,R} + q_{w,C}$ , где  $q_{w,R}$ ,  $q_{w,C}$  – соответственно плотности падающих радиационных и конвективных тепловых потоков

# Особенности тепловых режимов в ракетно-космической технике (продолжение)

## ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА УСЛОВИЙ ТЕПЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ



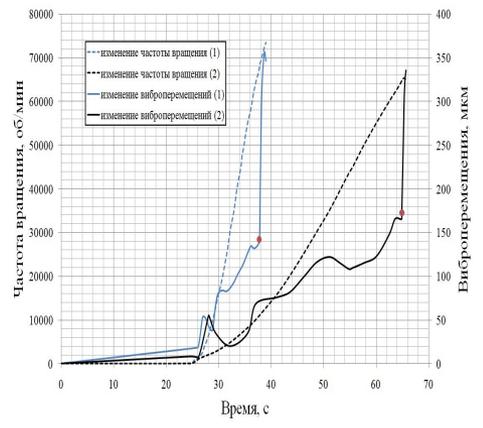
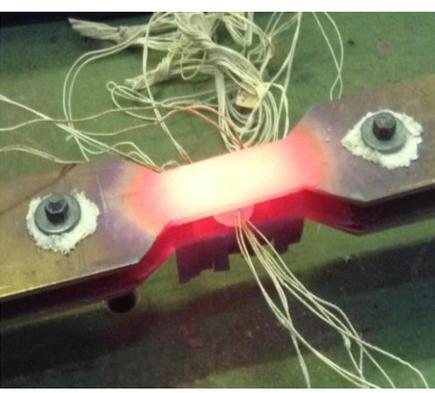
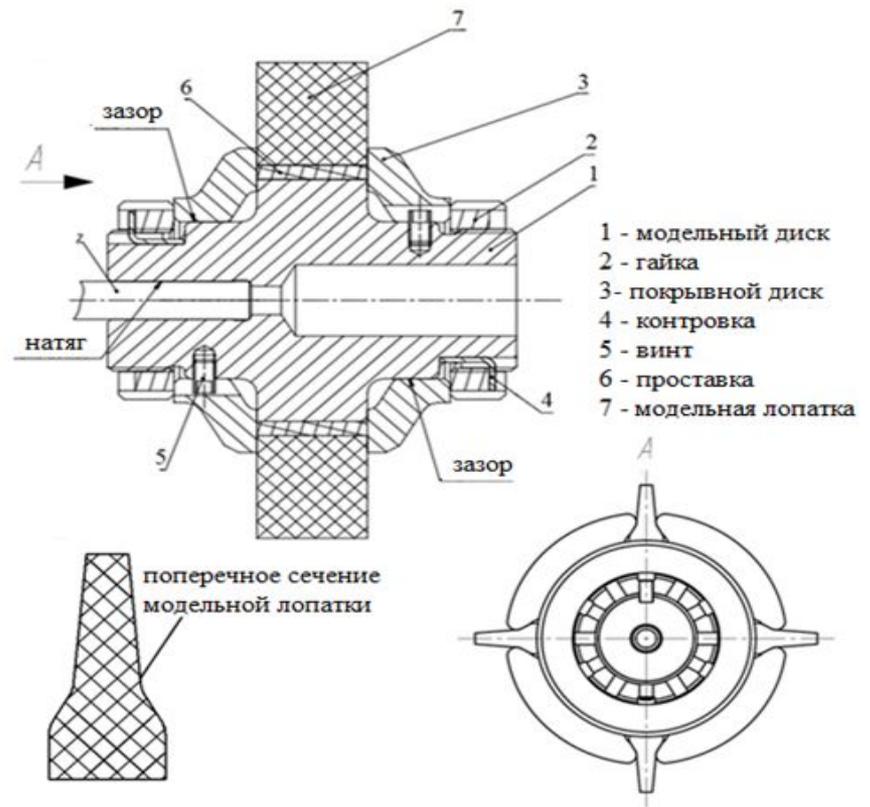
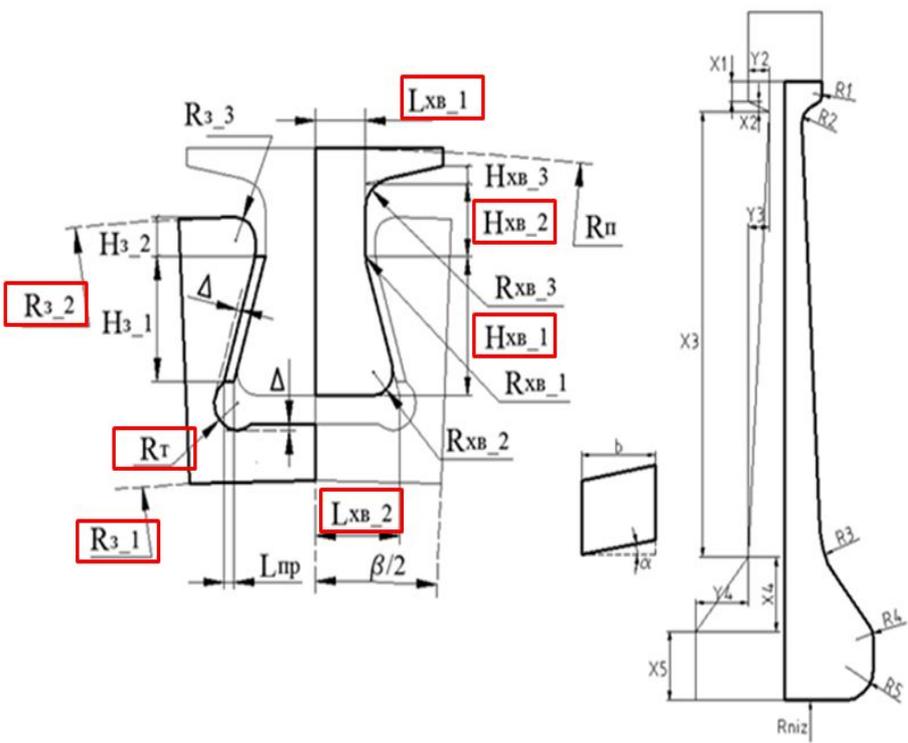
# Развитие АГТД, материалы

ПОКОЛЕНИЕ							
	1	2	3	4	5	6	7
тип	ТРД(Ф)	ТРД(Ф), ТВД	ТРДД (m=2), ТРДД(Ф) (m=1)	ТРДД (m=6), ТРДД(Ф) (m=2.5)	ТРДД (m=6), ТРДД(Ф) (m<1)	ТРДД (m=20), ТРДД(Ф) (m<0.5), ТВВД (m>25)	Двигатели изменяемог о рабочего процесса
компрессор	одновальный , Пк=5	двухвальный, Пк=13	двухвальный, Пк=20	двухвальны й, Пк=35	двухвальный, Пк=50	двухвальный, Пк=80; редукторный привод вентилятора	
турбина	неохлаждаем ая, T=1150 К	неохлаждаем ая, T=1250 К	охлаждаемая , T=1450 К	охлаждаема я, T=1650 К	охлаждаемая, T=1850 К	охлаждаемая, T=2100 К	
материалы	сталь, алюминий, магний	сталь, жаропрочные сплавы, алюминий	сталь, жаропрочные сплавы, титан	титан, жаропрочны е сплавы, углепластик	термопрочные сплавы, ККМ, в холодной части интерметаллиды и углепластик	термопрочные сплавы, ККМ, во всех частях интерметалли ды	ККМ, интерметал лиды

# Конструкции перспективных двигателей с ККМ



Перспективные технологии компании General Electric:  
а – лопатка вентилятора из ПКМ; б – высоконагруженный КВД;  
в – камера сгорания TAPS; г – жаровая труба из ККМ;  
д – лопатка СА из ККМ



## Уровни обеспечения технологической готовности разработчика

Технологическая готовность узлов и систем		Технологическая готовность к производству всего двигателя	
Поисковые НИР	Прикладные НИР	Демонстрация технологической готовности	Техническая разработка и ввод в эксплуатацию
<p>1. Фундаментальные принципы прорывных технологий.</p> <p>2. Концепция и выбор варианта технологии.</p> <p>3. Расчетное и экспериментальное обоснование эффективности технологии.</p>	<p>4. Испытание модели на экспериментальных установках.</p> <p>5. Испытания модели на натуральных стендах.</p>	<p>6. Испытания демонстрационного двигателя на стендах.</p>	<p>7. Испытания опытного двигателя на стендах.</p> <p>8. Лётно-конструкторские испытания.</p> <p>9. Сертификационные испытания.</p> <p>10. Серийное производство и эксплуатация.</p>

1. - 4. – НИР (научно - исследовательские работы)

5. - 6. – НИОКР (научно - исследовательские и опытно - конструкторские работы)

7. - 9. – ОКР (опытно-конструкторские работы)

1. – Концепция двигателя; 4. – Техническое Предложение; 6. Техническое Задание; 7. Уточненное Техническое задание.

# Экспериментальные исследования авиадвигателей

Подтверждение методов расчета

Проверка в трудно поддающихся расчетам условиях

Сертификационные, в том числе ресурсные, испытания

Формирование банка данных по различным характеристикам материалов

Исследование причин дефектов

Оптимизация конструктивно-технологических решений

Отработка методов и средств диагностики технического состояния деталей двигателей

Испытания проводятся на всех стадиях жизненного цикла изделий



# СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ УЗЛОВ ДВИГАТЕЛЯ

## Основные задачи (примеры)

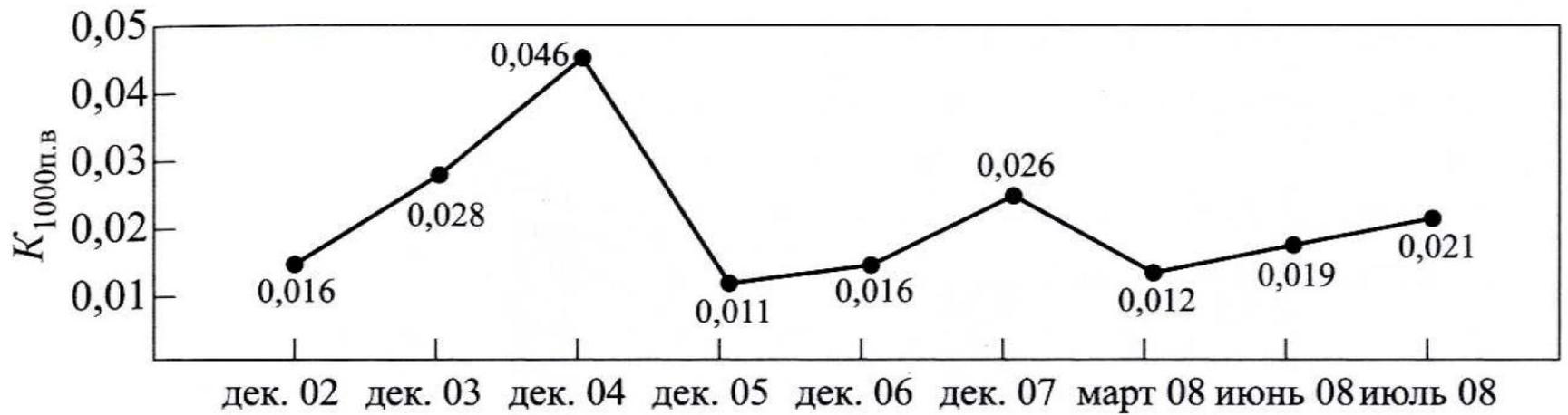
- испытания на режимах при пониженных давлениях и температурах;
  - оценка аэродинамики проточной части;
- исследование теплового состояния деталей и эффективности систем охлаждения;
- исследование прочности;

ВЕНТИЛЯТОР И КОМПРЕССОР	КАМЕРА СГОРАНИЯ	ТУРБИНА
Аэродинамические характеристики	Эффективность горения	Определение гидравлических сопротивлений в решетках
Скорость потока	Границы срыва пламени	Определение газодинамической эффективности
Акустические характеристики	Тепловое состояние жаровой трубы	Исследование теплового состояния и проверка жаростойкости лопаток
Прочностные испытания	Индекс эмиссии загрязняющих веществ	
	Прочностные испытания	Прочностные испытания

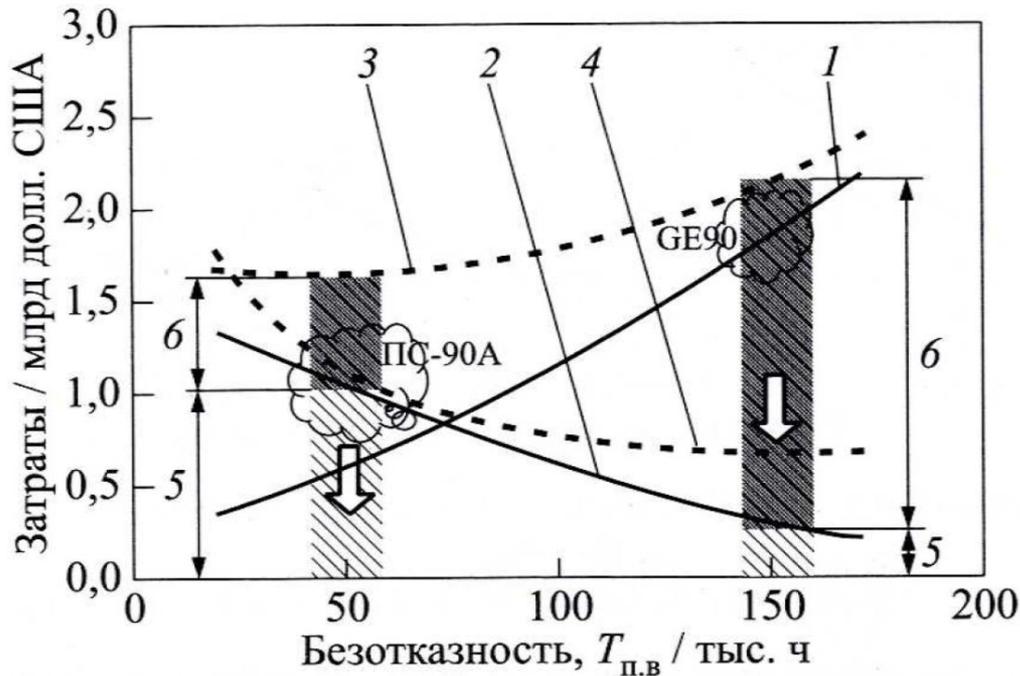
# СЕРТИФИКАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

## Основные задачи (примеры)

1. Проверка температурного поля за турбиной.
2. Исследование теплового состояния деталей и эффективности систем охлаждения.
3. Определение уровня вибраций в узлах.
4. Оценка повреждаемости при попадании частиц льда, града и птиц.
5. Оценка уровня шума.
6. Определение осевых нагрузок на подшипник.
7. Проверка газодинамической устойчивости работы.
8. Проверка работоспособности при кратковременном превышении частоты вращения.
9. Проверка надежности датчиков САУ и систем блокировки.



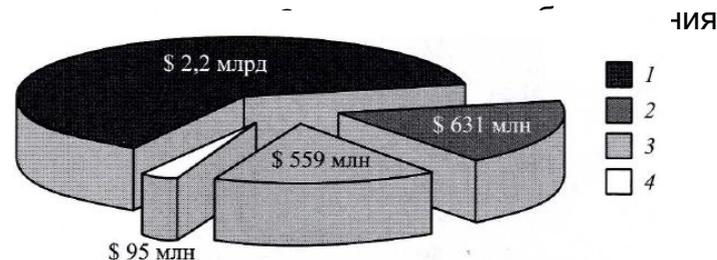
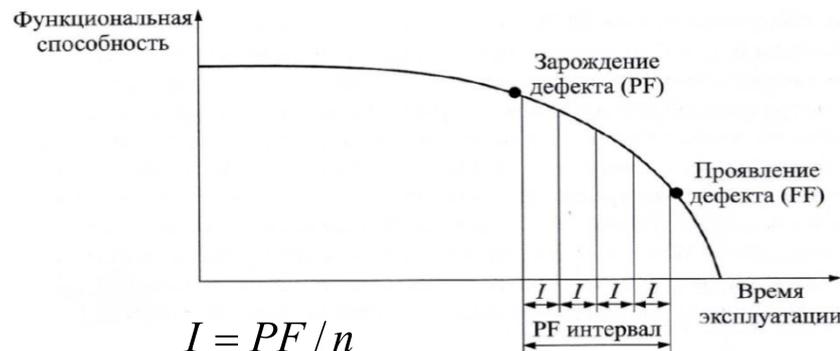
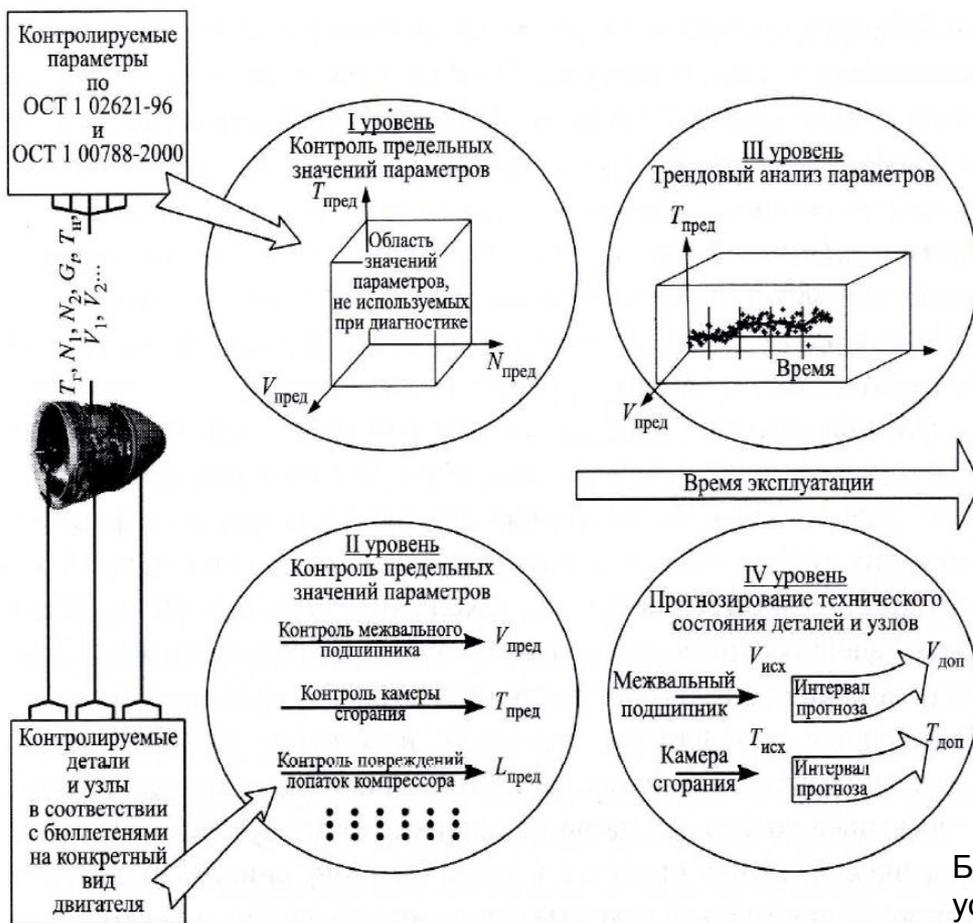
Значения коэффициента выключения двигателя в полете на 1000 ч наработки



теты Ил-96, Ту-204)

- 1 – затраты на разработку двигателя;
- 2 – затраты на техническое обслуживание;
- 3 – затраты разработка + обслуживание;
- 4 – затраты на обслуживание в случае трехкратного продления ресурса;
- 5 – затраты на техническое обслуживание двигателей ПС-90А (самолеты Ил-96, Ту-204) и GE90 (самолет Boeing 777);
- 6 – затраты на ремонт двигателей ПС-90А (самолеты Ил-96, Ту-204) и GE90 (самолет Boeing 777).

1-ое поколение (1960-70)	2-ое поколение (1980-2000)	3-ее поколение (2000-... 2020)
Эксплуатация по фиксированному ресурсу	Эксплуатация по состоянию	Эксплуатация по прогнозируемой надежности

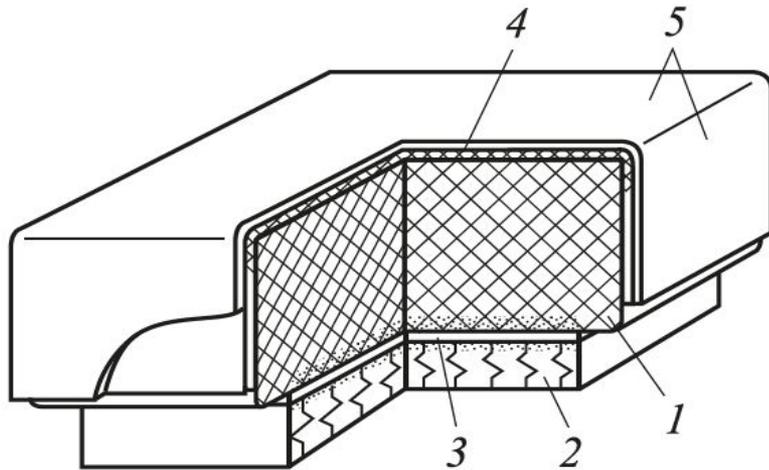


Бюджетные средства военной авиации США на силовые установки

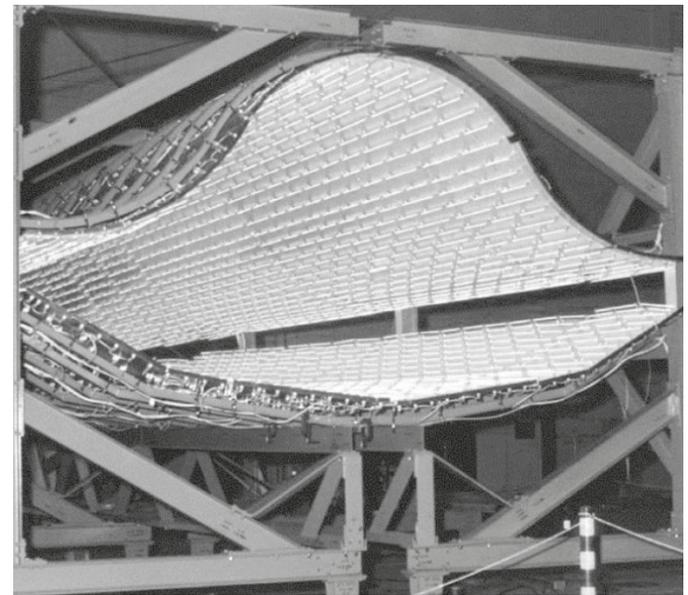
1 – поддержка в эксплуатации (62%); 2 – закупка (18%); 3 – разработка (16%); 4 – исследования и испытания (3%).



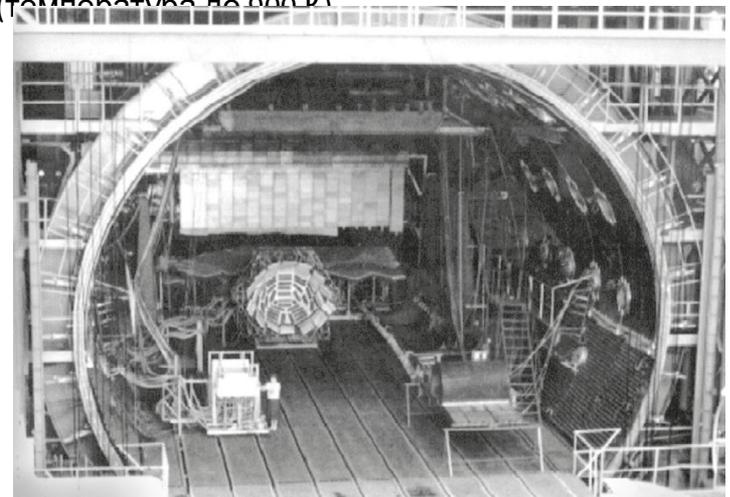
Орбитальная ступень системы «Энергия-Буран»



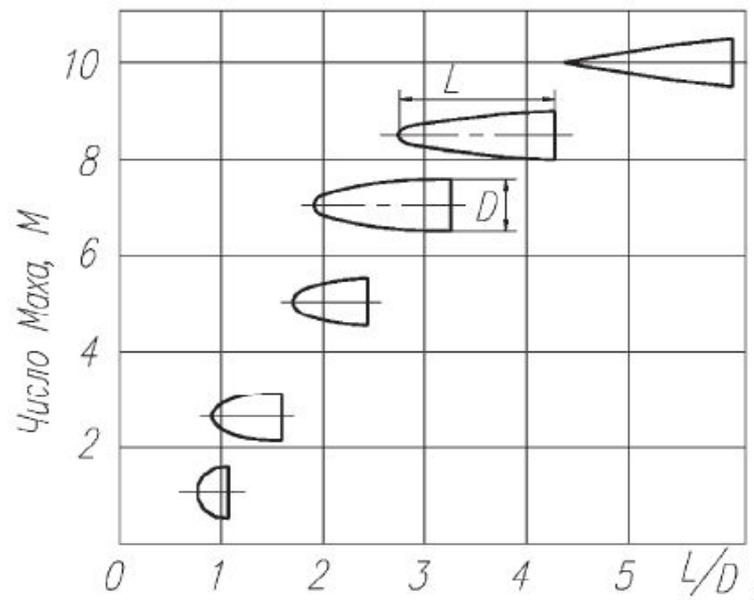
Плиточное ТЗП МКА «Space Shuttle»: 1 – плитка из спеченных кварцевых волокон; 2 – демпфирующая подложка; 3 – клеевой слой; 4 – эрозионно-стойкое покрытие из стекла; 5 – лаковое покрытие.



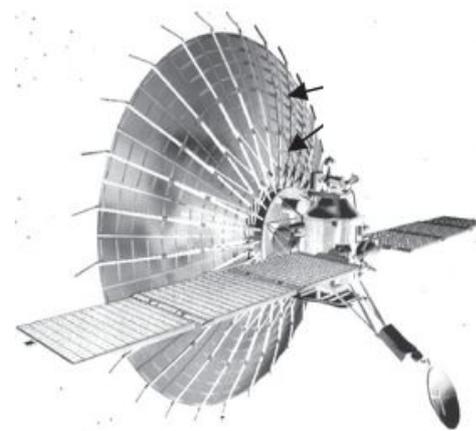
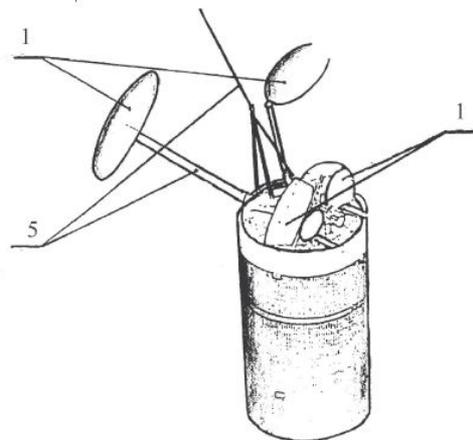
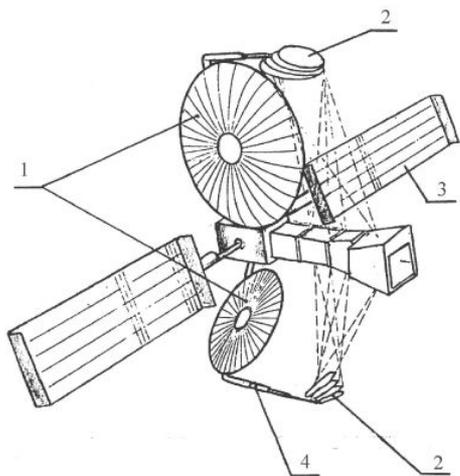
Установка для тепловых испытаний истребителя YF-12 (температура до 900 К)



Стенд комплексных тепловых испытаний МКА «Буран» (температура до 1750 К)



Головные обтекатели ракет



Стержневые элементы на спутниках связи  
 (1 – рефлекторы; 2 – контротрефлектор;  
 3 – солнечная батарея; 4 –  
 телескопическая штанга; 5 – мачта)