

МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра СМ13 «Ракетно-космические композитные
КОНСТРУКЦИИ»

Экспериментальные исследования образцов КМ и наземная отработка конструкций МКА

22.04.01 «Материаловедение и технология материалов»
24.04.01 «Ракетные комплексы и космонавтика»



Москва
2017

Виды испытаний

Испытанием изучения поведения объекта при том или ином внешнем воздействующем факторе или в том случае, если нет необходимого объема информации

называется комплекс работ по приведению системы в рабочее состояние с целью оценки каких-либо ее свойств.

Лабораторные исследования ориентированы на тщательное всестороннее изучение физических характеристик и стойкости материалов и покрытий.

Стендовые испытания проводятся с опытными элементами натуральных конструкций, узлами, агрегатами, макетами, масштабно уменьшенными моделями, а также с опытно-промышленными установками в условиях воспроизводящих (имитирующих) реальные эксплуатационные.

Летные испытания проводятся с натурными конструкциями в условиях реальной эксплуатации или вероятных экстремальных.

Виды испытаний

Испытание — опытное определение количественных и (или) качественных свойств предмета испытаний как результата воздействий на него, при его функционировании ([ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения](#)).

Различают следующие виды испытаний:

Лабораторные исследования ориентированы на тщательное всестороннее изучение физических свойств и стойкости материалов и покрытий.

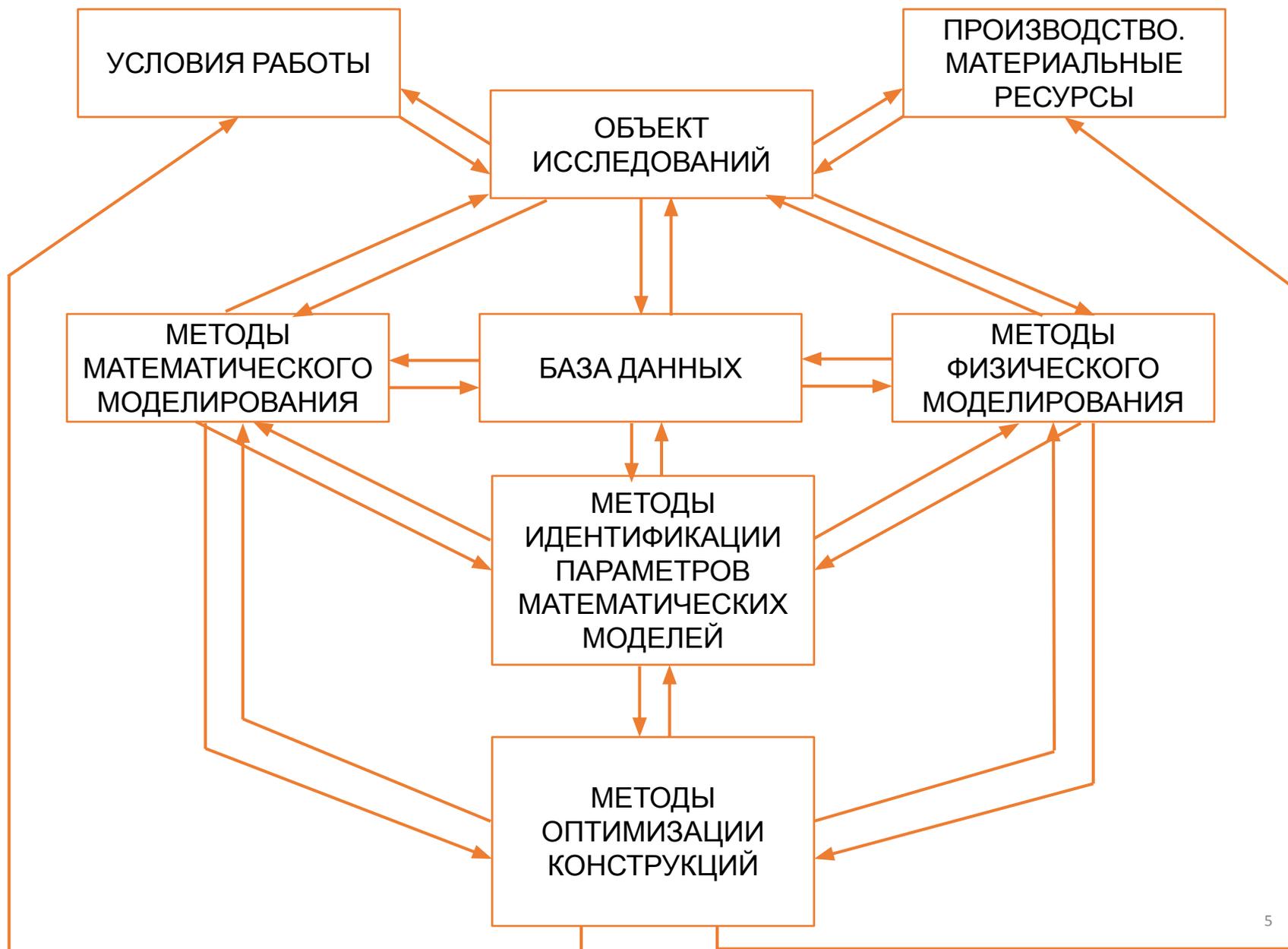
Стендовые испытания проводятся с опытными образцами натуральных аппаратов, их макетами, масштабно уменьшенными моделями и фрагментами, а также с опытно-промышленными установками в условиях воспроизводящих (имитирующих) реальные эксплуатационные.

Летные испытания представляют собой различные варианты физического моделирования, объектом которых служат опытные образцы натуральных конструкций, которые испытываются в реальных эксплуатационных условиях или вероятных экстремальных.

Этапы проектирования МКА

Этап проектирования	Вид испытаний	Предметная модель	Задачи
Техническое предложение (аванпроект)	Лабораторные исследования	Образцы материалов, покрытия, рабочие среды	Определение характеристик, определение стойкости (термической, радиационной, химической и др.)
Эскизный проект	Стендовые испытания	Элементы конструкций, узлы, агрегаты, масштабно уменьшенные модели, макеты	Проверка методов проектирования, проверка работоспособности
Технический проект	Стендовые и летно-конструкторские испытания	Натурные конструкции	Комплексная проверка конструкции и методов проектирования в реальных условиях эксплуатации и экстремальных

Схема комплексного моделирования и параметрической оптимизации



Математическая модель

♣ Математическая модель – совокупность понятий и отношений, выраженных при помощи системы математических символов и обозначений и отражающих некоторые свойства изучаемого объекта.

В сравнительно простом случае математическая модель технического объекта может представлять собой соотношение:

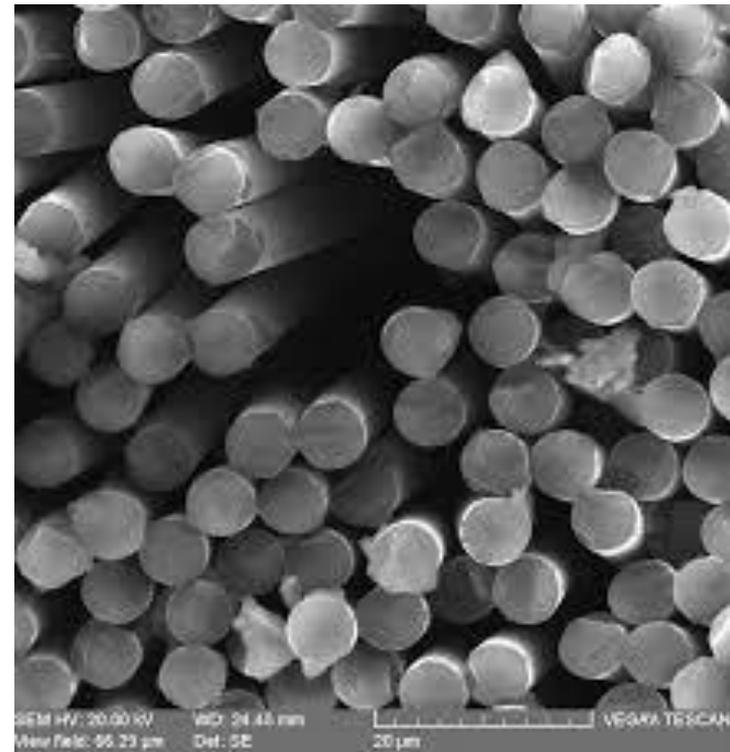
$$y = f(x, g), \quad x \in \mathbb{R}^k, \quad g \in \mathbb{R}^m, \quad y \in \mathbb{R}^n,$$

где f – векторная функция векторного аргумента. Такая модель легко позволяет вычислить выходные параметры по задаваемым значениям внешних и внутренних параметров, т.е. решить прямую задачу

Лабораторные исследования КМ

- Исследование микроструктуры материала
- Неразрушающий контроль элементов конструкции
- Определение теплофизических характеристик
- Определение оптических характеристик
- Определение механических характеристик

Исследование микроструктуры материала



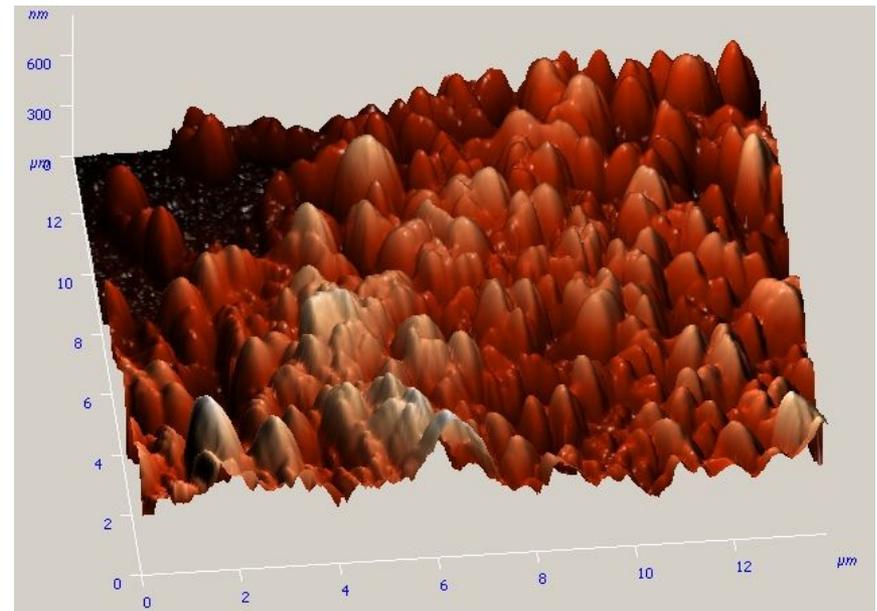
Электронно-оптический микроскоп FEI PHENOM; Снимок микроструктуры углепластика

Исследование микроструктуры материала



Рентгеновский настольный томограф высоких энергий SkyScan 1173

Исследование микроструктуры материала



Атомно-силовой микроскоп AFM NT MDT ; Снимок микроструктуры поверхности материала, выполненный атомно-силовым микроскопом

Неразрушающий контроль



Дефектоскоп OmniScan®, сканер GLIDER™, роликовый преобразователь RollerFORM™ и кодировщик Mini-Wheel.



Акустический дефектоскоп АД-60К

Механические испытания



Машина для проведения испытаний на растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг с высокой нагрузочной способностью



Машина для проведения испытаний на сжатие, изгиб и сдвиг с высокой нагрузочной способностью фирмы Instron

Теплоемкость [Дж/(кг · К)]

● Для вычисления количества теплоты, получаемой или отдаваемой системой при переходе из одного состояния в другое, используется понятие теплоемкости.

Удельной теплоемкостью называют количество тепла, которое нужно передать 1 кг вещества, чтобы повысить его температуру на 1К.

$$c = \frac{Q}{m\Delta T},$$

где c – удельная теплоемкость, Q – количество теплоты, полученное веществом при нагреве (или выделившееся при охлаждении), m - масса нагреваемого (охлаждающегося) вещества, ΔT – разность конечной и начальной температур вещества.

Теплопроводность [Вт/(м · К)]

- С макроскопической точки зрения явление теплопроводности заключается в переносе тепла от горячего слоя к холодному и продолжающемся до тех пор, пока температура во всем теле не выровняется.
- В молекулярно-кинетической же теории процесс теплопроводности объясняется тем, что молекулы из горячего слоя, где они имеют большую среднюю кинетическую энергию, проникая в холодную область, передают при столкновениях молекулам этой области часть их кинетической энергии.
- По закону Фурье количество тепла, переносимое за время dt через площадку dS , перпендикулярную оси X , пропорционально величине площадки, времени переноса и градиенту dT/dx температуры:

$$\delta Q = -\lambda \frac{dT}{dx} dS dt$$

где λ – коэффициент теплопроводности – количество тепла, переносимого в единицу времени через единичную площадку при градиенте температур, равном единице.

Коэффициент линейного термического расширения (КЛТР) [K^{-1}]

Коэффициент теплового линейного расширения — физическая величина, характеризующая относительное изменение объёма или линейных размеров тела с увеличением температуры на 1 К. Имеет размерность обратной температуры. Помимо линейного, различают коэффициенты объёмного расширения.

Материал	
Углепластик	0,8
Стеклопластик	6,7
Органопластик	-6,5

Температуропроводность [$\text{м}^2/\text{с}$]

● Физическая величина, характеризующая скорость изменения (выравнивания) температуры вещества в неравновесных тепловых процессах. Численно равна отношению теплопроводности к объёмной теплоёмкости при постоянном давлении.

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho},$$

где λ – теплопроводность; c_p – удельная теплоемкость; ρ – плотность исследуемого материала.

Определение удельной теплоемкости

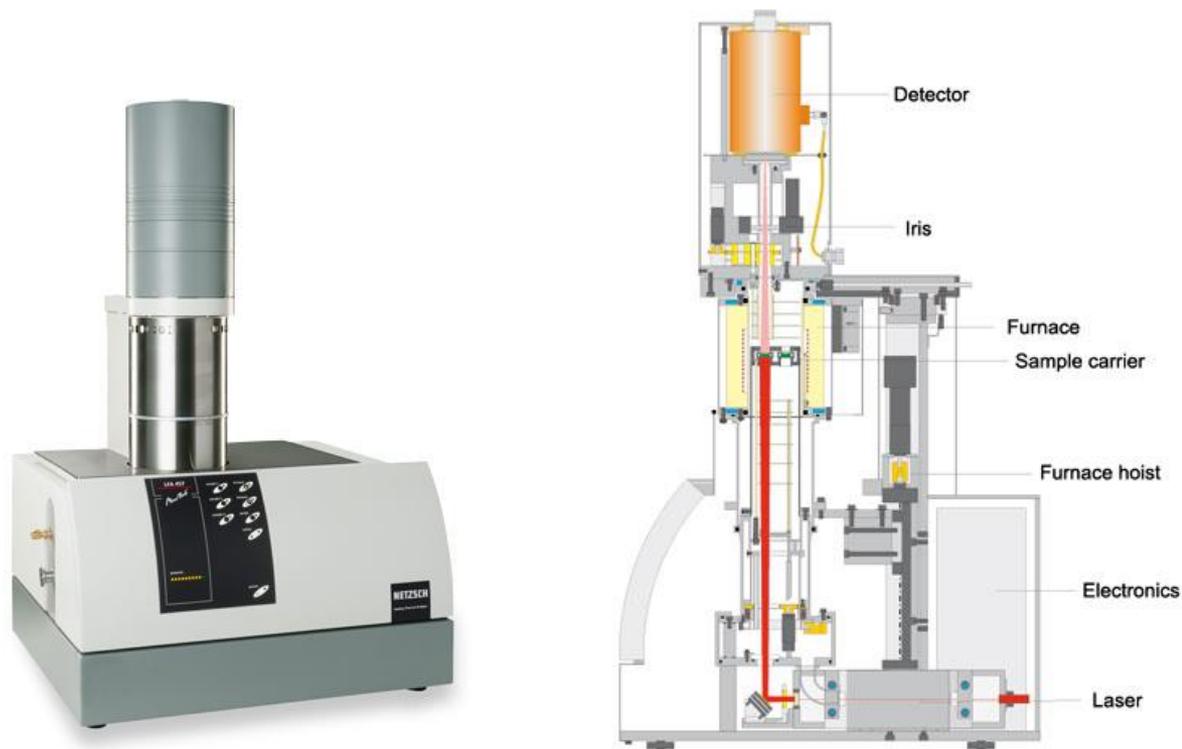


DSC 404 F1 Pegasus® –
высокотемпературный
дифференциально-сканирующий
калориметр



Реакционный
калориметр 244 (ARC®)

Измерение теплопроводности (температуропроводности)



Установка лазерной вспышки LFA 457 MicroFlash

Излучательная способность (степень черноты)

Коэффициент излучения (или степень черноты) – ε показывает отношение энергии теплового излучения «серого тела» согласно Закону Стефана Больцмана, к излучению «абсолютно черного тела» при той же температуре. Коэффициент излучения абсолютно черного тела $\varepsilon = 1$

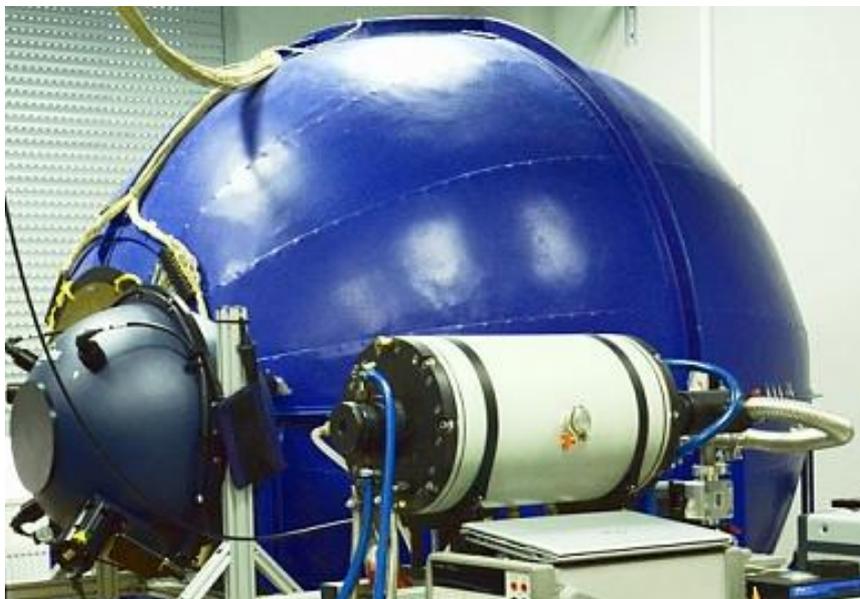
$$\varepsilon = \frac{A}{A_0}$$

где E – излучательная способность «абсолютно черного тела», E_0 – излучательная способность «серого тела».

«Серое тело» – тело, которое поглощает только часть энергии с любой длиной волны.

Материал	Температура, °С	Степень черноты
Алюминий	200 – 600	0,11 – 0,19
Медь	200 – 600	0,57 – 0,87
Латунь	200 – 600	0,61 – 0,69
Сталь (нержавеющая)	200 – 600	0,25 – 0,35
Углепластик	125	0,79 – 0,81
Стеклопластик	20 – 150	0,93 – 0,95

Измерение излучательной способности



Уникальная научная установка для прецизионных измерений радиометрических и спектрометрических характеристик источников и приемников излучения в спектральном диапазоне от 1 нм до 20 мкм (УНУ ВНИИОФИ)



Nicolet iS50 spectrometer
(0.2-2.6 micron
measurements range)

Стендовые испытания МКА

Стендовые испытания – комплекс наземных экспериментов, которым подвергаются корпус, бортовые системы, оборудование и МКА в целом в ходе подготовки его к лётным испытаниям; вид наземных испытаний.

Основными стендовыми испытаниями являются термовакuumные испытания, при которых воспроизводятся условия орбитального полета.

Термовакуумные испытания

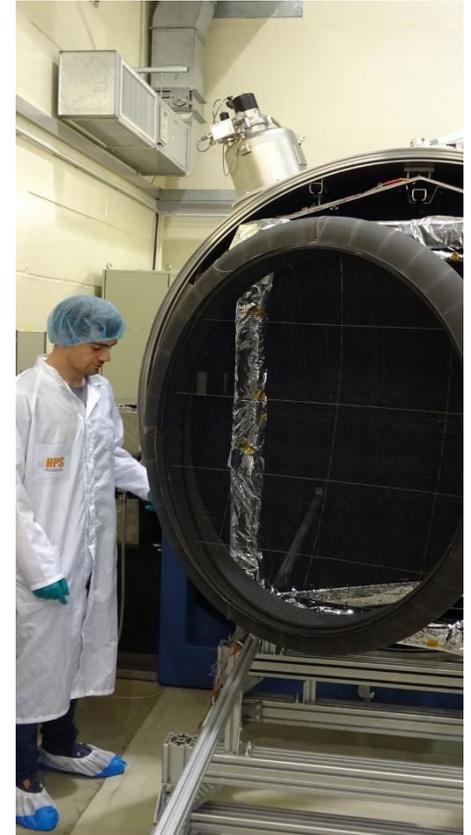


Термовакуумные испытания представляют собой разновидность стендовых испытаний.

В ходе термовакуумных испытаний контролируется функционирование приборов МКА в режиме максимальных и минимальных тепловых нагрузок, возникающих при их работе, а также при воздействии на корпус солнечного излучения, или охлаждения в тени Земли.

Для проверки теплового режима МКА в условиях термовакуумных испытаний воспроизводятся основные факторы космического пространства:

- глубокий вакуум;
- прямое солнечное излучение;
- отраженное Землей солнечное излучение;
- собственное излучение Земли;
- тепловыделение приборов.



Способы воспроизведения условий космоса (вакуум)

Ва́куум (от лат. *vacuus* — пустой) — пространство, свободное от вещества, среда, состоящая из газа при давлении значительно ниже атмосферного.

Уровень давления на орбитах выше 100 км

Высота, км	Давление, Па (мм. рт. ст.)
100	
200	
500	
1000	
20000	

Характеристики вакуума



Мерой степени разряжения вакуума служит отношение длины свободного пробега молекулы газа L и характерного линейного размера d (например, расстояние между стенками вакуумной камеры):

$$L/d = Kn,$$

где Kn – критерий Кнудсена.

Характеристики вакуума

● В зависимости от значения критерия Кнудсена выделяют три типа вакуума:

1. **Низкий вакуум** – состояние газа, при котором взаимные столкновения между молекулами преобладают над столкновениями молекул газа со стенками вакуумной камеры. Такое состояние соответствует условию $Kn \ll 1$.
2. **Средний вакуум** – состояние газа, когда частоты соударений молекул друг с другом и со стенками вакуумной камеры одинаковы, при этом $Kn \approx 1$.
3. **Высокий вакуум** – состояние газа, при котором столкновения молекул со стенками камеры преобладают над взаимными. $Kn > 1$.

Характеристики вакуума

Степень вакуума	Давление
Низкий	
Средний	
Высокий	

Способы воспроизведения условий космоса (излучение солнца и Земли)

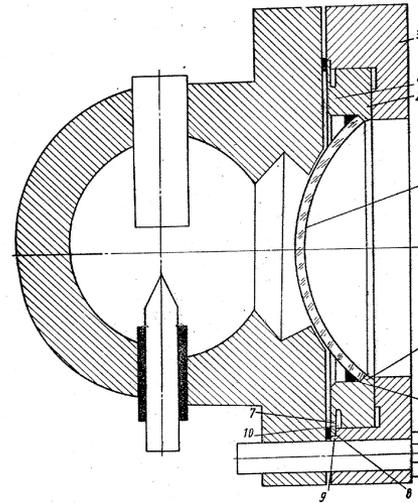
- Количество лучистой энергии поступающей от Солнца в единицу времени на единицу площади, называется солнечной постоянной. Для расчета потока солнечного теплового излучения пользуются формулой:

$$Q_{\text{солн}} = A_S S_0 \mu(s),$$

где A_S - радиационный коэффициент поглощения солнечных лучей, S_0 - плотность потока солнечного излучения, $\mu(s)$ - относительный мидель элементарной площади спутника по направлению вектора s .

Газоразрядные лампы

- Газоразрядные лампы: физическая основа — дуговой электрический разряд в газах.
- В разрядных лампах могут использоваться разные газы: пары металлов (ртути или натрия), инертные газы (неон, ксенон и другие), а также их смеси.
- Для термовакуумных испытаний используют лампы высокого давления с парами ртути или ксеноном внутри. Могут иметь мощности до 50 кВт.



Чертеж лампы ДКсРМ - 55000



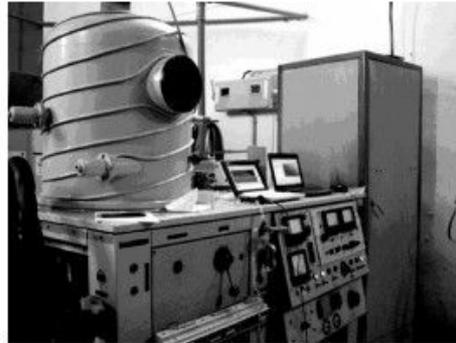
Лампа ДКсРМ - 55000

Стенд ТВК-0.12

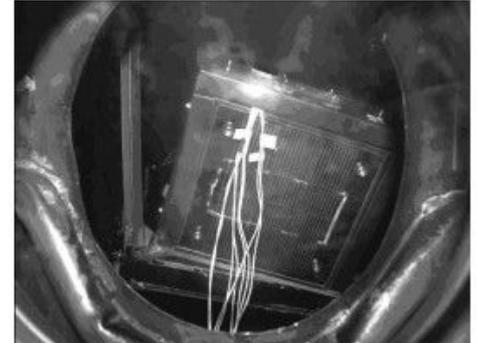
1. вакуумная камера,
2. наноспутник,
3. криогенная система,
4. имитатор земного излучения,
5. имитатор солнечного излучения,
6. опорно-поворотное устройство

Стенд был
использован для
термовакуумных
испытаний спутника
PolyTan-1

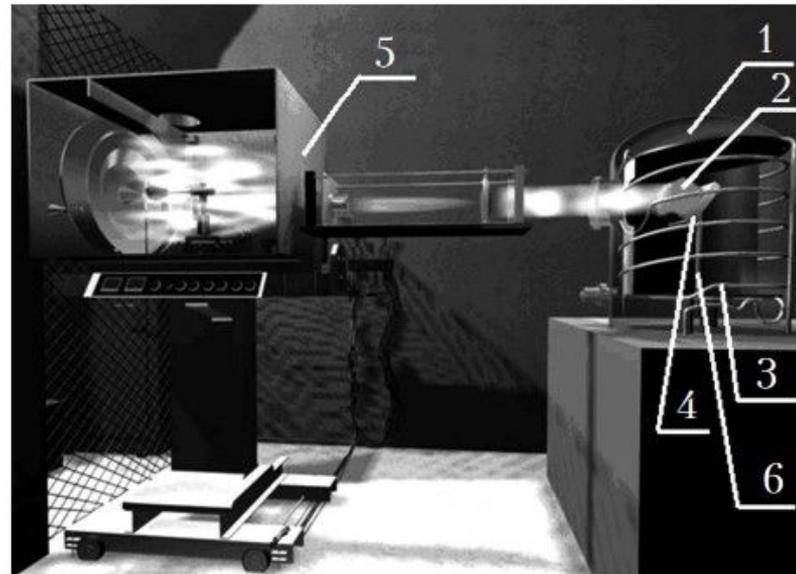
а)

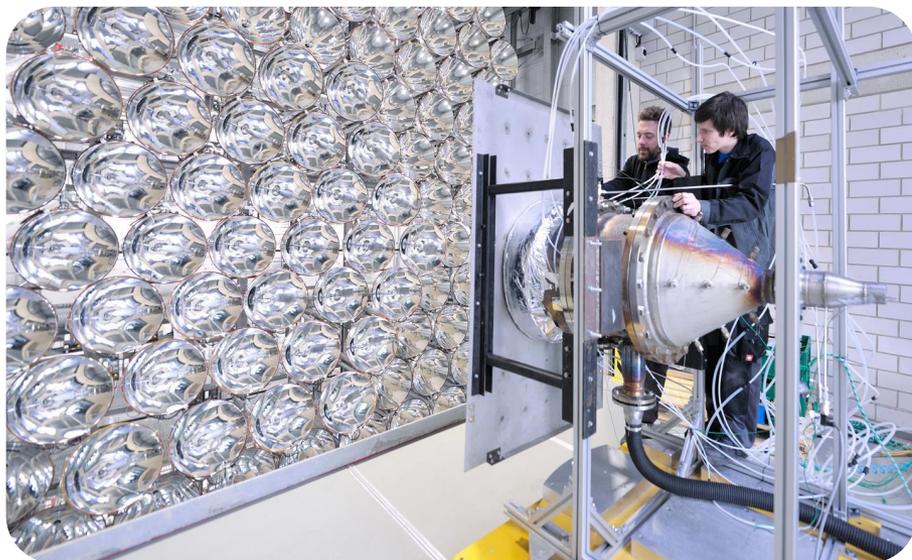


б)



в)



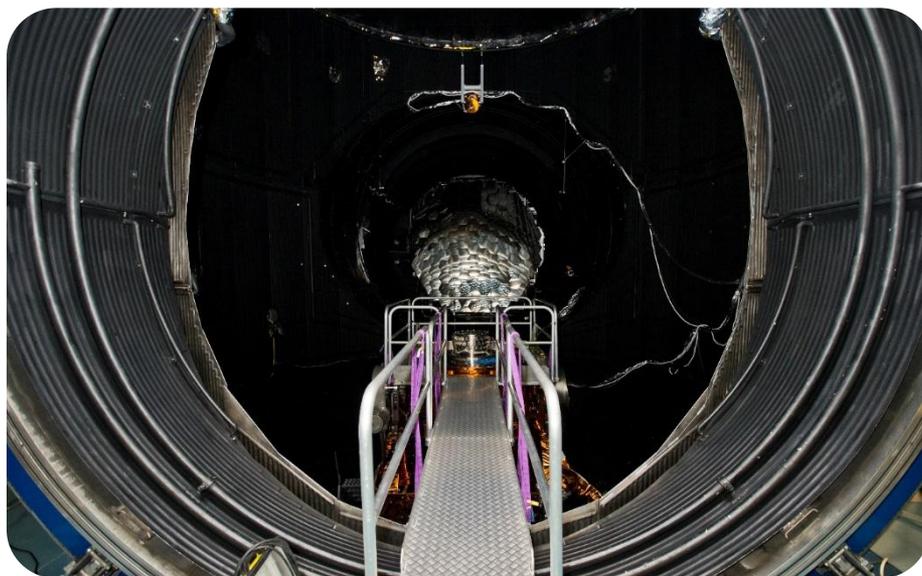


Самый большой в мире имитатор солнечного излучения в Германском центре авиации и космонавтики, г. Кёльн.

Стенд состоит из 149 ксеноновых короткодуговых ламп, общей мощностью в 320 кВт, и могут нагревать объекты исследований до 3000 °С.



Камера «Large Space Simulator» находящаяся в Центре Космических исследований и технологий Европейского космического агентства, Нордвейк, Голландия



Внутри камеры высотой 15 м и диаметром 10 м видна установка из 121 зеркальных поверхностей, отражающих световой поток от группы из 25 кВт ламп.

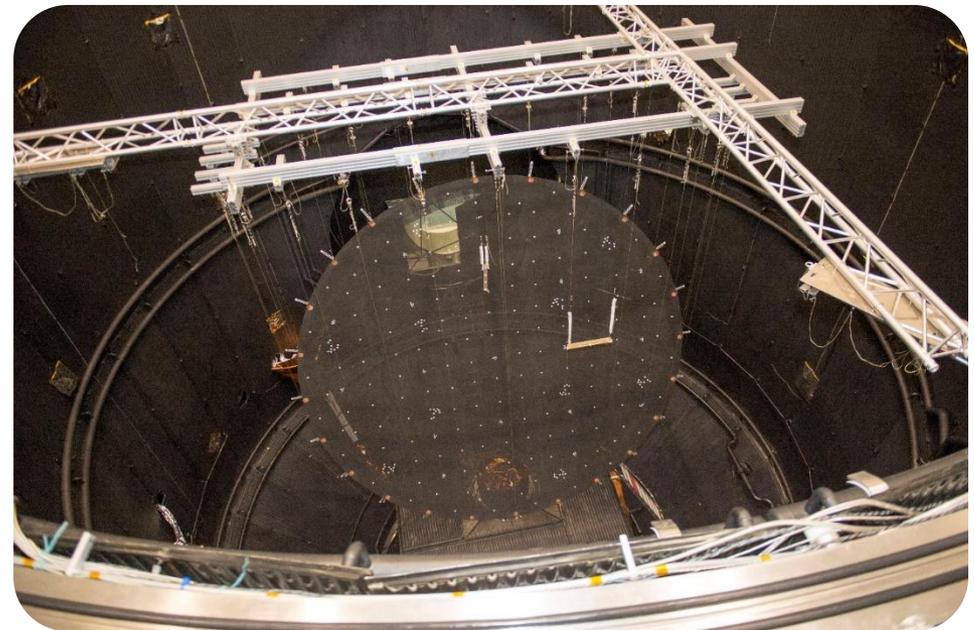
Стенки камеры охлаждаются жидким азотом до -190°C .

Европейский космический центр, Нордвейк, Нидерланды



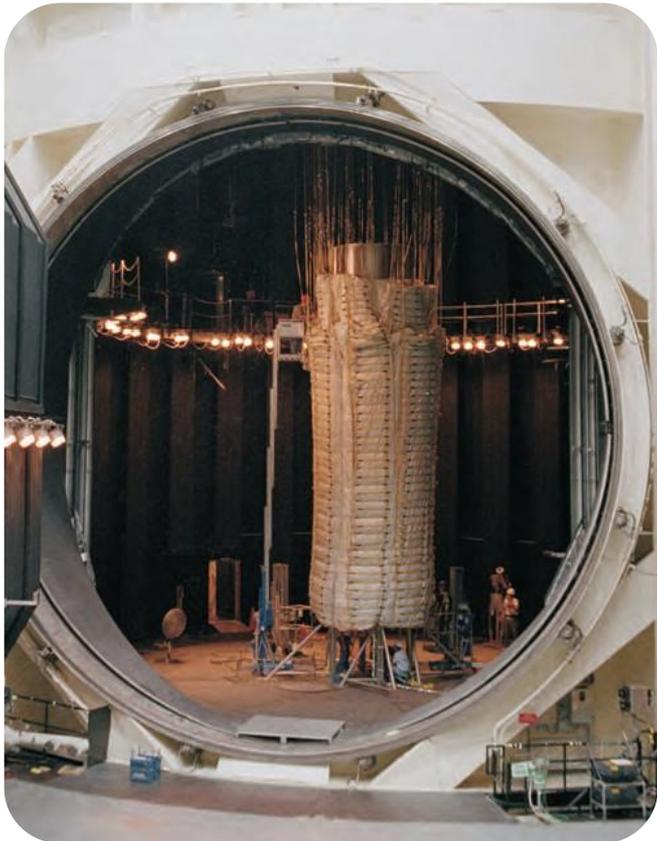
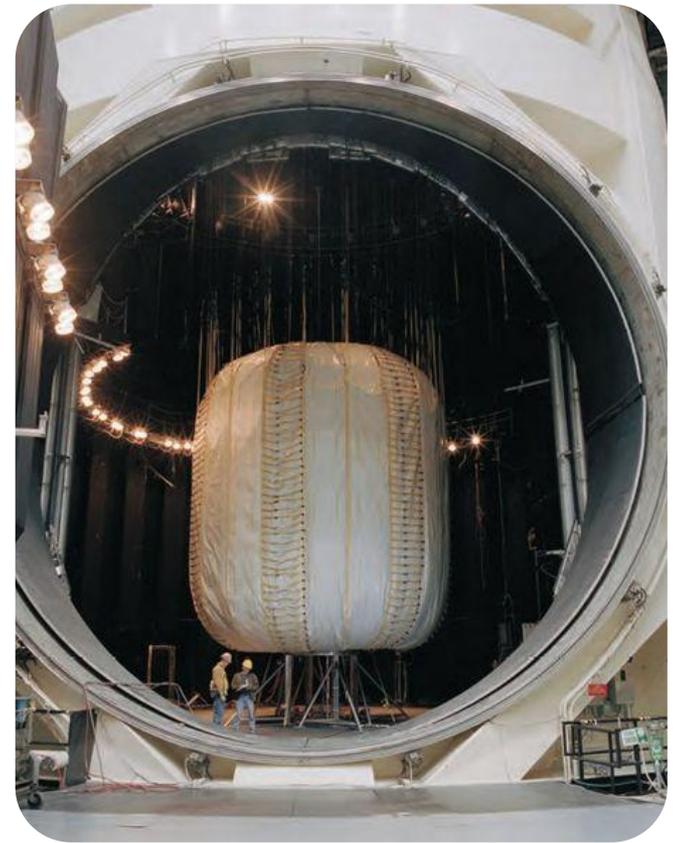


Монтирование в камеру сетчатого рефлектора, с натянутым сетеполотном, разработанного группой ученых из Института легких конструкций, Мюнхенского технологического университета.



Вид установленного рефлектора в камере.

Термовакuumная камера
Космического центра Линдона
Б. Джонсона, Хьюстон, США.
На снимке испытания
надувного отсека космической
станции TransHub (в
развернутом состоянии), 1998 г.



Испытания надувного отсека
TransHub (сложенное состояние), 1998 г.



Космический аппарат «Луч-5А» в термовакуумной камере, АО «ИСС им. М.Ф. Решетнева», г. Железногорск, Красноярского края.

АО «ИСС им. М.Ф. Решетнева» - ведущее предприятия России по созданию КА связи, телевидения, ретрансляции, навигации, геодезии.

Термовакуумные испытания КА «Ангосат», ФКП «НИЦ РКП», г. Пересвет Московской обл.

ФКП «НИЦ РКП» - головной испытательный центр Госкорпорации «Роскосмос» по наземной экспериментальной отработке жидкостных ракетных двигателей, двигательных установок на различных компонентах топлива, испытаниям космических аппаратов в условиях имитации космоса.

