

Российские испытательные камеры глубокого вакуума для космических исследований



В статье рассмотрены основные компоненты российских испытательных камер глубокого вакуума, их применение для тестирования космических аппаратов, технические вызовы и их решения, а также перспективы развития этой области в контексте российской космической программы.

000 НПП «Универсал Прибор», г. Санкт-Петербург

Испытательные камеры глубокого вакуума являются ключевым элементом в подготовке космических аппаратов, обеспечивая возможность моделирования условий космоса на Земле. Эти высокотехнологичные установки создают экстремально низкое давление, температуры от -180 до $+150$ °С и имитируют солнечное излучение, чтобы проверить надежность и функциональность оборудования в условиях, где ремонт невозможен. В России, стране с богатой историей космических исследований, такие камеры играют важную роль в обеспечении успеха миссий, начиная от исторического орбитального корабля «Буран» до современных спутников ГЛОНАСС и модулей Международной космической станции (МКС).

Российские испытательные камеры, такие как уникальная вакуумная камера объемом 1515 м^3 на космодроме Байконур, термовакуумная камера ТБК-110 и новый комплекс объемом 2400 м^3 в компании «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» (ИСС), представляют собой передовые инженерные решения. Они используются для тестирования широкого спектра космических аппаратов, включая пилотируемые корабли «Союз», грузовые корабли «Прогресс», модули МКС («Звезда», «Наука»), навигационные

спутники ГЛОНАСС, коммуникационные спутники «Ямал» и астрофизическую обсерваторию «Спектр-РГ».

Эти камеры позволяют проводить испытания на герметичность, термостатирование, проверку систем терморегуляции и устойчивости материалов, что критически важно для предотвращения сбоев в космосе. Например, тестирование модуля «Наука» в вакуумной камере выявило потенциальные проблемы с герметичностью, которые были устранены до его запуска в 2021 году. С развитием российской космической программы, включая планы по исследованию Луны и дальнего космоса, роль испытательных камер становится еще более значимой.

В данной статье мы рассмотрим основные компоненты российских испытательных камер, их применение для тестирования космических аппаратов, технические вызовы и их решения, а также перспективы развития этой области в контексте российской космической программы.

Основные компоненты российских испытательных камер

Российские испытательные камеры глубокого вакуума оснащены передовыми технологиями, которые обеспечивают создание и поддержание условий, максимально приближенных к космическим. Основные компонен-

ты включают форвакуумные насосы, турбомолекулярные насосы, криоэктраны, системы имитации солнечной радиации и нагревательно-охлаждающие элементы (табл. 1). Эти компоненты работают в синергии, чтобы обеспечить точное воспроизведение космической среды.

Форвакуумные насосы

Форвакуумные насосы, также известные как насосы предварительного разрежения, являются первым этапом в создании вакуума в испытательной камере. Их задача — снизить давление от атмосферного уровня (760 Торр) до значений, при которых могут эффективно работать насосы высокого вакуума, обычно до 10^{-2} – 10^{-3} мбар. В российских камерах используются различные типы форвакуумных насосов, включая:

- ▶ ротационные лопастные насосы, которые используют вращающиеся лопасти для откачки газа. Они надежны и широко применяются, но требуют масла, что может привести к загрязнению камеры масляными парами. Для минимизации этого риска используются молекулярные ловушки и газобалластные клапаны;
- ▶ сухие винтовые насосы. Эти насосы не используют масло, что исключает риск загрязнения. Они работают за счет двух винтовых роторов, сжима-

ющих и перемещающих газ. Такие насосы применяются в камере ТБК-110 для обеспечения чистого вакуума, что критично для тестирования чувствительных компонентов спутников;

► спиральные насосы. Они тоже являются сухими и используют спиральные диски для откачки газа. Обеспечивают давление до 10^{-2} мбар и часто комбинируются с турбомолекулярными насосами.

В камере ТБК-110, например, используются сухие винтовые насосы, которые обеспечивают чистый вакуум без риска загрязнения маслом, что особенно важно для тестирования навигационного оборудования спутников ГЛОНАСС.

Турбомолекулярные насосы

Турбомолекулярные насосы (ТМН) применяются для достижения высокого уровня вакуума, обычно в диапазоне от 10^{-6} до 10^{-10} мбар. Они работают на принципе передачи импульса молекулам газа от быстро вращающихся лопастей, которые могут достигать скорости до 90000 оборотов в минуту. ТМН эффективны для удаления легких газов, таких как водород и гелий, которые трудно улавливаются крионасосами.

В крупной вакуумной камере на Байконуре, модернизированной в 2016 году, установлены современные турбомолекулярные насосы, которые работают в тандеме с крионасосами для достижения необходимого уровня вакуума. Эти насосы оснащены магнитными подшипниками, что снижает трение, минимизирует вибрации и увеличивает срок службы оборудования.

Криозкраны

Криозкраны, или крионасосы, являются ключевым элементом для поддержания глубокого вакуума. Они представляют собой поверхности, охлаждаемые до криогенных температур с помощью жидкого азота (77 К, -196 °С) или гелия (4 К, -269 °С). На

этих поверхностях конденсируются и замораживаются остаточные газы, такие как водяной пар, углекислый газ и другие, что позволяет поддерживать давление на уровне 10^{-6} мбар и ниже.

В камере ТБК-110 криозкраны достигают температуры -180 °С (93 К), благодаря чему эффективно улавливается водяной пар, составляющий более 80% остаточных газов в вакуумной камере. Криозкраны также обеспечивают термическую среду, имитирующую холод космоса, что важно для тестирования систем терморегуляции космических аппаратов.

Имитация солнечной радиации

Для воспроизведения воздействия солнечного света в космосе российские камеры ООО НПП «Универсал Прибор» оснащены системами имитации солнечной радиации. Эти системы обычно состоят из массивов ксеноновых ламп, которые создают свет со спектром, близким к солнечному ($AM0$, 1361 Вт/м²). Интенсивность и угол освещения регулируются для соответствия условиям конкретных миссий.

В камере на Байконуре используются ксеноновые лампы, которые обеспечивают равномерное освещение и точное соответствие солнечному спектру. Это позволяет тестировать системы терморегуляции, солнечные панели и материалы на устойчивость к солнечному излучению. В некоторых камерах также применяются металлогалогенные лампы или светодиоды, но ксеноновые лампы остаются стандартом благодаря их спектральным характеристикам.

Нагревательные и охлаждающие элементы

Российские испытательные камеры оснащены системами для создания экстремальных температурных условий, характерных для космоса. Охлаждение достигается с помощью криогенных систем, использующих жидкий азот или гелий, а нагрев —

с помощью резистивных нагревателей или инфракрасных излучателей.

В камере ТБК-110, например, используются криогенные экраны для охлаждения до -140 °С и электронагреватели для нагрева до $+150$ °С. Точный контроль температуры обеспечивается с помощью датчиков (термопар или RTD) и систем обратной связи, которые регулируют работу нагревателей и охладителей. В крупных камерах, таких как на Байконуре, используются мощные нагревательные системы, способные обеспечивать тепловой поток до 1400 Вт/м², что соответствует солнечному излучению.

Применение в имитации космических условий

Российские испытательные камеры используются для тестирования широкого спектра космических аппаратов, включая пилотируемые корабли, грузовые корабли, модули МКС, навигационные и коммуникационные спутники, а также научные обсерватории. Эти камеры позволяют проводить испытания на герметичность, термоциклирование, проверку систем терморегуляции и устойчивости материалов, что критически важно для обеспечения надежности оборудования в космосе.

Испытания орбитального корабля «Буран»

Орбитальный корабль «Буран» (рис. 1) был одним из самых амбициозных проектов советской космической программы. Для его тестирования на космодроме Байконур была построена крупная вакуумная камера объемом около 1000 м³, которая после модернизации в 2016 году увеличилась до 1515 м³. В 1980-х годах «Буран» проходил серию испытаний в этой камере, включая:

- проверку герметичности: убедилась, что отсеки корабля сохраняют давление в условиях вакуума;
- тестирование теплозащитного покрытия: проверяли устойчивость

Таблица 1. Характеристики основных компонентов камеры ТБК-110

Наименование	Форвакуумные насосы	Турбомолекулярные насосы	Криозкраны	Имитация солнечной радиации	Нагревательные элементы
Характеристики	Сухие винтовые, давление до 10^{-3} мбар	Давление до 10^{-6} мм рт. ст.	Температура -180 ± 10 °С	Ксеноновые лампы, до 1400 Вт/м ²	Температура до $+150$ °С
Примечания	Обеспечивают чистый вакуум	Для легких газов	Улавливают водяной пар и другие газы	Регулируемая интенсивность	Резистивные нагреватели



Рис. 1. Старт комплекса «Энергия – Буран» 15 ноября 1988 года с космодрома Байконур

покрытия к высоким температурам и вакууму, имитируя условия входа в атмосферу;

- ▶ испытания систем жизнеобеспечения: проверяли работу систем в условиях глубокого вакуума.

Эти тесты были критически важны для подготовки «Бурана» к его единственному беспилотному полету в 1988 году. Опыт, полученный при тестировании, был использован в последующих космических программах.

Испытания пилотируемых кораблей «Союз»

Пилотируемые корабли «Союз» являются основным средством доставки космонавтов на МКС. Перед каждым полетом корабль проходит испытания в вакуумной камере на Байконуре. Например, в 2023 году корабль «Союз МС-24» провел около 5 суток в камере для проверки герметичности. Во время этих тестов:

- ▶ имитируется давление, аналогичное орбитальному полету, чтобы выявить возможные утечки;
- ▶ проводится вакуумная сушка для удаления испаряющихся частиц и газов с поверхностей корабля.

Эти испытания обеспечивают безопасность экипажа и надежность корабля в космосе.

Испытания грузовых кораблей «Прогресс»

Грузовые корабли «Прогресс» используются для доставки припасов, топлива и оборудования на МКС. Они также проходят испытания на герметичность в вакуумной камере на Байконуре. Например, корабль «Прогресс МС-02» успешно прошел такие тесты в 2016 году перед запуском. Испытания включают:

- ▶ проверку герметичности грузового отсека;
- ▶ тестирование систем стыковки в условиях вакуума.

Испытания модулей МКС

Российские модули МКС, такие как «Звезда» и «Наука», проходили испытания в вакуумных камерах перед запуском. Модуль «Звезда», являющийся основным жилым и сервисным модулем российского сегмента МКС, был протестирован в камере на Байконуре для проверки герметичности и работоспособности систем жизнеобеспечения.

Модуль «Наука», запущенный в 2021 году, также прошел вакуумные испытания, во время которых он был заполнен гелиевой смесью для проверки герметичности. Эти тесты выявили потенциальные проблемы, которые были устранены до запуска, что обеспечило успешную интеграцию модуля в МКС.

Испытания спутников ГЛОНАСС

Спутники системы ГЛОНАСС, разработанные АО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнёва», проходят термовакуумные испытания в камере ТБК-110. Эта камера с полезным объемом 110 м³ позволяет тестировать компоненты спутников, такие как навигационные антенны и электроника, в условиях глубокого вакуума (до 10⁻⁶ мм рт. ст.) и экстремальных температур (от -140 до +150 °С). Испытания включают:

- ▶ проверку работоспособности навигационных приборов;
- ▶ тестирование устойчивости материалов к термоциклированию;
- ▶ проверку антенн на точность передачи сигналов.

Испытания спутников «Ямал»

Коммуникационные спутники «Ямал», разработанные РКК «Энергия» и другими предприятиями, также тестируются в вакуумной камере на Байконуре. Эти испытания включают проверку герметичности, устойчивости к солнечному излучению и термоциклированию, что обеспечивает надежность спутников на геостационарной орбите.

Испытания обсерватории «Спектр-РГ»

Астрофизическая обсерватория «Спектр-РГ», запущенная в 2019 году и размещенная в точке Лагранжа L2, проходила термовакуумные испытания в НПО Лавочкина перед запуском.

Таблица 2. Примеры космических аппаратов, протестированных в российских камерах

Космический аппарат	«Буран»	«Союз МС-24»	«Прогресс МС-02»	«Звезда»	«Наука»	Спутники ГЛОНАСС	«Ямал»	«Спектр-РГ»
Камера	Байконур, 1515 м ³	Байконур, 1515 м ³	Байконур, 1515 м ³	Байконур, 1515 м ³	Байконур, 1515 м ³	ТБК-110, 110 м ³	Байконур, 1515 м ³	НПО Лавочкина
Тип испытаний	Герметичность, теплозащита	Герметичность, вакуумная сушка	Герметичность, стыковка	Герметичность, системы жизнеобеспечения	Герметичность	Термоциклирование, электроника	Герметичность, солнечное излучение	Термовакуумные испытания
Примечания	Тесты в 1980-х годах	Тесты в 2023 году	Тесты в 2016 году	Тесты перед запуском в 2000 году	Тесты перед запуском в 2021 году	Тестирование компонентов	Тесты для геостационарной орбиты	Тесты перед запуском в 2019 году



Рис. 2. Термовакuumные камеры 125ТБК, 250ТБК, 1000ТБК, 2000ТБК

ском. Эти тесты включали проверку взаимодействия сервисных систем и научных инструментов, таких как телескоп eROSITA, в условиях вакуума и низких температур, что было необходимо для обеспечения работы обсерватории в космосе.

Испытания, проходившие в камерах глубокого вакуума и термовакuumных камерах ООО НПП «Универсал Прибор»

Неоценимую помощь в изучении космического пространства оказали камеры глубокого вакуума и термовакuumные камеры ООО НПП «Универсал Прибор» (рис. 2, 3). В камерах проводились тестирования космических элементов, узлов, плат и компонентов в условиях, близких к реальным космическим, таких как низкое давление и широкий диапазон температур. Камеры глубокого вакуума позволили выявить малейшие изъяны в конструкциях летательных аппаратов и не допустить их проявления в космосе.

Эти испытания играют критически важную роль в обеспечении надежности и безопасности космических миссий. Благодаря моделированию условий вакуума и экстремальных температур инженеры могут оценить, как материалы и компоненты будут вести себя в открытом космосе, где нет атмосферы и температура может

колебаться от палящей жары до абсолютного нуля.

ООО НПП «Универсал Прибор» вносит значительный вклад в развитие отрасли, предоставляя надежное оборудование для испытаний и исследований. Отечественные камеры ООО НПП «Универсал Прибор» глубокого вакуума и термовакuumные камеры – инструмент для проверки готовности техники к работе в самых суровых условиях. Это позволяет гарантировать успешное выполнение любых программ и проектов, а также способствует дальнейшему прогрессу в исследовании космоса.

Технические проблемы и их решения

Работа с испытательными камерами глубокого вакуума связана с рядом технических вызовов, которые требуют продуманных инженерных решений. Эти проблемы включают поддержание глубокого вакуума, точную имитацию солнечной радиации, прецизионный контроль температуры и интеграцию всех систем.

Поддержание глубокого вакуума.

Проблемы:

- ▶ дегазация: материалы камеры и тестового объекта выделяют газы, увеличивая давление;
- ▶ утечки: даже микроскопические утечки могут нарушить вакуум.

Решения:

- ▶ материалы с низкой дегазацией: используются сплавы нержавеющей стали, такие как 12Х18Н10Т, которые проходят специальную обработку для снижения газовой выделенности;
- ▶ прогрев камеры (bake-out): камера нагревается до 100–200 °С для удаления адсорбированных газов;
- ▶ многоступенчатые системы откачки: комбинация форвакуумных, турбомолекулярных и криогенных насосов позволяет эффективно удалять различные газы;
- ▶ мониторинг утечек: используются гелиевые течеискатели для выявления и устранения утечек.

Пример: в камере ТБК-110 общий уровень утечек составляет не более 5 л·мкм рт. ст./с, что обеспечивает стабильный вакуум для тестирования.

Точная имитация солнечной радиации.

Проблемы:

- ▶ спектральное соответствие: трудно точно воспроизвести солнечный спектр АМ0;
- ▶ равномерность освещения: неравномерное распределение света может исказить результаты.

Решения:

- ▶ калибровка ксеноновых ламп: лампы калибруются для соответствия спектру АМ0;



Рис. 3. Камеры глубокого вакуума 125ТХД, 250ТХД, 764ТХД, 1000ТХД

► оптические системы: используются зеркала и линзы для создания равномерного светового поля;

► регулировка интенсивности: системы управления позволяют изменять интенсивность света до 1400 Вт/м².

Пример: в камере на Байконуре ксенонные лампы обеспечивают равномерное освещение, что позволяет точно тестировать солнечные панели спутников «Ямал».

Прецизионный контроль температуры.

Проблемы:

► криогенные температуры: достижение и поддержание температур ниже -180 °С;

► термические градиенты: неравномерное распределение температуры.

Решения:

► криогенные системы: использование жидкого азота или гелия для охлаждения криоэкранов;

► точные нагреватели: резистивные нагреватели с ПИД-регуляторами для поддержания заданной температуры;

► термоплиты: в некоторых камерах используются термоплиты для равномерного нагрева тестового объекта.

Пример: в камере ТБК-110 используется система из 160 каналов термометрии и подачи мощности, что обеспечивает точный контроль температуры.

Интеграция систем.

Проблемы:

► совместимость компонентов: лампы, криоэкраны и насосы должны работать без взаимного влияния;

► сложность управления: координация всех систем требует сложных алгоритмов.

Решения:

► модульные конструкции: камеры проектируются для упрощения интеграции и замены компонентов;

► автоматизированные системы управления: современные контроллеры, такие как в камере на Байконуре, используют электронные блоки управления вместо аналоговых;

► мониторинг в реальном времени: множество датчиков (давления, температуры, светового потока) обеспечивают полную информацию о состоянии камеры.

Пример: в камере ТБК-110 используется микропроцессорный контроллер Omron с программным обеспечением для координации всех систем.

Перспективы развития

Российская космическая программа продолжает развиваться, включая планы по созданию новых спутников, пилотируемых миссий на Луну и исследований дальнего космоса. Это требует модернизации существующих испытательных камер и строительства новых, более крупных установок.

Прогресс в вакуумных технологиях

Улучшение насосов: разработка более эффективных сухих насосов с меньшим энергопотреблением.

Новые материалы: использование сплавов с еще более низкой дегазацией для повышения чистоты вакуума.

Автоматизация: внедрение более сложных систем управления для повышения точности и надежности.

Улучшение точности имитации

Светодиодные симуляторы: переход к светодиодным системам для имитации солнечного излучения, что повышает энергоэффективность.

Точные термические модели: разработка моделей с погрешностью менее 1 °С для улучшения тестирования.

Создание более крупных камер

Новый комплекс ИСС. Компания ИСС строит термовакуумный комплекс с камерой объемом 2400 м³, который позволит тестировать спутники и системы размером до 13 метров. Это важно для будущих миссий, таких как создание лунных модулей или крупных телекоммуникационных спутников.

Универсальные камеры. Ведется разработка камер, способных имити-

ровать различные космические среды, включая условия на поверхности Луны или Марса.

Международное сотрудничество

Российские испытательные камеры используются в международных проектах. Например, модули МКС, такие как «Звезда» и «Наука», тестировались в российских камерах, что подчеркивает их роль в глобальных космических программах. В будущем сотрудничество с другими странами, например, с Китаем в области совместимости систем ГЛОНАСС и «Бэйдоу», может потребовать новых испытательных возможностей.

Заключение

Испытательные камеры глубокого вакуума, обеспечивающие надежность и безопасность космических аппаратов, являются краеугольным камнем российской космической программы. Во всех проектах, от исторических тестов «Бурана» до современных испытаний спутников ГЛОНАСС, модулей МКС и обсерватории «Спектр-РГ», эти камеры играют ключевую роль в успехе космических миссий. С развитием технологий и строительством новых комплексов, таких как АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», Россия продолжает укреплять свои позиции в космических исследованиях, поддерживая амбициозные планы по освоению космоса. С этой сложной задачей поможет справиться отечественный производитель ООО НПП «Универсал Прибор», который делает все возможное, чтобы вывести космические исследования на новый уровень.

Е. Ю. Герасимова, специалист отдела испытательного оборудования, ООО НПП «Универсал Прибор», г. Санкт-Петербург, тел.: +7 (812) 334-5566, e-mail: pribor@pribor.ru, сайт: www.pribor.ru