

С. В. Кравченко, С. Б. Нестеров,
В. А. Романько, Н. А. Тестоедов,
В. И. Халиманович, В. В. Христинич

ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ КОМПЛЕКСНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОТРАБОТКИ И ИСПЫТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассмотрены подходы к созданию комплексных систем для отработки и испытания космических аппаратов. Приведены основные характеристики испытательного оборудования мировых производителей космической техники. Описаны отечественные вакуумные и криогенные системы для наземной отработки космических аппаратов и моделирования условий космического полета. Сформулированы требования, которые предъявляются к испытательным стендам, позволяющим проводить комплексную отработку и испытания современных космических аппаратов.

E-mail: sbnesterov@niivt.ru

Ключевые слова: космический аппарат, вакуумная система, криогенная система, имитатор космоса.

Создание вакуумных систем для наземной отработки космических аппаратов (КА) и моделирования условий космического полета началось одновременно с разработкой космической техники и продолжится по мере ее развития и усложнения задач, решаемых средствами космонавтики.

Требования к системам, предназначенным для испытания КА, определяются многообразием нагрузок, испытываемых КА на старте, в процессе выведения, в космическом полете и при спуске на Землю. Это виброакустические и ударные нагрузки, механические перегрузки, тепловые и пневматические нагрузки при старте и спуске, работа в условиях высокого вакуума, воздействия ионизирующих излучений, электромагнитных полей, теплового и светового излучений Солнца и планет, с одной стороны, и космического холода, с другой стороны.

Опыт показывает, что надежность КА в процессе штатной эксплуатации напрямую связана с качеством наземной экспериментальной отработки его узлов, сборочных единиц и аппарата в целом, так как оценка качества конструкций, полученная в процессе наземных испытаний КА, будет тем корректнее и правдивее, чем точнее будут воспроизведены действительные условия космического полета. Указанная взаимосвязь подробно раскрывается в работе [1].

Это объясняется прежде всего тем, что полезная нагрузка КА — элементы конструкции КА, его приборы и агрегаты работоспособны в “тепличных условиях”, т.е. в ограниченном диапазоне внешних воздействий, близких по характеру к условиям на поверхности Земли.

В КА как комплекс входят системы защиты — системы терморегулирования (СТР), механической и радиационной защиты, обеспечивающие создание необходимых условий для эксплуатации полезной нагрузки и компенсирующие негативное влияние на ее работу указанных факторов воздействия космического пространства. Адекватность и надежность работы систем защиты КА, взаимодействия элементов полезной нагрузки между собой и с системами защиты КА в реальных условиях эксплуатации являются одними из основных факторов, определяющих показатели надежности и долговечности КА в целом. Анализ подходов к воспроизведению реальных условий эксплуатации КА приведен в работе [2].

Гарантировать работоспособность всего комплекса систем КА, надежность совместного функционирования полезной нагрузки, систем регулирования и защиты в условиях космического полета могут только комплексные испытания узлов, систем и аппарата в целом, проводимые с максимальным приближением к этим условиям — комплексному воздействию перечисленных неблагоприятных факторов.

Необходимо отметить, что достоверные данные при наземной отработке и испытаниях КА можно получить только путем испытания изделия в целом, а не отдельных его элементов. Особенно это важно для современных КА, так как при проектировании современных многоблочных негерметичных КА с множественными источниками тепловыделения, большим числом замкнутых полостей, находящихся в космосе под атмосферным или повышенным давлением, практически невозможно создать расчетную модель, учитывающую все составляющие, влияющие на тепловой режим элементов КА, возможные отклонения действительных теплофизических характеристик большого числа элементов, узлов и систем КА от расчетных. Указанные особенности проанализированы в работе [3].

Работы, проводимые в этом направлении Европейским космическим агентством и НАСА, показали, что время, затрачиваемое на создание такой теплофизической вариационной математической модели, соизмеримо с временными затратами на создание самого КА [4].

Требование проведения испытаний полногабаритного летного экземпляра КА предопределяет требования к габаритным размерам вакуумных камер, составляющих “сердце” отработочных и приемосдаточных испытательных систем предприятий космической отрасли. Таким образом, внутренние габариты вакуумной камеры испытательного стенда должны позволять полностью помещать КА, приборы и системы контроля и имитации, осуществлять обслуживание КА и необходимые технологические операции, а также необходимые перемещения КА в период проведения испытаний.

Как уже отмечалось, гарантировать качество обработки конструкции современного КА, а также его надежность в процессе эксплуатации могут только комплексные испытания в условиях, близких к условиям космического пространства, проводимые в течение всего наземного жизненного цикла изделия.

При этом точность оценки, получаемой во время испытаний КА, напрямую определяется точностью имитации тепловакуумного взаимодействия аппарата с окружающей средой космического пространства, поэтому главное внимание при создании испытательных систем должно уделяться воспроизведению основных факторов воздействия космической среды — вакуума, инфракрасного излучения теневой стороны Земли, электромагнитного излучения Солнца, а также иных факторов воздействия космического пространства.

Условия, создаваемые в имитационных установках — термобарокамерах при проведении тепловакуумной обработки, и ее методические особенности, определяются задачами, решаемыми при обработке конкретного КА с учетом особенностей траектории и целей его полета. Как показывает практика, эти задачи могут быть разбиты на три группы [5]:

1. Задачи по определению предельных температур конструкции и оборудования КА в процессе его эксплуатации, а также задачи по оценке способности системы терморегулирования КА обеспечить тепловой режим в заданном диапазоне изменений внешних и внутренних нагрузок (подтверждение работоспособности элементов конструкции КА в заданных температурных диапазонах).

2. Задачи по определению основных теплофизических характеристик КА и его отдельных элементов в условиях испытаний и сравнение их с значениями, полученными расчетным путем (расчетный прогноз). К основным теплофизическим характеристикам КА можно отнести холодопроизводительность радиационных поверхностей, тепловые потери, время ввода в заданный тепловой режим и время, в течение которого сохраняется и поддерживается заданный тепловой режим при отказе отдельных элементов СТР;

3. Задачи по проверке герметичности КА, его узлов и агрегатов.

Контроль герметичности в космической отрасли служит не только для определения качества сборочных соединений (сварки, пайки, склейки, соединения с уплотнениями), но и для контроля качества материалов, из которых изготовлен КА [6, 7].

Рабочее давление внутри ряда агрегатов КА превышает атмосферное, поэтому даже малая негерметичность может привести к негативным последствиям, например:

— к преждевременному отказу электронного блока вследствие перегрева, вызванного разгерметизацией и утечкой газа, осуществляющего теплоперенос;

— к паразитному кинетическому импульсу, приводящему к изменению параметров орбиты вследствие реактивного действия крайне малой газовой струи;

— к снижению мощности или выходу из строя передающей аппаратуры вследствие появления ионной проводимости (газового разряда) между элементами антенных узлов и иными металлическими деталями, вызванной наличием вокруг КА разреженного газового облака, обусловленного его негерметичностью и др. [8].

Отечественная и зарубежная практика показывает, что исходя из необходимости решения в процессе испытаний трех приведенных ранее задач, а также задачи испытания на устойчивость к механическим воздействиям на сегодняшний день сложились четыре основные группы высокоинформативных технологических процессов отработочных и контрольных испытаний КА, проводимых при условии работы полезной нагрузки и других систем КА (в условиях совместно проводимых электрических испытаний):

- 1) механические испытания КА (включая акустические);
- 2) пневматические испытания КА;
- 3) термовакуумные испытания КА;
- 4) термобалансные испытания КА.

Механические испытания (включая акустические) предназначены для отработки контроля КА в условиях имитации механических нагрузок, воздействующих на КА на участках старта, выведения, спуска. В настоящем материале они не рассматриваются.

Пневматические испытания КА представляют собой испытания самого аппарата и его узлов на герметичность путем создания штатных давлений в герметичных полостях КА пробным газом (обычно гелиево-азотной смесью или элегазо-азотной смесью), при этом КА находится в вакуумной камере. Приборами для измерения парциального давления пробного газа контролируется натекание пробного газа из систем КА в вакуумную камеру, которое сравнивается с натеканием от контрольной течи (или ряда контрольных течей), размещенной на фланцах штуцеров вакуумной камеры или на поверхности контролируемых систем КА. Как правило, в процессе пневматических испытаний проводятся проверки не только герметичности трубопроводов, резервуаров и иных конструкций, но и проверки функционирования всех элементов управляемой запорно-регулирующей арматуры КА в штатном режиме функционирования остальных систем КА.

Термовакуумные испытания КА — при комплексных термовакуумных испытаниях (ТВИ) испытываются тепловые макеты или штатные изделия с имитацией внешних тепловых условий окружающего космического пространства и внутренних тепловыделений приборов и оборудования КА. В этом случае отрабатываются тепловые режимы как внешнего, так и внутреннего оборудования, конструкции КА и системы терморегулирования.

Термобалансные испытания КА отличаются от термовакуумных тем, что основной задачей этих испытаний является обработка и контроль статического и динамического долговременного теплового баланса КА в условиях штатного функционирования полезной нагрузки и комплексной имитации динамики изменения факторов воздействия космического пространства на штатной орбите КА.

Как правило, проведение термовакуумных и термобалансных испытаний сопровождается проведением пневматических испытаний КА (или частичным контролем герметичности ряда ответственных систем КА) до начала и после окончания тепловых испытаний.

Таким образом, можно выделить обязательные компоненты испытательного стенда, позволяющего проводить комплексную обработку и испытания современных КА:

- вакуумная камера объемом более 150 м³;
- высоковакуумная откачная система;
- система имитации тепловых излучений (ИТИ) для имитации тепловых потоков Солнца и поверхности планет;
- система азотных криогенных экранов, имитирующая “черный” космос;
- система позиционирования (рабочего перемещения) КА;
- система контроля температуры и иных параметров КА;
- система контроля герметичности КА.

Можно сказать, что указанными характеристиками обладают все имеющиеся в мире системы для проведения обработки и испытаний КА. Основные характеристики испытательного оборудования мировых производителей космической техники приведены в таблице, составленной на основе найденных в сети Интернет источников [9–79].

Таким образом, наиболее часто встречающимся дополнительным оборудованием испытательных систем являются также: имитатор Солнечного излучения (ИСИ); гелиевые криогенные экраны (как правило, для зонального захлаживания); источники электронов и протонов.

Также в литературе встречаются упоминания об оснащении термовакуумных испытательных систем КА источниками нейтронов.

Крупнейшими испытательными системами являются:

Страна	Число стендов, имеющих приведенные обязательные компоненты	Примечания
РФ	4	ГВУ-600, ТБК-120, КВУ-400; ВК-600/300 (в том числе 3 с ИСИ)
Австрия	4	Из них 1: ИСИ + 1 источник электронов/протонов
Австралия	3	Нет данных (далее –)
Великобритания	Возможно, более 12 (упоминаются в источниках, характеристики не найдены)	Из них 5: ИСИ + 4 источника электронов/протонов
Бельгия	Более 7	Из них 2: ИСИ + 3 источника электронов/протонов
Бразилия	1	–
Германия	Более 20	Из них 7: ИСИ + более 3 источников электронов/протонов
Голландия	Более 5	Из них 2: ИСИ + 2 источника электронов/протонов
Греция	1	–
Дания	Более 4	Из них 1: ИСИ + 1 источник электронов/протонов
Европейское космическое агентство	Более 7	Из них 3: ИСИ + 2 источника электронов/протонов
Израиль	Более 2	Из них 2: ИСИ + 1 источник электронов/протонов
Индия	Более 2	Из них 2: ИСИ + 1 источник электронов/протонов
Индонезия	1	Из них 1: ИСИ + 1 источник электронов и протонов
Испания	3	Из них 1: ИСИ + 2 источника электронов/протонов

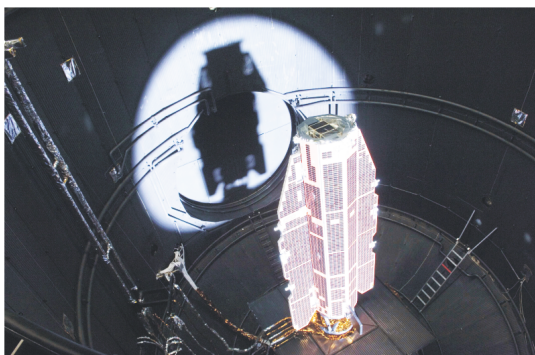
– в Европе и Азии — LSS (Large Space Simulator), расположенная в ESTEC центре Европейского космического агентства на побережье Северного моря в Шипхале близ Амстердама (рис. 1) [9];

– в мире — SPF (Space Power Facility), расположенная в Исследовательском центре им. Гленна (НАСА), в Кливленде, штат Огайо, США (рис. 2) [76].

Следует отметить, что Центр им. Гленна является крупнейшим в мире испытательным и исследовательским центром аэрокосмической промышленности. Всего в его составе свыше 300 испытательных систем и стендов, в том числе 39 крупногабаритных вакуумных испытательных камер, имеющих указанную комплектацию. Из них пять оснащены ИСИ, три — источниками плазмы, четыре — источниками



а



б

Рис. 1. Стенд-имитатор для тепловакуумных испытаний КА Европейского космического агентства



Рис. 2. Стенд-имитатор для тепловакуумных испытаний космических аппаратов НАСА

электронов и протонов, три — источниками нейтронов и тяжелых ядер, пять — гелиевыми криогенными экранами, два стенда имитируют отсутствие гравитации) [31, 32].

Основные характеристики испытательных систем LSS и SPF

	LSS	SPF
Полезный объем, м ³	2300	28000
Полезная высота, м	10	39
Полезный диаметр, м	9,3	30,5
Наименьшая температура, К	100	100
Наибольшая температура, К	370	420
Наличие локальных гелиевых экранов	Да	Да
Число независимых систем ИТП	2	4
Предельное давление, мм рт. ст.	$3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Максимальный диаметр пятна ИСИ, м	6	15
Максимальная интенсивность солнечного излучения, Вт/м ² (солнечных единиц)	2800 (2)	4200 (3)
Наличие механизма вращения КА/число осей вращения	+/3	+/3
Наличие системы контроля герметичности КА	Да	Да
Суммарная максимальная мощность ИТП кВт/число каналов	200/100	500/250
Площадь азотных криогенных экранов, м ²	До 290	До 5000 (подключаемые секции)
Наличие многоканальной системы контроля температуры и иных параметров КА	Да	Да
Наличие системы имитации космического излучения (источников электронов и протонов)	Да	Да
Наличие источников нейтронов и тяжелых частиц ..	Нет	Да
Наличие системы имитации отсутствия гравитации	Нет	Да

Крупнейшими действующими тепловакуумными испытательными системами в РФ являются стенды ВК 600/300 ФГУП НИЦ РКП г.Пересвет (рис. 3) и ГВУ-600 в ОАО “ИСС им. академика М.Ф. Решетнева”, г. Железногорск (рис. 4) [2, 80, 81].

В целом можно сказать, что общие габаритные требования определяются максимальными массогабаритными характеристиками полезной нагрузки существующих и перспективных тяжелых ракет-носителей (для РФ это РН “Протон” и “Ангара”).



Рис. 3. Стенд ВК 600/300 ФГУП НИЦ РКП (пос. Пересвет, Моск. обл.)



Рис. 4. Стенд ГВУ-600 ОАО “ИСС им. академика М.Ф. Решетнева”

Основные характеристики стендов ВК 600/300 и ГВУ-600

	ВК600/300	ГВУ-600
Полезный объем, м ³	130	140
Полезная высота (длина), м	8	10
Полезный диаметр, м	5,5	6
Наименьшая температура, К	130	100
Наибольшая температура, К	370	420
Наличие локальных гелиевых экранов	Нет	Нет
Количество независимых систем ИТП	1	1
Предельное давление, мм рт. ст.	(5...7)·10 ⁻⁶	1·10 ⁻⁶
Максимальный диаметр пятна ИСИ, м	3	4,5
Максимальная интенсивность солнечного излучения Вт/м ² (солнечных единиц)	1400 (1)	1400 (1)
Наличие поворотного стола / число осей вращения	Нет	
Наличие системы контроля герметичности КА	Да	Да
Суммарная максимальная мощность ИТП (кВт) / число каналов	70/70	80/100
Площадь азотных криогенных экранов, м ²	До 260	286
Наличие многоканальной системы контроля температу- ры и иных параметров КА	Да	Да
Наличие системы имитации космического излучения (источников электронов и протонов)	Нет	Нет
Наличие источников нейтронов и тяжелых частиц	Нет	Нет
Наличие системы имитации отсутствия гравитации ...	Нет	Нет

В ходе многолетней практики экспериментальной отработки конструкций КА, проводимой в ОАО “ИСС им. академика М.Ф. Решетнева” сложились комплексные требования к системам ТВИ, уточненные в последнее время с учетом тепловакуумной отработки КА “Тонец-М”, “Глонасс-М”, “Глонасс-К”, “Экспресс-АМ”, “Молния-3К” и других [5, 82].

Так, стенд для комплексной пневматической и тепловакуумной отработки КА должен обеспечивать следующие основные технические характеристики:

- давление в термобарокамере не более $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.;
- температура окружающего КА пространства не выше -170°C ;
- оптические коэффициенты стенок термобарокамеры $A_s \geq 0,9$ и $E \geq 0,9$;
- требования к ИСИ для околоземной орбиты – удельная тепловая мощность 1340–1440 Вт/м² с неоднородностью до $\pm 15\%$, расходимо-

стью до 4° в спектральном диапазоне, близком к диапазону солнечного излучения ($200 \text{ нм} \leq \lambda \leq 2000 \text{ нм}$);

— требования к ИТП — удельная мощность инфракрасного излучения от имитаторов тепловых потоков до 1800 Вт/м^2 при числе каналов не менее 30.

Практика показывает, что стенд для проведения ТВИ должен иметь в своем составе системы вакуумирования; имитации “черного”, “холодного” космоса; ИСИ; источники инфракрасного излучения (ИКИ); систему регистрации температурных параметров КА; системы измерения параметров солнечного и теплового излучений; контроля газовой среды и герметичности КА и управления тепловыми имитаторами, электрообогревателями и оборудованием КА.

Для термовакуумной отработки СТР КА, содержащей тепловые трубы, наиболее предпочтительна горизонтальная вакуумная камера, допускающая горизонтальное положение КА с компенсацией воздействия гравитации.

Система вакуумирования предназначена для вывода камеры на рабочий режим по давлению и поддержания этого режима в течение длительного времени при наличии газовыделения от объекта испытаний и периодических газовых выбросов.

Данная система создается, как правило, на основе безмасляных средств откачки — турбомолекулярных и криогенных насосов высоковакуумной ступени и спиральных либо безмасляных винтовых насосов форвакуумной ступени [83, 84].

В настоящее время силами коллектива ФГУП “НИИВТ им. С.А. Векшинского” возобновлена разработка и производство турбомолекулярных насосов (ТМН) большой производительности (скорость откачки 1500–5000 л/с), а также криосорбционных и азотных криогенных насосов.

На рис. 5 показан стенд балансировки роторов двигателей ТМН ФГУП “НИИВТ им. С.А. Векшинского”, а на рис. 6 — стенд комплексных испытаний насосов.

Средства контроля давления в камере, как правило, должны многократно дублироваться и быть разнесены по объему вакуумной камеры.

Государственное предприятие “НИИВТ им. С.А. Векшинского” осуществляет производство вакуумметров термосопротивления ВТС-18, термопарных ВТТ-18 и ионизационных ВИ-18 с микропроцессорным управлением и возможностью использования в качестве регуляторов давления, являющихся аттестованными средствами измерения, включенными в реестр средств измерения, в метрологический реестр МО РФ и имеющими утвержденные РКА и Росатомом технические условия (рис. 7).

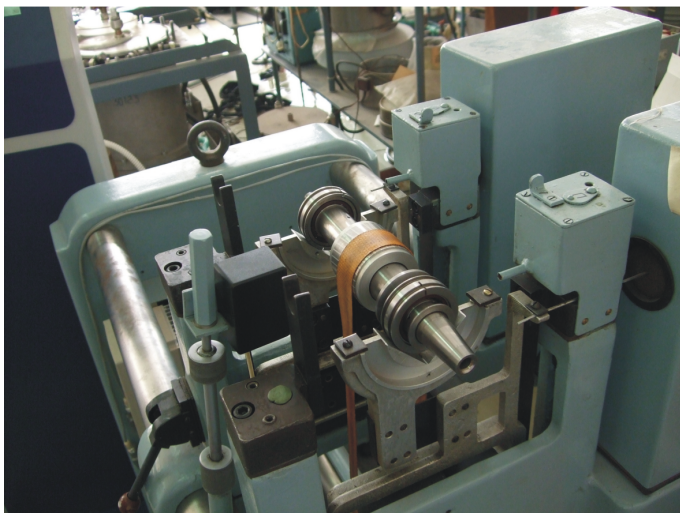


Рис. 5. Стенд балансировки роторов

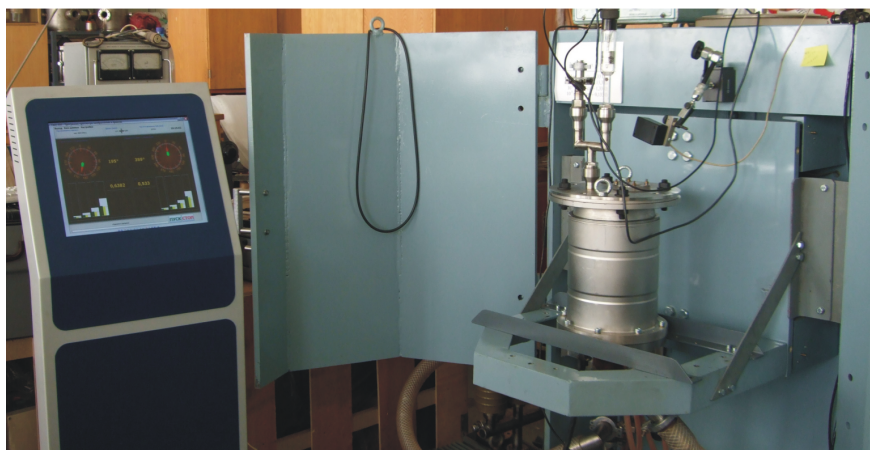


Рис. 6. Стенд испытаний ТМН

На основе описанных вакуумметров разработаны вакуумметрические станции ВС-1, позволяющие осуществлять сбор и компьютерную обработку информации в реальном масштабе времени с большого числа манометрических преобразователей, что позволяет представить пространство состояний вакуумной системы в реальном масштабе времени на одном средстве измерения (рис. 8).

Кроме средств создания вакуума и измерения давления, имитатор “черного”, “холодного” космоса включает в себя криогенные экраны, охлаждаемые жидким азотом, и систему подачи жидкого азота в экраны. Зачерненные со стороны размещения КА криогенные экраны, представляющие собой трубки, оснащенные разветвленными ребрами различного профиля, при прохождении по ним потока жидкого азота

обеспечивают глубокое охлаждение окружающего пространства, т.е. имитацию рассеяния тепловой энергии в условиях “черного” космоса.

Как правило, в современных имитационных системах уже не используется принцип охлаждения криогенных экранов путем испарения в них жидкого азота.

Современные криогенные системы являются двух- или трехконтурными замкнутыми тепловыми машинами, в которых обеспечивается циркуляция азота в криогенных экранах как теплоносителя в жидкой фазе, переохлаждение жидкого азота с сепарацией парогазовой фракции и ее ожижением.

Подобная криогенная система была разработана и смонтирована ФГУП “НИИВТ им.С.А. Векшинского” на испытательном стенде ГВУ-600 в ОАО “ИСС им. академика М.Ф. Решетнева”.

Внешний вид наружных конструкций систем переохлаждения, рециркуляции жидкого азота и криогенных хранилищ системы изображен на рис. 9.

Внешний вид криогенной насосно-распределительной станции, осуществляющей питание жидким азотом криогенных экранов стенда ТВИ ГВУ-600, изготовленной ФГУП “НИИВТ им. С.А. Векшинского”, приведен на рис. 10.



Рис. 7. Вакуумметры ВТС-18, ВТТ-18 и ВИ-18

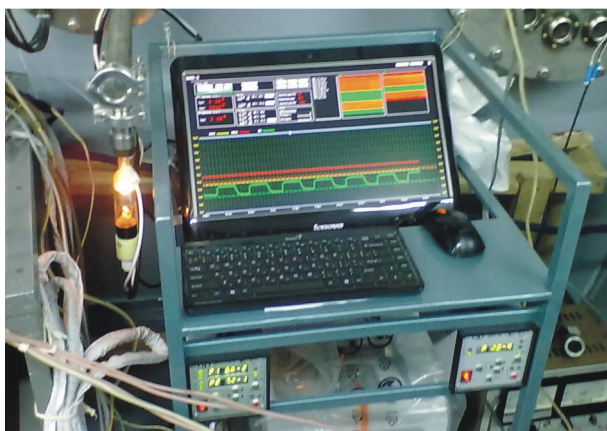


Рис. 8. Вакуумметрическая станция ВС-1



Рис. 9. Наружные конструкции криогенной системы стенда ТВИ ГВУ-600



Рис. 10. Насосно-распределительная станция криосистемы ГВУ-600

Имитатор солнечного излучения предназначен для имитации прямого солнечного излучения, действующего на КА. Как правило, при создании систем ИСИ требуется, чтобы поток излучения имитатора был параллельным.

В СССР и в РФ было создано несколько десятков установок для проведения ТВИ, оснащенных ИСИ. Опыт создания подобных систем показывает, что существует прямая зависимость между точностью имитации и стоимостью разработки и эксплуатации имитаторов Солнца, в связи с чем для современных термобарокамер создают ИСИ, отвечающие опытно отработанным усредненным (можно сказать — разумно ограниченным) требованиям по точности воспроизведения основных параметров потока солнечного излучения.

Основными элементами всякого ИСИ являются источники излучения и оптическая система формирования потоков. Последняя предназначена для формирования потока излучения с малорасходящимися лучами и включает в себя преломляющие, отражающие и поглощающие элементы.

При этом необходимо отметить, что несмотря на наличие нескольких малоразмерных установок для ТВИ, оснащенных ИСИ, опыт создания ИСИ для оснащения комплексов ТВИ на основе полноразмерных тепловакуумных камер большого объема для испытания крупногабаритных изделий невелик (в настоящее время имеются всего три действующие установки в РФ), и существуют недостаточно исследованные вопросы, связанные с их расчетом, проектированием, методами эксплуатации, оценкой эффективности имитации солнечного излучения.

Отсутствие методической базы предполагает дополнительные исследования в области построения оптической системы и компоновки ИСИ, а создание новых поколений КА повышает требования к точности воспроизводимых имитаторами условий.

Стенд ТБК-120 и созданный на основе опыта его эксплуатации новейший стенд ГВУ-600 — два из трех существующих в РФ полноразмерных испытательных стендов, оснащенных ИСИ и предназначенных для проведения ТВИ крупногабаритных изделий, находятся в ОАО “ИСС им. академика М.Ф. Решетнева” (Железногорск), третий — ВК 600/300 — в испытательном центре Роскосмоса НИЦ РКП (пос. Пересвет, Моск. обл.).

Стенд ТБК-120 предназначен для проверки изделий целиком или крупногабаритных узлов КА. Размер пятна, формируемого ИСИ ТБК-120, составляет 4 м².

Стенд ГВУ-600 предназначен для проверки изделий целиком или крупногабаритных узлов КА. Размер пятна, формируемого ИСИ

ГВУ-600, составляет 25 м^2 (с неравномерностью не более 15 % — 20,5 м).

Стенд ВК 600/300 предназначен для проверки изделий целиком или крупногабаритных узлов КА. Размер пятна, формируемого ИСИ ВК 600/300, порядка 9 (при монтаже дополнительной зеркальной системы) — 12 м^2 .

Согласно программам ТВИ КА ИСИ должен воспроизвести излучение Солнца по спектральному составу (длины волн 200–2000 нм), интенсивности ($1350\text{--}1440 \text{ Вт/м}^2$), расходимости потока (отклонения не более 4°) и равномерности облучения (отклонения не более 15 %).

Одним из остро стоящих вопросов в области ИСИ на сегодняшний день является повышение его КПД.

Свойственные имитатору внутренние потери энергии довольно велики, о чем говорит тот факт, что из электрической энергии, подводимой к источникам электромагнитного излучения, лишь около 10 % преобразуется в полезную лучистую энергию, падающую на облучаемую поверхность КА.

Часть этой энергии остается в относительно несовершенной системе излучения.

Другая же часть, наибольшая, поглощается оптической формирующей системой, состоящей из большого числа отражающих и преломляющих элементов. Даже при самом тщательном изготовлении ориентировочные потери энергии, падающей на хорошо алюминированные поверхности зеркальных отражателей, составляют 13–15 %, а потери, связанные с прохождением излучения через иллюминаторы и линзы, равны 8–10 %.

Указанные данные подтверждаются для действующих установок ТВИ. Так, расчетный КПД ИСИ стенда ВК 600/300 составляет 8,5 %, а фактический КПД ИСИ ТБК-120 до недавнего времени составлял 14 %.

Легко рассчитать, что при КПД ИСИ, равном 10 %, удельной мощности ИСИ при проведении ТВИ 1440 Вт/м^2 и площади исследуемой поверхности КА 10 м^2 мощность источника излучения (лампы) должна составлять порядка 150 кВт. Подобные лампы в РФ не выпускаются, в мире выпускались в единичных экземплярах — во Франции и США. Высокомощные лампы (мощностью свыше 30–50 кВт) имеют достаточно ограниченную область применения и поэтому серийно не выпускаются, имеют весьма высокую стоимость и длительный срок изготовления.

Другим, не менее важным моментом при создании крупногабаритных мощных ИСИ является недостаточность методической базы для

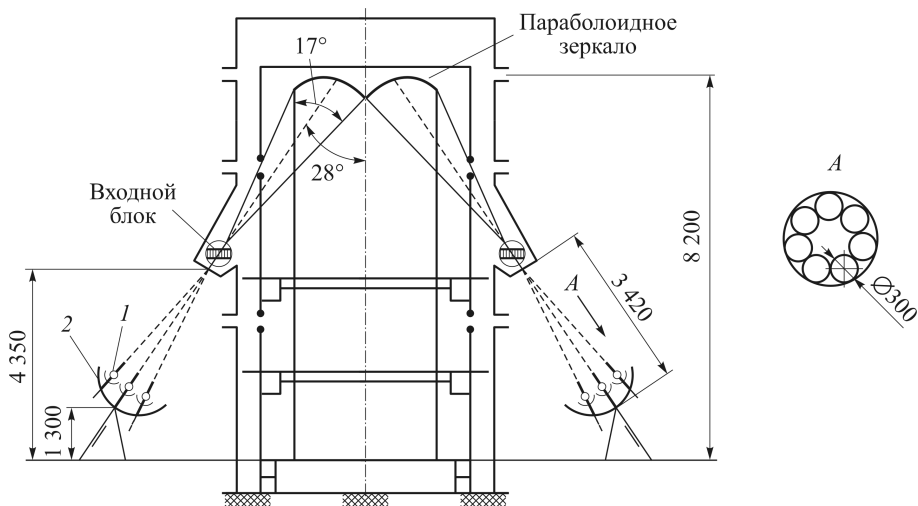


Рис. 11. Вертикальный стенд для проведения ТВИ, оснащенный ИСИ

расчета, проектирования и изготовления таких оптических систем, когда мощности одного источника излучения мало и требуется объединение световых потоков от нескольких ламп — источников излучения.

Исторически первыми испытательными системами явились стенды с вертикальной компоновкой вакуумной камеры. Они наиболее просты в расчете и изготовлении. Схема вертикального испытательного стенда для проведения ТВИ с ИСИ, по которой устроены существующие стенды ТБК-120 и ВК-600/300 [5], показана на рис. 11.

Вертикальный стенд представляет собой наиболее простую конструкцию испытательной системы.

До недавнего времени в РФ разрабатывались КА, имеющие жидкостную систему СТР с применением трубопроводов, насосов и теплообменников.

Тепловакуумные испытания таких КА проводились на существующих наземных комплексах ВК-600/300, КВУ-400 и ТБК-120 при этом ориентация КА в термобарокамере не оказывала влияния на качественные показатели испытаний.

Таким образом, отработка систем ТВИ предыдущего поколения позволила накопить опыт решения задач создания современных рациональных систем ИСИ на основе унифицированной компонентной базы, сформулировать требования к системам настройки и отображения информации о тепловых потоках, отработать методологию проведения ТВИ.

В настоящее время, ввиду возросших требований к создаваемым КА (срок активного существования, надежность и безотказность работы), при проектировании и изготовлении КА внедряются новые технические решения. Так, спутник “Глонасс К” имеет бесконтейнерную

компоновку с пассивной СТР на тепловых трубах, что повышает характеристики по надежности и защищенности (микрометеоритной). Применение такой схемы построения КА, в свою очередь, требует нового подхода к термовакуумным и термобалансным испытаниям.

Так, для имитации штатной работы высокоточной системы термостабилизации в наземных условиях необходимо строгое горизонтирование встроенных в сотовые панели тепловых труб, что позволяет свести к минимуму влияние земной гравитации на искажение тепловых и гидравлических параметров тепловых труб.

Создание КА нового поколения с улучшенными техническими характеристиками (в особенности создание негерметичных узлов и аппаратов в целом) стало причиной ужесточения требований к ИСИ — вызвало необходимость расширения диапазона и повышения точности имитируемых параметров солнечного излучения.

Новые циклограммы ТВИ в программах наземной экспериментальной отработки предусматривают уже не только поддержание одной плотности светового потока на уровне солнечной постоянной, но и обеспечение с выдержкой в течение временных интервалов различных уровней плотности светового потока — от 400 до 1450 Вт/м², что связано с отработкой режимов различной удаленности КА от Солнца. Поэтому актуальным становится новое требование к ИСИ — обеспечение и поддержание разных уровней плотности имитируемого потока излучения.

Также существенно ужесточаются требования к системам, обеспечивающим подтверждение (измерение и фиксацию) параметров имитируемого излучения — его оптической плотности и равномерности.

Как правило, заказчику испытаний необходимо представить подтверждающие данные в формах, пригодных для немедленного и последующего анализа.

Для удовлетворения современного уровня требований к системе подтверждения параметров излучения необходимо иметь программное обеспечение, обеспечивающее формирование матрицы значений оптической плотности излучения по всей площади потока лучистой энергии в реальном масштабе времени, ее запоминание через заданные промежутки времени, хранение и обработку полученной информации.

Результаты испытаний должны позволять проводить физико-математический анализ, достоверно, с высокой точностью, прогнозирующий характеристики работоспособности высокоточной системы термостабилизации в условиях космического пространства.

Отработка и испытания современного негерметичного (многоблочного) КА с СТР на тепловых трубах в вертикальных камерах ТБК-120 и ВК-600/300 затруднительны еще и по следующим причинам. КА с

тепловыми трубами требует фиксации в горизонтальной плоскости с высокой точностью. Пятно ИСИ, имеющее сечение в форме квадрата или круга, в вертикальных установках, как правило, формируется в вертикальной плоскости. В этой связи для обеспечения облучения КА в целом, как правило, требуется изменение формы сечения пятна на эллиптическую или близкую к прямоугольной. Также требуются доработки не только в оптической системе ИСИ, но как следствие, — в системе позиционирования КА, в конструкции вакуумного сосуда и криогенных экранов.

Поэтому при переходе на бесконтейнерные негерметичные КА в мировой практике отказываются от традиционной вертикальной компоновки испытательных стендов и переходят на новые подходы к их конструированию.

Наиболее универсальной иллюстрацией такого подхода является схема устройства ИСИ и вакуумной камеры, разработанная фирмами Carl Zeiss, Leybold-Heraeus, Bignier Schmid-Laurent и использованная Европейским космическим агентством для создания испытательной системы LSS [9], оптическая схема которой позволяет вести отработку как искусственных спутников Земли (ИСЗ), так и межпланетных аппаратов

Предложенная оптическая схема действительно универсальна — она позволяет облучить неподвижный или вращающийся КА под любым углом и с любого направления, причем с учетом запаса мощности ИСИ в две солнечных единицы (с возможностью наращивания оптических щитов и запасом по охлаждению оптических вводов и зеркал до 4 солнечных единиц) на LSS можно обрабатывать межпланетные аппараты для полетов к Венере, Меркурию, для исследования Солнца, а также искусственные кометы.

Однако в силу универсальности конструкция LSS является достаточно сложной и дорогостоящей. Это и вакуумная камера сложной специальной формы, и крайне разветвленная и сложная криогенная система, и сложная система позиционирования КА и облучающих зеркал, сложные системы ИТП, контроля герметичности КА и его тепловых параметров. Такой стенд действительно универсален и уникален.

При создании современной испытательной системы ГВУ-600 был использован опыт LSS, но с учетом потребностей предприятия — ОАО “ИСС им. академика М.Ф. Решетнева” схема стенда, криогенной системы, ИСИ и других систем были существенно упрощены без значимых потерь качества испытаний КА, выпускаемых предприятием. Для ГВУ-600 была использована схема с горизонтальным расположением вакуумной камеры, КА и ИСИ [82].

При проектировании ГВУ-600 был учтен вывод, сделанный на основе опыта эксплуатации ТБК-120 и ВК-600/300, о том, что для проведения ТВИ необходимо комплектовать ИСИ только серийными источниками излучения [5], так как при проведении ТВИ, занимающих обычно до 30–40 сут., необходимо иметь достаточный запас ламп для их оперативной замены в случае выхода из строя и обеспечения безотказности ИСИ в целом, так как цикл ТВИ непрерывен, и простой испытательной системы по причине отказа ИСИ приведет либо к значительным расходам на сохранение температурных и вакуумных параметров испытаний на период ремонта ИСИ, либо к прекращению испытаний КА и аннулированию всей проделанной работы.

Источниками излучения ИСИ [80] являются четыре световых щита, каждый из которых состоит из 30 серийных управляемых ксеноновых ламп с источниками питания и системой рефлекторов.

Поток излучения вводится в объем вакуумной камеры через четыре оптических охлаждаемых ввода, устроенных в корпусе откатной крышки. Пройдя через вводы, четыре световых потока попадают на систему зеркал, суммирующих их в единый параллельный световой поток, направляемый на КА. Зеркала и система фокусировки занимают примерно 4 м в вакуумной камере.

На внутренней поверхности задней и передней крышек на цилиндрической обечайке закреплены секционированные азотные криогенные экраны с регулируемым потоком и температурой циркулирующего через них жидкого азота. Высоковакуумная откачная система включает в себя турбомолекулярные и криогенные насосы [85].

По всему периметру КА в камере устроены секции ИТП с регулируемыми элементами по схеме излучателя черного тела. Стенд оснащен разветвленной распределенной системой контроля и телеметрии.

На основе опыта создания и эксплуатации стенда ОАО “ИСС им. академика М.Ф. Решетнева” ГВУ-600, проанализированного в работах [5, 80, 82, 85], предлагается следующая примерная схема универсального стенда для проведения отработки, термобалансных, термовакуумных и пневматических испытаний КА (рис. 12).

На схеме рис. 12 условно не показаны система ИКИ, системы контроля герметичности, контроля тепловых параметров КА, пневматическая и электрическая системы обеспечения функционирования КА, система контроля давления в камере, имеющиеся в составе стенда.

Для имитации воздействия радиационных поясов Земли, космического излучения и солнечного ветра стенд может быть оборудован источниками электронов, протонов и нейтронов, разработанными и изготовленными ФГУП “НИИВТ им. С.А. Векшинского”.

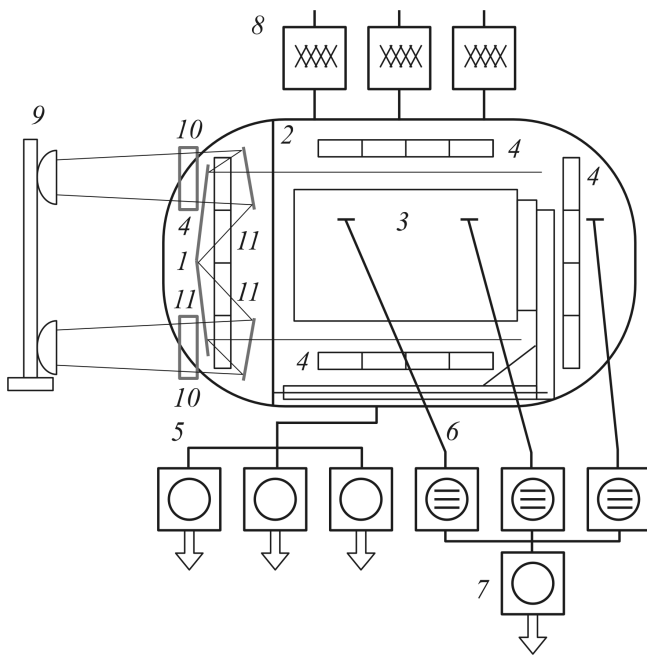


Рис. 12. Схема универсального испытательного стенда:

1 — откатная (открывающаяся) крышка вакуумной камеры стенда; 2 — основной цилиндрический сосуд вакуумной камеры испытательного стенда; 3 — объект испытаний (КА); 4 — криогенные экраны; 5 — форвакуумные откачные насосные станции; 6 — ТМН; 7 — форвакуумная откачная станция ТМН; 8 — криогенные или криосорбционные гелиевые (водородные) насосы (при необходимости); 9 — световые щиты ИСИ; 10 — охлаждаемые оптические вводы; 11 — зеркала оптической системы формирования потока ИСИ

Предлагаемая испытательная система является универсальной — она позволяет проводить электрические, пневматические, термовакуумные и термобалансные испытания КА, причем последние — наряду с периодическим контролем герметичности.

В связи с этим стенд для ТВИ оснащен оборудованием для контроля герметичности КА с помощью гелиевых масс-спектрометрических течеискателей, и операции по контролю герметичности вводятся в циклограммы проведения ТВИ новых КА.

Следует отметить, что применительно к полноразмерным вакуумным камерам при проведении контроля герметичности задача определения натекания порядка десятых и сотых литров на микрон в секунду решается в условиях сложного взаимодействия трех распределенных систем: источников газовой выделенности КА; элементов вакуумной откачной и криогенной систем; сложного геометрического объекта самой вакуумной камеры с объектом испытаний и технологическим оборудованием, имеющими различную температуру, адгезионные способности, собственное газовыделение и т.п.

Современный аналитический подход к описанию и моделированию такой сложной вакуумной системы подробно приведен в работе [86].

Во-первых, модель системы предлагается строить не на основе интегральных показателей давления и температуры среды в замкнутой или поточной вакуумной системе, а на основе анализа пространства состояний системы, оперирующего значениями абсолютного и парциальных давлений и температур газовой смеси в различных точках пространства вакуумной системы и пространственно-временными характеристиками их изменения.

Такой подход (с описанием состояния вакуумной системы для смеси нескольких газов в пространственно-временной форме с различными пространствами состояний для каждого из компонентов смеси) позволяет учитывать различную скорость откачки насосов для разных газов, ее зависимость от давления и температуры. Это дает возможность прогнозировать образование газовых пузырей и иных зон концентрации газа, давление в которых снижается существенно медленнее по сравнению со средним давлением в камере, а также образование зон концентрации парогазовой смеси, флегмы, окружающей заоложенные элементы криогенных экранов и крионасосов после образования на них первичного льда в ходе продолжительных испытаний, и выбросы газа из подобных дислокаций при включении ИСИ или источников ИК излучения или бортовой аппаратуры в соответствии с программой испытаний. Это позволяет также прогнозировать иные эффекты взаимодействия данных сложных распределенных систем с точки зрения формирования достоверной пространственной картины распределения парциальных давлений газов исходной атмосферы камеры и давления пробного газа при испытаниях КА на герметичность.

Построение подобных моделей систем имеет огромное практическое значение в связи с постоянным усложнением самих КА, программ испытаний и возрастанием требований “комплексности” испытаний — т.е. проведения параллельно нескольких испытаний КА или испытаний нескольких систем КА.

ФГУП “НИИВТ им. С.А. Векшинского” серийно выпускает вакуумно-откачные посты с контролем герметичности ВПГ-250/500, оснащенные спиральным форвакуумным насосом, ТМН и гелиевым масс-спектрометрическим течеискателем. Указанные посты успешно эксплуатируются в ОАО “ИСС им. академика М.Ф. Решетнева” и ряде других предприятий космической отрасли и позволяют проводить испытания методом контроля натекания с внешней контрольной течью по методикам, разработанным в соответствии с упомянутыми стандартами.

Внешний вид вакуумного поста ВПГ-250/500 изображен на рис. 13.



Рис. 13. Вакуумный пост с контролем герметичности ВПГ-250/500



Рис. 14. Стенд контроля герметичности ВПКТ-500

Как уже говорилось, для реализации представления о пространственной модели вакуумной среды в испытательной камере ФГУП “НИИВТ им. С.А. Векшинского” разработаны вакуумметрические станции ВС-1, позволяющие за счет компьютерной обработки одновременно поступающих сигналов с большого числа датчиков сформировать картину пространственного распределения давления в вакуумной камере испытательного стенда. Данная система также должна входить в комплектацию.

Кроме этого, для повышения точности измерения натекания объекта испытаний разработан компьютерный стенд контроля герметичности с калибровкой по нескольким контрольным течам, расположенным внутри вакуумной камеры, непосредственно у “потенциально опасных мест” объекта испытаний ВПГКТ-500, что также позволяет учесть упомянутые пространственные эффекты и эффекты взаимодействия и взаимовлияния систем в полноразмерных вакуумных камерах. Внешний вид стенда ВПГКТ-500 показан на рис. 14.

Ниже приведены обобщенные требования и характеристики современного стенда для комплексной отработки и испытаний КА.

Основные характеристики современного стенда для испытаний КА

Расположение вакуумной камеры	Горизонтальное
Полезный объем, м ³	870
Длина цилиндрической части сосуда, м	12
Внутренний диаметр, м	9,5
Наименьшая температура, К	100
Наибольшая температура, К	423
Наличие локальных гелиевых экранов	Да
Число независимых систем ИТП	1
Предельное давление, мм рт. ст.	$1 \cdot 10^{-6}$
Максимальный размер пятна ИСИ (длина и ширина), при неравномерности пятна не более 15 %, м	4,5×4,5
Максимальная интенсивность солнечного излучения, Вт/м ² (солнечных единиц)	2900 (2)
Наличие поворотного стола / число осей вращения	Да / 1
Наличие системы контроля герметичности КА	Да, распределенная
Наличие системы контроля распределения давления в вакуумной камере	Да
Количество каналов измерения давления в камере/на КА под ЭВТИ	80 / 20
Суммарная максимальная мощность ИТП (кВт) / число независимо программируемых каналов	200 / 100

Число каналов измерения температуры КА	200
Площадь азотных криогенных экранов, (м ²)/число секций криозкранов	300/12(24)
Наличие системы имитации космического излучения (источников электронов, протонов и нейтронов)	Да

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Т е п л о б м е н и тепловой режим космических аппаратов / Пер. с англ.; Под ред. Д. Лукаса. – М.: Мир, 1974. – 543 с.
2. А н д р е й ч у к О. Б., М а л а х о в Н. И. Тепловые испытания космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1982. – 142 с.
3. А н к у д и н о в А. В., Г о л о в е н к и н Е. Н., Д в и р н ы й В. В. Принципы конструирования высокотехнологичных космических аппаратов с длительным сроком активного существования. – Красноярск: СибГАУ, 2008. – 471 с.
4. П р о б л е м ы создания перспективной авиационно-космической техники. – М.: Физматлит, 2005. – 648 с.
5. Т е п л о в а к у у м н ы е испытания современных космических аппаратов / А.Ю. Вшивков, С.А. Крат, В.И. Халиманович // Вакуумная техника и технология. – 2011. – Т. 21. № 3. – С. 171–177.
6. С а п о ж н и к о в В. М. Монтаж и испытания гидравлических и пневматических систем на летательных аппаратах. – М.: Машиностроение, 1972. – 271 с.
7. Л е в и н а Л. Е., П и м е н о в В. В. Методы и аппаратура контроля герметичности вакуумного оборудования и изделий приборостроения. – М.: Машиностроение, 1985. – 72 с.
8. К о н т р о л ь герметичности изделий космической отрасли в полноразмерных вакуумных камерах с помощью гелиевых масс-спектрометрических течеискателей методом сравнения с контрольной течью / С.В. Кравченко, С.Б. Нестеров, В.А. Романько и др. // Материалы VI междунар. науч.-технич. конф. “Вакуумная техника, материалы и технологии. – М.: НОБЕЛЛИА, 2011. – С. 57–65.
9. http://www.esa.int/esaMI/Space_Engineering/SEM2MWZO_0WF_0.html
10. http://www.esa.int/esaMI/Space_Engineering/SEM2SD_F280G_0.html
11. http://www.esa.int/SPECIALS/Space_Engineering/SEM8_AWZO0WF_0.html
12. E S T E C Test Centre – Facility Performances summary, http://www.esa.int/esaMI/Space_Engineering/SEM8AWZO0_WF_0.html
13. http://iss.jaxa.jp/iss/kibo/develop_status_42_e.html
14. <http://www.dem.inpe.br/gter/missao.html>
15. <http://www.wyle.com/ServicesSolutions/TestEvaluation/Qualification-CertificationTE/Aerospace-DoD-Commercial/Pages/tvt.aspx>
16. <http://www.oerlikon.com/leyboldvacuum/en/solutions/range-of-products/customized-systems/research-and-development/solutions-range-of-products-customized-systems-rad-largescale/>
17. <http://www.sgi-prozesstechnik.de/htmls/chamber/chambers.htm>
18. http://www.mssl.ucl.ac.uk/heritage/John_Raymont_memoirs/leybold.html
19. <http://www.aspequipment.de/facilities/thermal-vacuum-chamber.html>
20. <http://www.aaadelhi.org/?q=node/35>
21. http://www.angelantoni.it/acs/en/prodotti_speciali/preview_speciali_acs.asp
22. <http://www.intlvac.com/products/vacuum-systems/custom-solutions/thermal-vacuum-systems>

23. http://www.sfa.co.kr/en/product/Product.asp?schcatecode_1=7&schcatecode=9&idx=154
24. <http://www2.ipj.gov.pl/en/zaklady/z5/default.htm>
25. <http://www.edcheung.com/job/sm3b/aruba/aruba2.htm>
26. <http://www.collectspace.com/ubb/Forum35/HTML/000495.html>
27. <https://sites.google.com/site/riverhills/zero-robotics>
28. <http://www.safran-group.com/site-safran-en/aerospace/>
29. <http://www.lowener.se.e.vacuum.systems.html>
30. <http://www.history.nasa.gov.SP-466>
31. <http://facilities.grc.nasa.gov.PS-00566-10-1011>
32. <http://facilities.grc.nasa.gov.PS-00566-12-1011>
33. П е ч а т н ы е материалы NASA Facts Jet Propulsion Laboratory 5-11.
34. <http://www.hq.nasa.gov/office/oim/oia/scap>
35. <http://www.NASA.Southwest.research.institute.IBEX.Interstellar.Boundary.Explorer.htm>
36. <http://www.abbess.instruments.and.systems.inc.Space.Simulation.and.Thermal.Vacuum.Chambers.Vacuum>
37. www.kirtland.af.mil/prs
38. <http://www.ballaerospace.com/galleryworldview1.htm>
39. <http://www.paochiller.com>
40. <http://www.bemcoinc.com>
41. <http://www.ChemCam.html>
42. <http://www.cookevacuum.com>
43. www.eccosorb.com
44. <http://www.lockheedmartin.com>
45. <http://www.boeing.com>
46. <http://www.ll.mit.edu/about/Facilities.html>
47. <http://www.nrl.navy.mil>
48. <http://www.northrop.grumman.com>
49. <http://www.orbital.com>
50. <http://www.phpk.com>
51. <http://www.raytheon.com>
52. <http://www.space-electronics.com>
53. <http://www.ssloral.com>
54. <http://www.thermalproductsolutions.com>
55. <http://www.wyle.com>
56. <http://www.xl-technology.com>
57. <http://acs.pha.jhu.edu>
58. <http://casa.colorado.edu>
59. <http://usl.itu.edu.tr>

60. <http://www.nspo.org.tw>
61. <http://www.high-light.com.tw>
62. <http://www2.ipj.gov.pl>
63. <http://www.angkasa.gov.my>
64. <http://www.cbc.ca>
65. <http://www.mdacorporation.com>
66. <http://www.eschmannstahl.de>
67. <http://accms04.physik.rwth-aachen.de>
68. <http://www.amos.be>
69. <http://www.ortmans.be>
70. <http://www.csl.ulg.ac.be>
71. <http://www.aac-research.at>
72. <http://www.nlr.nl>
73. <http://www.MitsubishiElectric.com>
74. <http://www.bis.gov.uk>
75. <http://www.stfc.ac.uk>
76. <http://facilities.grc.nasa.gov./documents/TOPS/TopPB.pdf>
77. <http://www.nlr.nl/smartsite.dws?l=en&ch=&id=10384>
78. http://www.sectors.wallonia-export.be/en/firm.asp?pole_id=1§or_id=183&firm_id=1647
79. <http://www.csl.ulg.ac.be/index.php?page=37>
80. К р а т С. А., Х р и с т и ч В. В. Тепловакуумная обработка КА: развитие современных тенденций // Вестник СибГАУ. – 2010. – Вып. 4 (30). – С. 123–129.
81. К о л е с н и к о в А. В., С е р б и н В. И. Моделирование условий внешнего теплообмена космических аппаратов / ООО “Информация–XXI век”. – 1997. – 170 с.
82. Т е с т о е д о в Н. А., Х а л и м а н о в и ч В. И., Л ы с е н к о Е. А. Экспериментальная обработка конструкций и механических систем космических аппаратов // Сб. науч. трудов, посвященный 50-летию создания ОАО “ИСС”. – Красноярск: ИП Суховольская Ю.П. – 2009. – 704 с.
83. С п р а в о ч н и к по вакуумной технике и технологиям / Пер. с англ; Под ред. В.А. Романько, С.Б. Нестерова. – М.: Техносфера, 2011. – 736 с.
84. Л а н и с В. А., Л е в и н а Л. Е. Техника вакуумных испытаний. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 264 с.
85. Т е п л о в а к у у м н я я обработка современных космических аппаратов / С.А. Крат, В.И. Халиманович и др. // Материалы VIII Междунар. науч.-практич. конф. “Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития”. – М., 2011. – С. 43–47.
86. М е т о д ы расчета сложных вакуумных систем / Под общ. ред. С.Б. Нестерова и А.В. Бурмистрова. – М.: ОМР. ПРИНТ, 2010. – 370 с.

Статья поступила в редакцию 27.06.2012