

УДК 629.782

**Б. М. Рассемакин<sup>1</sup>, В. А. Рогачев<sup>1</sup>, С. М. Хайрнатов<sup>1</sup>,  
В. И. Хоминич<sup>1</sup>, В. А. Шевченко<sup>2</sup>, С. К. Федоренко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

<sup>2</sup>Національний авіаційний університет, Київ

<sup>3</sup>КП ЦКБ «Арсенал», Київ

**Экспериментальное моделирование  
тепловых режимов эксплуатации  
оптико-электронного измерительного прибора  
для микроспутника**

*Надійшла до редакції 09.04.03*

Описано малогабаритну моделювальну установку ТВК-0.12 для термовакуумних випробувань оптико-електронного приладу (ОЭП) космічного призначення. Обговорюються результати термовакуумних випробувань ОЭП. Наведено розподіли температури на вузлах та елементах ОЭП у залежності від зовнішніх та внутрішніх теплових впливів, що відповідають різним тепловим режимам функціонування ОЭП на орбіті.

**ВВЕДЕНИЕ**

Термовакуумные воздействия являются одними из наиболее важных факторов при эксплуатации оптико-электронных приборов (ОЭП) космического назначения, влияющих на их надежное функционирование в полете. Термовакуумные испытания проводятся, как правило, на каждом этапе разработки и эксплуатации ОЭП. По результатам этих исследований дорабатывается конструкция и формулируются требования к узлам и системам ОЭП. Длительные комплексные термовакуумные воздействия позволяют установить работоспособность ОЭП в целом и выполнить отработку вероятных нештатных ситуаций. Поэтому проведение основной части исследовательских и метрологических работ при испытаниях ОЭП возможно лишь в наземных лабораторных условиях [2—7, 12].

Исходя из вышесказанного, в научно-исследовательском лабораторном центре Национального технического университета «Киевский политехниче-

ский институт» проведены термовакуумные испытания ОЭП, входящего в состав микроспутника МС-1-ТК-ТВ (Украина).

**СРЕДСТВА И МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ  
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

Малогабаритная установка ТВК-0.12 в соответствии с общепринятыми требованиями [2, 5], являющимися необходимыми и достаточными для полного исследования тепловых режимов космической аппаратуры, воспроизводит основные факторы космического пространства: высокий вакуум, солнечное излучение, низкую температуру и «черноту» космического пространства. Структурная схема моделирующей установки ТВК-0.12 представлена на рис. 1.

Вакуумная камера 1 состоит из подъемной части цилиндрической формы в виде колпака и массивного основания-фланца, закрепленного на каркасе и

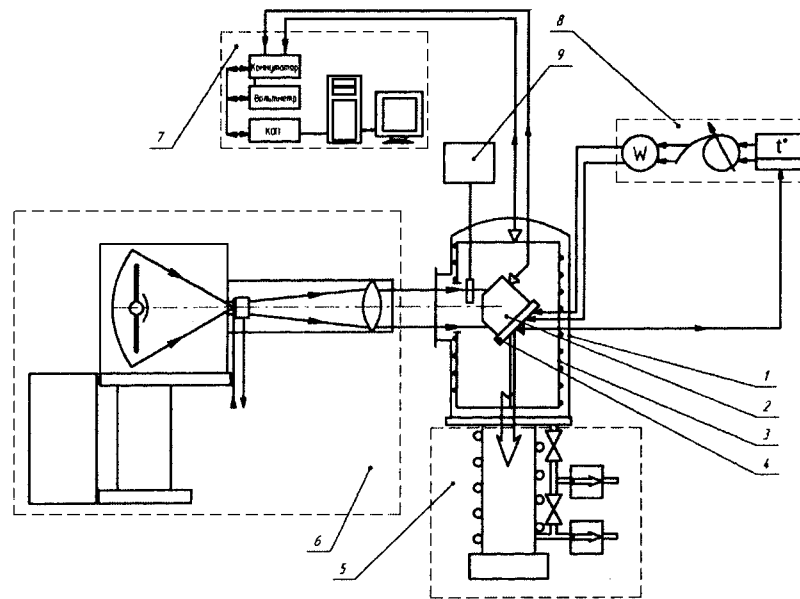


Рис. 1. Структурно-функциональная схема моделирующей установки ТВК-0.12: 1 — вакуумная камера, 2 — оптико-электронный прибор, 3 — криогенная система, 4 — опорно-поворотное устройство, 5 — насосная система, 6 — имитатор солнечного излучения, 7 — автоматизированная многоканальная система измерения температуры, 8 — блок термостабилизации основания, 9 — измеритель тепловой блученности

присоединенного к откачной насосной группе 5. Цилиндрическая часть камеры диаметром 0.5 м и высотой 0.6 м перемещается по отношению к основанию в вертикальном направлении, что обеспечивает удобство монтажа ОЭП 2 во внутреннем объеме камеры. Для ввода внешнего потока теплового излучения к прибору, сбоку камеры расположено круглое окно из кварцевого стекла типа КВ  $\varnothing$  130 мм. Предельное давление в рабочем объеме камеры во время проведения эксперимента составляет  $5 \cdot 10^{-4}$  Па и обеспечивается насосной системой 5, состоящей из двух форвакуумных насосов и паромасляного диффузионного насоса типа Н-2Т-3 со скоростью откачки 1500 л/с. Для защиты от попадания возвратных потоков масел из насосов используется ловушка, охлаждаемая жидким азотом. Контроль за давлением осуществляется стандартным вакуумметром ВИТ-2 с преобразователем ПМТ-2 и диапазоном измерения давления  $10-10^{-5}$  Па с приведенной погрешностью  $\pm 30\%$ .

Криогенная система 3 установки моделирует полное поглощение цилиндрическим замкнутым объемом внешних и внутренних тепловых излучений за счет поверхностей, имеющих высокую степень черноты и охлаждаемых до температуры жидкого азота. Она представляет собой разборную конструкцию, выполненную из верхнего, нижнего и бокового экранов, размещенных внутри вакуумной

камеры и полностью окружающих испытуемый объект. На тыльных поверхностях верхнего и нижнего экранов, изготовленных из сплава алюминия, закреплены хладопроводы в виде проточных медных трубчатых змеевиков. Боковой экран выполнен из медной листовой цилиндрической обечайки  $\varnothing$  0.4 м и высотой 0.4 м, к обратной стороне которой припаяна по спирали медная трубка  $\varnothing$  18 мм. Хладопроводы экранов соединены между собой последовательно с помощью герметичных штуцеров на стык «медь—нержавеющая сталь».

Таким образом, система азотоснабжения является одноконтурной заливной и работает по открытой схеме. Подвод азота производится к нижнему экрану из теплоизолированной емкости. Снятие тепловой нагрузки с криоэкранов осуществляется отводом теплоты путем саморегулируемого кипения жидкого азота в хладопроводе с выхлопом газообразного азота в атмосферу через верхний экран. Разработанная схема азотопитания обеспечивает практически равномерную температуру поверхностей экранов с разбросом, не превышающим  $\pm 3^\circ\text{C}$ , а температурные уровни криоэкранов, в среднем составляющие  $-191^\circ\text{C}$ , с достаточной степенью приближения моделируют «холодное» космическое пространство [2, 5—7]. На поверхности бокового экрана соосно с окном ввода камеры для прохода внешнего излучения к ОЭП выполнено сквозное

отверстие. С целью наилучшего моделирования «черного» космоса лицевая (со стороны объекта) поверхность покрыта черной терморегулирующей эмалью с коэффициентом черноты  $\varepsilon \geq 0.93$ , тыльные поверхности экранов имеют степень черноты  $\varepsilon \leq 0.2$ .

**Имитатор солнечного излучения (ИСИ) 6** разработан и создан в НТУУ «КПИ» и представляет собой коллимирующую оптическую систему, предназначенную для воспроизведения в рабочей зоне камеры лучистого потока, по спектральным характеристикам близкого к заатмосферным солнечным [3, 8, 10, 11]. В качестве источника света используется ксеноновая лампа высокого давления ДКСШ-3000-3 с непрерывным спектром близким к солнечному. Излучение от лампы эллипсоидным отражателем направляется в оптическую систему, формирующую в рабочем объеме камеры поток излучения заданных параметров и состоящую из диафрагмы, оптического интегратора [9] и объектива, смонтированных на направляющих в кожухе. Во избежание недопустимых перегревов ламповый блок охлаждается воздухом, подаваемым центробежным вентилятором, а диафрагма и оптический интегратор охлаждаются проточной водой. Изменение положения пучка излучения в пространстве и соосность его с ОЭП осуществляются с помощью поворотных механизмов имитатора. Регулирование энергетической освещенности в рабочей зоне производится путем изменения мощности электропитания лампы от стабилизированного выпрямителя 50 ВУК-120-1, обеспечивающего изменение плотности потока в диапазоне 1000—4000 Вт/м<sup>2</sup>. Кроме того, мощность лучистого потока может регулироваться за счет изменения размера отверстия диафрагмы. Предварительно диапазон энергетической освещенности ИСИ определялся с помощью измерителя оптического излучения ИМО-2Н.

Имитатор солнечного излучения характеризуется следующими основными техническими данными: спектр излучения близок к солнечному в пределах длин волн 0.25—2.5 мкм; диаметр освещаемой площадки 120 мм; неоднородность поля лучистого потока не превышает  $\pm 7\%$ ; угол расходимости лучей не более  $\pm 1.5^\circ$ . Угол расходимости определялся методами сечений и фокального пятна [1]. Контроль величины энергоосвещенности плоскости размещения испытуемого прибора осуществляется фотоприемником излучения 9 с размером чувствительного элемента 10×9×0.5 мм, непосредственно подключенным к цифровому регистрирующему прибору (рис. 1).

**Автоматизированная многоканальная система измерения температуры (АМСИТ) 7** [6, 7]

имеет 96 каналов связи (80 измерительных и 16 управляющих) и характеризуется временем опроса одного датчика температуры в диапазоне 0.4—0.8 с. Для измерения температур на поверхностях испытуемого прибора и криоэкранов применяются два типа миниатюрных контактных датчиков: медь-константановые термопары и термометры сопротивления, чувствительные элементы которых изготовлены методом напыления [6, 7]. Величины максимальных абсолютных погрешностей измерения температуры термометрами сопротивления составляют  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ , а термопарами —  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . Сигналы с датчиков по линиям связи поочередно поступают на коммутатор, управляемый по интерфейсу канала общего пользования (КОП) ПЭВМ, а затем на вольтметр, который измеряет сигналы коммутируемых датчиков, и по шине через интерфейс КОП передает информацию в компьютер.

Работа АМСИТ осуществляется под управлением специального программного обеспечения, разработанного в НТУУ «КПИ» и ориентированного на таблично-графическое представление экспериментальных данных, предварительную их обработку и архивацию.

**Опорно-поворотное устройство 4** представляет собой механизм, позволяющий перемещать ОЭП, закрепленный на плоском основании в виде плиты по высоте камеры, изменять угол его наклона по отношению к падающему потоку излучения и вращать его вокруг собственной оси. В настоящих исследованиях угол наклона выбран таким образом, что на приемную плоскость ОЭП падает максимально возможный поток излучения и равный  $\approx 1400$  Вт/м<sup>2</sup>.

Тепловые воздействия со стороны установочной платформы микроспутника, контактирующей в реальных условиях эксплуатации с ОЭП, имитируются с помощью регулируемого подогрева основания, оснащенного резистивным нагревателем, размещенным во внутренней полости основания и подключенным к блоку термостабилизации 8. При проведении термовакуумных испытаний на поверхности основания ОПУ воспроизводятся и автоматически поддерживаются стабилизированные температурные режимы, соответствующие условиям работы ОЭП при орбитальном полете.

#### ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ПРИБОРА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Оптико-электронный прибор разработан в КП «ЦКБ Арсенал» (г. Киев) и предназначен для определения направления КА на геометрический центр Солнца в приборной системе координат.

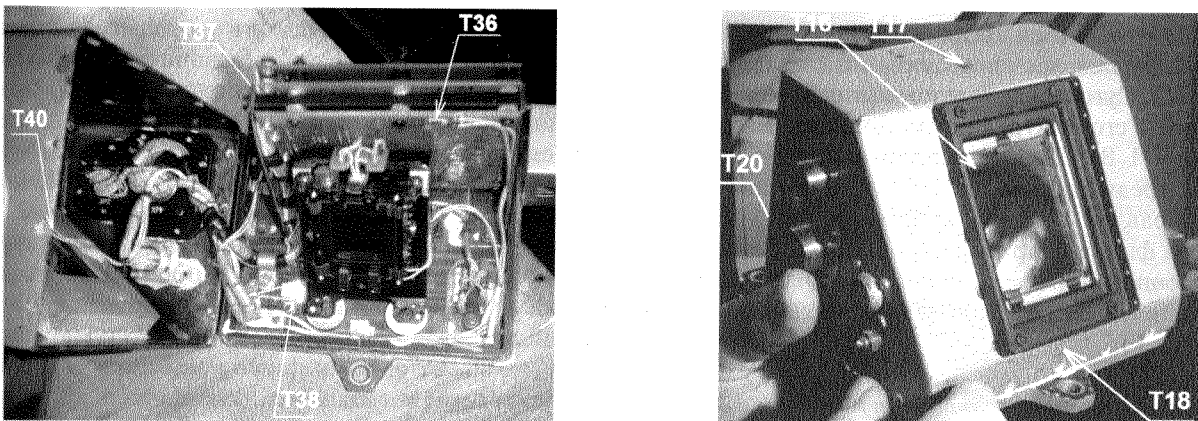


Рис. 2. Размещение и обозначение датчиков внутри (а) и снаружи (б) прибора в режиме «тень»

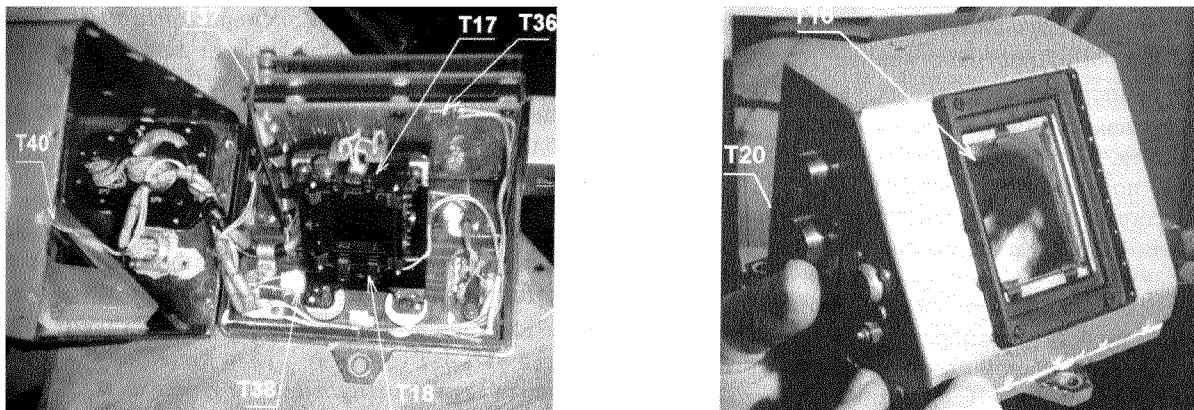


Рис. 3. Размещение и обозначение датчиков внутри (а) и снаружи (б) прибора в режиме «освещение»

Продолжительность экспериментов определялась условиями полета и цикличностью работы ОЭП. Исходя из поставленных задач испытаний, проверка теплового режима данного типа ОЭП выбиралась на основе экстремальных условий его функционирования на орбите в соответствии с летной программой. В настоящих испытаниях исследована работоспособность ОЭП в двух тепловых режимах: «тень» и «освещение».

В режиме «тень», имитирующем условия эксплуатации ОЭП на теневой орбите, определяются температурные поля внутри и снаружи прибора при стабильном поддержании температуры основания на уровне минус  $10 \pm 2$  °С. В этом режиме воздействие солнечного излучения на прибор отсутствует (ИСИ выключен) и воспроизводятся влияние вакуума и низкой температуры космического пространства. Длительность режима «тень» составляет 12 ч. В режиме «освещение», имитирующем условия эксплуатации ОЭП на солнечном участке орбиты, осуществляется поддержание температуры основа-

ния на уровне  $+45 \pm 2$  °С и воспроизводятся воздействия вакуума, холода и солнечного излучения (ИСИ включен). Продолжительность режима «освещение» составляет 120 ч непрерывной работы оборудования и аппаратуры испытательного комплекса ТВК-0.12. Принимается, что тепловой режим является установившимся, если изменение показаний любого датчика температуры происходят со скоростью до 2 °С/ч.

Топология термодатчиков в контрольных точках внутри и снаружи прибора, их обозначения и нумерация для теплового режима «тень» приведены на рис. 2. Внутри прибора по его элементам и узлам установлены четыре термодатчика Т36, Т37, Т38 и Т40. Снаружи на кожухе прибора размещены датчики — Т16, Т17, Т18 и Т20.

Для теплового режима «освещение» размещение и обозначения датчиков приведены на рис. 3. Внутри прибора на его узлах и элементах расположено шесть термодатчиков Т17, Т18, Т36, Т37, Т38, Т40, а снаружи два — Т16 и Т20.

Для обоих режимов средняя температура криоэкранов поддерживалась постоянной и составляла минус 191 °С. Суммарное тепловыделение прибора за счет работы его внутренних источников нагрева не превышает 1 Вт. Прибор теплоизолирован от окружающей среды чехлом из ЭВТИ. Световой пучок ИСИ направлен перпендикулярно к плоскости оптического фильтра прибора (рис. 3, б). Температуру посадочной плоскости основания ОПУ, на котором крепился ОЭП, контролировали термопары T13, T14, T15.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты исследований в режиме «тьень» представлены в виде графических зависимостей  $t_i = f(\tau)$  на рис. 4. Пространственное распределение значений температур  $t_i$  основных узлов и элементов прибора показано для любого промежутка времени эксперимента. Как видно, средняя температура стабилизации посадочной плоскости T13, T14, T15 в течение всего режима поддерживается практически постоянной (-10 °С) в пределах заданных колебаний.

Из анализа экспериментальных данных следует, что самая низкая температура внутри прибора наблюдается на тыльной стороне оптического фильтра кожуха T40  $\approx$  -28 °С. Температуры на радиоплатах отличаются между собой на 4...5 °С, причем T36, расположенная в верхней части ближней платы выше, чем T37, находящаяся в нижнем углу дальней платы. Как и ожидалось, температура дна прибора T38 близка к температуре посадоч-

ной плоскости в результате хорошего теплового контакта и эффективной передачи теплоты теплопроводностью по конструктивным металлическим связям прибора.

Температуры снаружи прибора на различных металлических гранях кожуха T17, T18, T20 практически не отличаются и составляют -20...-22 °С. По-видимому, наблюдаемая изотермичность связана с тем, что прибор защищен от внешних воздействий среды чехлом ЭВТИ. Самая низкая температура прибора зафиксирована на стекле фильтра T16  $\approx$  -30 °С, так как фильтр является единственной открытой нетеплоизолированной областью прибора, через которую происходит неэффективный теплосброс внутренней нагрузки путем излучения от прибора к криоэкранам камеры.

Проведенный анализ экспериментальных данных показывает, что температурный диапазон основных узлов и элементов внутри ОЭП в режиме «тьень» лежит в пределах -8...-28 °С, а снаружи прибора по абсолютным значениям он ниже и изменяется от -20 до -31 °С.

Температурное поле прибора в режиме «освещение» представлено на рис. 5. Графические зависимости  $t_i = f(\tau)$  иллюстрируют температурное поле ОЭП в течение 120 ч непрерывного эксперимента. Как видно, средние температуры посадочной плоскости ОПУ T13, T14, T15 в течение всего эксперимента стабилизированы в требуемых пределах ( $+45 \pm 2$  °С). Температуры металлических узлов ОЭП T17, T18 и T38 близки по значениям к температуре посадочной плоскости (41...42 °С) в результате высокой тепловой проводимости их кондуктивных связей. Температура ближней радио-

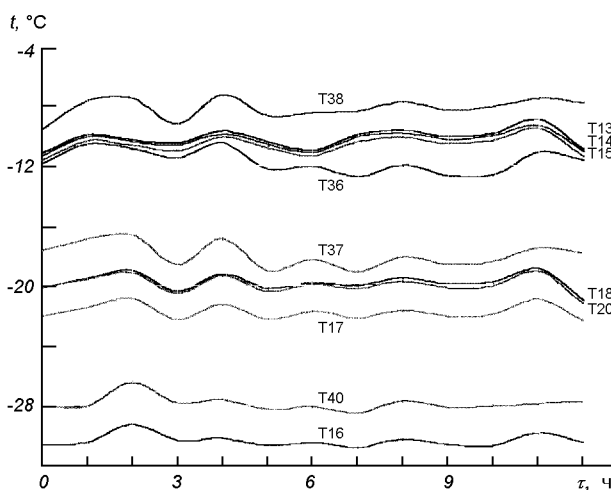


Рис. 4. Температурное поле прибора в режиме «тьень» при средней температуре основания ОПУ минус 10 °С (длительность испытаний 12 ч)

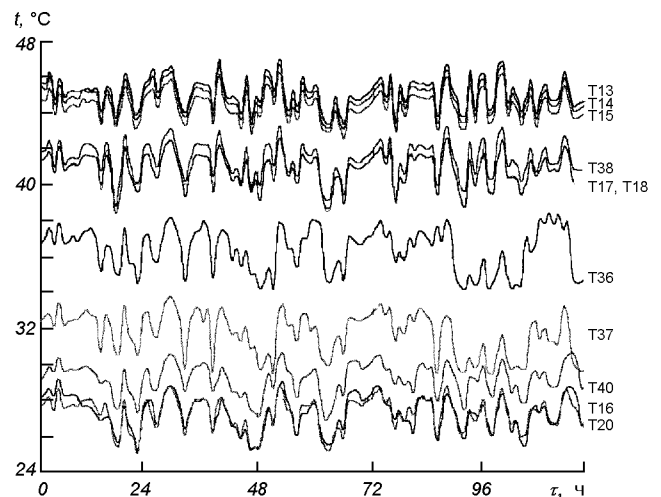


Рис. 5. Температурное поле прибора в режиме «освещение» при средней температуре основания ОПУ +45 °С (длительность испытаний 120 ч)

платы Т36 выше, чем на дальней радиоплате Т37 (соответственно 34...36 °С и 30...32 °С), наблюдаемое их температурное различие такое же, как и в режиме «тень». Самая низкая температура внутри прибора, примерно 28...30 °С, зафиксирована на тыльной стороне фильтра кожуха Т40.

Температуры снаружи на стекле фильтра Т16 и металлической стенке кожуха Т20, теплоизолированного ЭВТИ на протяжении всего времени испытаний остаются практически неизменными и составляют 26...28 °С. Относительно низкая температура Т16 связана с высокими отражательными свойствами материала оптического фильтра. Из анализа экспериментальных данных в режиме «освещение» следует, что диапазон значений температур основных узлов и элементов лежит в пределах 28...42 °С внутри ОЭП и 26...28 °С снаружи прибора.

Из данных рис. 4 и 5 видно, что избыточная суммарная теплота, накапливаемая внутри прибора, в результате внешних теплообменных процессов и внутренних тепловыделений при работе самого ОЭП, сбрасывается в окружающую среду в обоих режимах через окно оптического фильтра (см. рис. 2, 3). С другой стороны, в режиме «освещение» тепловой поток от ИСИ лишь частично проникает во внутренний объем ОЭП через оптический фильтр кожуха и практически не прогревает его узлы и элементы.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенных циклов отработки тепловых режимов «тень» (12 ч) и «освещение» (120 ч) ОЭП в моделирующей термовакуумной установке ТВК-0.12:

- исследованы фактически реализующиеся поля температур ОЭП в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным;
- подтверждена работоспособность узлов, элементов ОЭП и стабильность его основных параметров при воздействии основных факторов космического пространства: для режима «тень» при температуре посадочной плоскости минус 10 °С: их температурные пределы функционирования -8 °С ... -31 °С, для режима «освещение» при температуре посадочной плоскости 45 °С: их температурные пределы функционирования 26...42 °С;
- осуществлена проверка на стойкость узлов и элементов прибора в условиях термовакуумного воздействия;
- экспериментальные данные использованы в тепловых расчетах проектируемых приборов.

Созданный в НТУУ «КПИ» лабораторный стенд ТВК-0.12 показал надежность и хорошую работоспособность при проведении настоящих длительных и непрерывных исследований ОЭП.

1. Дубиновский А. М., Панков Э. Д. Стендовые испытания и регулировка оптико-электронных приборов. — Л.: Машиностроение, 1986.—152 с.
2. Козлов Л. В. и др. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды — М.: Машиностроение.—1971.—382 с.
3. Копятевич Р. М. и др. Тепловые режимы радиоэлектронных приборов космических аппаратов // Тр. Второй российской национальной конференции по теплообмену. — 1999.—Том 1.—С. 129—132.
4. Мартынов Д. А. Моделирование тепловых воздействий при проведении испытаний оптико-электронных приборов в вакууме // Оптический журн.—1994.—№ 11.—С. 23—26.
5. Нусинов М. Д. Воздействие и моделирование космического вакуума. — М.: Машиностроение.—1982.—176 с.
6. Рассамкин Б. М., Рогачев В. А., Хоминич В. И. и др. Экспериментальное моделирование тепловых режимов малогабаритных космических аппаратов и их внешних тепловых потоков. I. Термовакуумная установка ТВК-2.5 // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 1.—С. 37—41.
7. Рассамкин Б. М., Рогачев В. А., Хоминич В. И. и др. Экспериментальное моделирование тепловых режимов малогабаритных космических аппаратов и их внешних тепловых потоков. II. Результаты термовакуумных испытаний макета микроспутника типа МС-1-ТК-ТВ // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 4.—С. 3—10.
8. Рымов А. И. Имитатор солнечного излучения // Светотехника.—1989.—№ 9.—С. 4—6.
9. Рымов А. И., Скоблова В. И. Оптические интеграторы // Светотехника.—1988.—№ 8.—С. 12—15.
10. Смолкин М. Н., Тельный А. А. Источники света для имитации солнечного излучения // Оптико-мех. пром-сть.—1979.—№ 10.—С. 51—54.
11. Тельный А. А. Имитация солнечного излучения в лабораторных условиях // Оптико-мех. пром-сть.—1975.—№ 5.—С. 43—47.
12. Шеволдин В. А., Гридин А. С. Комплексное физическое моделирование условий эксплуатации оптико-электронных приборов // Оптический журн.—1994.—№ 1.—С. 95—100.

## PHYSICAL SIMULATION OF EXTERNAL ENVIRONMENT AND THERMAL VACUUM TESTS OF OPTICAL-ELECTRONIC MEASURING DEVICE FOR THE MICRO-SPUTNIK

B.M.Rassamakin, V. A. Rogachov, S. M. Khairnasov,  
V. I. Khomeinich, V. A. Shevchenko, S. K. Fedorenko

Bench equipment and simulation facility of TVC-0.12 type for thermal vacuum tests of an optical-electronic device (OED) for space application are described. Results of OED thermal vacuum tests are discussed. We give OED space temperature fields in relation to external and internal heat effects corresponding to various heat modes of the OED operation in orbit.