

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

УДК 629.78.085; 629.78.087

С. А. Жданок, Л. Л. Васильев, А. Г. Кулаков, М. И. Рабецкий

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В СИСТЕМАХ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассматриваются разработки Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси в области космических технологий. Тепловые трубы и системы теплового контроля на их основе нашли применение в искусственных спутниках Земли серии «Интеркосмос», космических аппаратах «Союз», на космической станции «Мир». Описывается сублимационный теплообменник для обеспечения необходимого теплового режима в скафандре космонавта.

Введение

Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ИТМО НАН Беларуси) начиная с середины 1960-х гг. активно участвовал в разработке космических технологий и исследовании космического пространства по программам Академий наук СССР и БССР, а также в рамках хозяйственных работ с ведущими предприятиями бывшего Советского Союза [1–10]. Впервые тепловые трубы (ТТ) были испытаны в составе космических аппаратов в начале 1970-х гг. С тех пор множество ТТ использовалось в различных системах теплового контроля (СТК), причем количество разработанных и внедренных труб росло по мере усложнения задач, которые можно было решить с их помощью.

Современные ТТ обладают высокими термодинамической эффективностью (0,96 от эффективности цикла Карно) и надежностью. Они работают в качестве систем терморегулирования на космических аппаратах уже в течение 5–10 лет. Кроме того, их стоимость не так велика по сравнению с активными компонентами СТК.

ТТ применяются в СТК для следующих целей:

- отвода тепла от отдельных тепловыделяющих элементов и оборудования;
- выравнивания температуры в протяженных конструктивных элементах;
- поддержания температурного режима выделенного объекта с требуемой точностью;
- ограничения возвратного теплового потока;
- разработки поверхностей излучения высокой эффективности с использованием панелей в сотовых радиаторах со встроенными ТТ.

В 1970–1990 гг. в СССР более 20 организаций включились в разработку и производство ТТ для космических аппаратов. ИТМО АН БССР был инициатором работ по созданию новых конструкций ТТ и организатором регулярно проводимых конференций по ТТ в СССР. В начале 1980-х гг. была создана секция «Тепловые трубы» при научном совете «Тепло- и массоперенос» в БССР, а также при научном совете «Теплофизика» в Академии наук СССР.

Лаборатория низких температур (с 1986 г. переименована в лабораторию пористых сред) разработала ряд оригинальных конструкций ТТ, испарителей, конденсаторов и сублиматоров космического назначения. Некоторые из разработанных изделий нашли применение в НПО «Энергия», НПО им. Лавочкина (Москва) и КБ «Южное» (Днепропетровск). В 1974 г. были проведены натурные эксперименты по проверке алюминиевых ТТ с аксиальными канавками конструкции ИТМО АН БССР. Данные ТТ были предназначены для выравнивания температуры корпуса космического аппарата ИСЗ «Интеркосмос-11». С целью получения опытных данных для выбора оптимальной конструкции ТТ натурные эксперименты были продолжены на искусственном спутнике Земли «Интеркосмос-15», запущенном 19 июня 1976 г. Испытания проводились на трех алюминиевых ТТ длиной 412 мм и с наружным диаметром 14 мм. Капиллярная структура ТТ выполнена в виде прямоугольных канавок глубиной 0,6 мм, шириной

0,5 мм с шириной ребра 0,6 мм. В качестве рабочей жидкости использовался чистый аммиак. Результаты экспериментов были опубликованы в работах [1, 2].

В ИТМО НАН Беларуси была создана термовакуумная камера объемом 10 м^3 для проведения испытаний компонентов космических аппаратов (рис. 1). В 2001–2003 гг. на этом оборудовании был выполнен контракт с Китайским институтом медико-инженерных проблем в космосе (China Institute of Space-Medico & Engineering). В результате был создан и внедрен сублимационный теплообменник для скафандра китайского космонавта. В 2004–2005 гг. в институте выполнена разработка и проведены термовакуумные испытания массогабаритного макета системы терморегулирования на алюминиевых ТТ с продольными канавками для оптоэлектронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли (рис. 2). Разработка внедрена на изделиях ОАО «Пеленг».

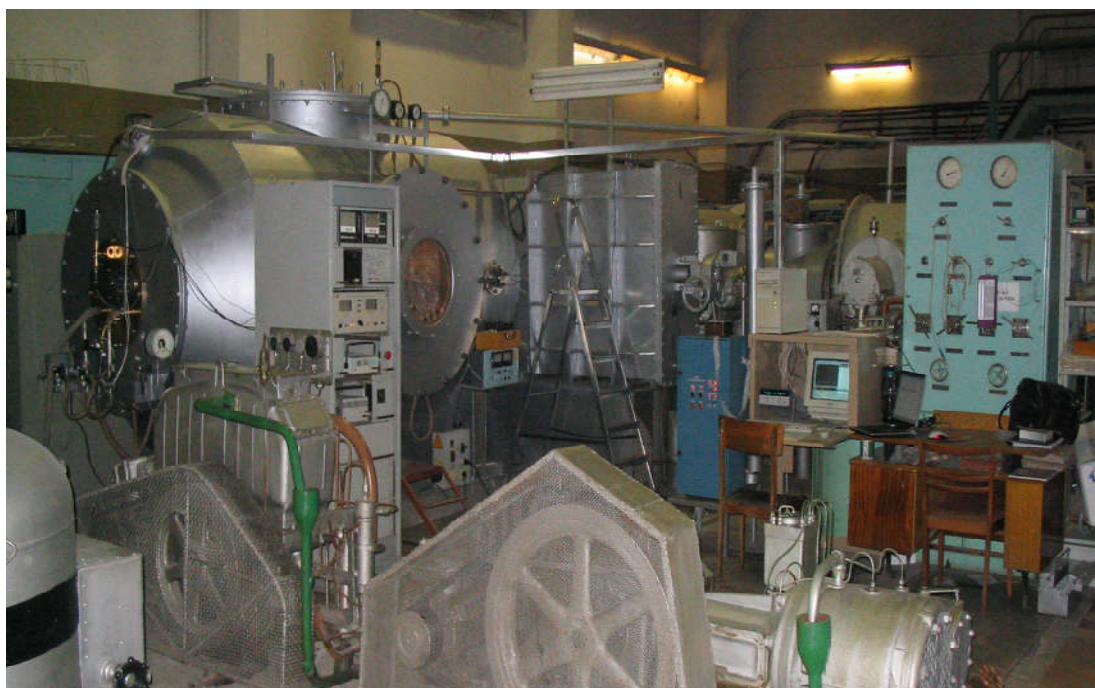


Рис. 1. Комплекс вакуумных установок лаборатории пористых сред ИТМО НАН Беларуси для испытаний различных конструкций ТТ, используемых в космических аппаратах

Интенсивные лабораторные и натурные испытания ТТ космического назначения начались в середине 1980-х гг. Совместно с НПО «Энергия» были проведены работы по созданию двухфазных систем терморегулирования и определению теплофизических свойств теплоизоляции космических станций «Салют» и «Мир». Совместно с НИИХИММАШ (Загорск, Россия) были проведены разработки систем получения, использования и хранения шугообразного водорода, криогенных жидкостей и топлива (испарителей, сублиматоров). Было решено использовать алюминиевые ТТ в СТК научных модулей на космической станции «Мир». После этого ТТ применялись на других космических аппаратах.

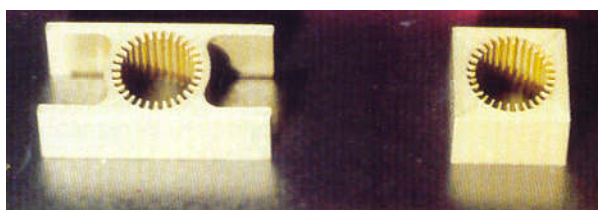


Рис. 2. Элементы алюминиевых ТТ с продольными канавками в качестве капиллярной структуры

Дальнейшее усовершенствование ТТ с продольными канавками в ИТМО НАН Беларуси было связано с нанесением покрытий на поверхности канавок тонкого слоя пористой структуры. Это усовершенствование было вызвано необходимостью интенсификации теплообмена при испарении жидкости в испарителе и конденсации пара в конденсаторе ТТ (рис. 3). Процесс теплообмена в испарителе ТТ с канавками и пористым покрытием существенно интенсивнее по сравнению с аналогичным процессом в ТТ с канавками без пористого покрытия.

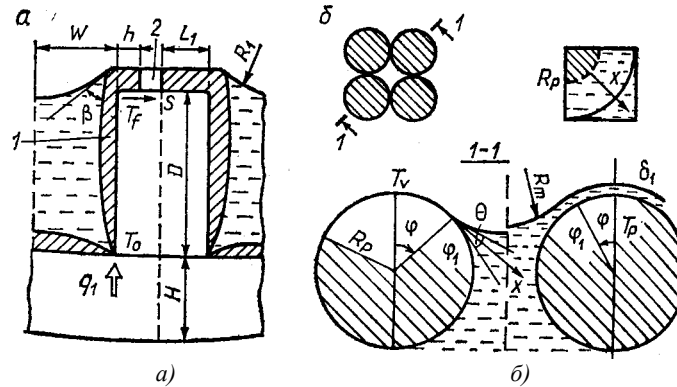


Рис. 3. Капиллярное покрытие на фитиле тепловой трубы: а) ребро с пористым покрытием (1 – пористый слой, 2 – осушенный участок ребра); б) частицы пористого тела, смоченные жидкостью

Эксперименты по теплообмену в испарителе ТТ (два типа труб с различной толщиной пористого слоя) с продольными канавками в качестве капиллярной структуры показали заметную интенсификацию теплообмена при наличии тонкого пористого слоя, которая может быть объяснена тем, что испарение происходит в менисках пористого покрытия на поверхности ребер, куда жидкость поступает под действием капиллярных сил (рис. 4).

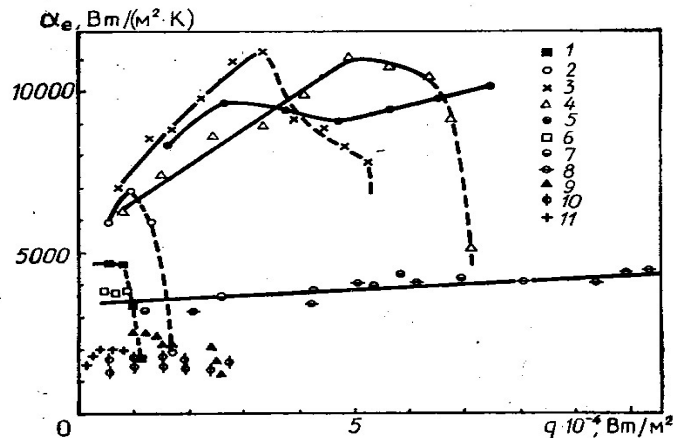


Рис. 4. Теплообмен в испарителе алюминиевой ТТ с продольными прямоугольными канавками и ребрами с пористым покрытием (3–5) и без него (8–11). Рабочая жидкость – ацетон

1. Теплообмен при испарении жидкости в тонких пористых структурах

В середине 1980-х гг. в лаборатории пористых сред ИТМО АН БССР для НПО «Энергия» были разработаны испарители, предназначенные для использования в двухфазных системах обеспечения теплового режима (СОТР). В конструкции испарителей были использованы напорная подача теплоносителя с помощью насоса и схемы испарения с «перевернутым мениском», характерные для контурных ТТ. Для интенсификации теплообмена на теплонагружен-

ной поверхности использовались капиллярные пористые структуры (КПС) высокой теплопроводности и проницаемости. Были выполнены работы по обеспечению хорошего теплового контакта КПС с теплонагруженной стенкой, что позволило интенсифицировать процесс тепло- и массообмена в испарительных теплообменниках и обеспечить интенсивный теплоотвод с теплонагруженных поверхностей космических аппаратов.

Элемент испарителя с капиллярным затвором работает по принципу «перевернутого мениска» (рис. 5). Движение жидкого теплоносителя (4) происходит через КПС (1), прижатую к обогреваемой стенке (2), навстречу тепловому потоку. В стенке (или КПС) выполнена система каналов для движения пара (3), сообщающаяся с паровым коллектором двухфазной системы охлаждения СОТР. Рабочая жидкость – ацетон.

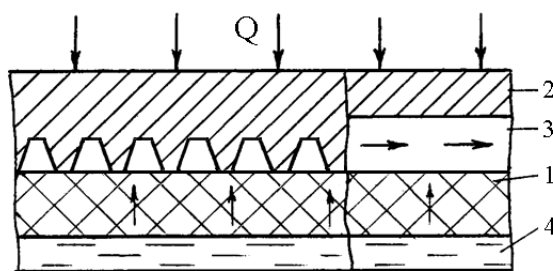


Рис. 5. Принципиальная схема элемента испарителя с капиллярным затвором

Исследования теплообмена, выполненные при давлении пара $(0,3-3) \cdot 10^5$ Па в диапазоне изменения плотностей теплового потока $(1,9-13) \cdot 10^4$ Вт/м² (диапазоне подводимого теплового потока 250–1800 Вт), свидетельствуют о высокой интенсивности теплообмена и целесообразности использования предложенного конструктивного решения для двухфазных СОТР с напорной прокачкой теплоносителя. Процесс испарения в порах КПС отличается высокой интенсивностью и стабильностью. Отсутствуют гистерезис при повышении и понижении тепловой нагрузки, а также автоколебания при быстрой смене режимов работы изделия. На выходе испарителя имеет место высокое паросодержание потока теплоносителя, что подтверждает эффективность его работы (рис. 6).

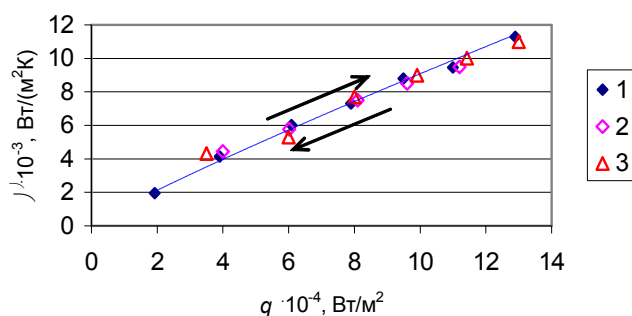


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплообмена при испарении жидкости в пористой структуре от плотности теплового потока на стенке испарителя

На рис. 6 показаны характерные результаты исследования интенсивности теплоотдачи при циклическом изменении теплоподвода: при повышении теплового потока (1), при его снижении (2) и при подводе тепла в импульсном режиме (3). Полученные опытные данные для испарения ацетона в исследованном диапазоне с точностью ± 18 % аппроксимированы зависимостью $\alpha = 0,35 q^{0,88}$.

2. Теплообмен при конденсации пара на поверхности, покрытой тонким слоем пористого тела

Одним из эффективных способов снижения термического сопротивления конденсаторов является уменьшение толщины пленки конденсата путем его отсоса от теплообменной поверхности с помощью капиллярных структур. Однако, несмотря на то, что такие конструктивные решения широко применяются, обычно отвод конденсата от оребренной поверхности осуществляется с помощью гравитационных сил, что ограничивает возможности интенсификации. Отличительной особенностью выполненных исследований является использование капиллярных структур в виде тонкого слоя пористого материала и перепада давления между фазами теплоносителя в качестве капиллярного затвора для интенсификации теплообмена и отвода конденсата. Размеры конденсаторов с капиллярными нарезками следующие: длина оребренной поверхности – 60 мм, наружный диаметр несущей трубы – 16 мм, количество паровых каналов – 12, шаг нарезки – 0,8 мм, высота – 0,5 мм, ширина зазора в капиллярной щели с учетом гофрированных вставок – 0,05 мм, диаметр жидкостной артерии – 1 мм. Коэффициент теплообмена, полученный в конденсаторах этой конструкции, в диапазоне давлений теплоносителя $(0,3 \div 2,2) \cdot 10^5$ Па равен $(5 \div 7) \cdot 10^4$ Вт/(м²·К). Для изучения закономерностей процессов теплообмена при конденсации в капиллярных каналах (рис. 7) создана конструкция конденсатора с пористой пластиной. Его основными элементами являются поверхность конденсации с капиллярными нарезками (1), паровые каналы (3) и пластина из пористого алюминия (2), установленная на этой поверхности. Жидкая фаза фильтруется через капиллярно-пористую пластину под действием капиллярных сил и избыточного давления в паре. Конденсатор выполнен из алюминиевой КПС с проницаемостью $1,2 \cdot 10^{-12}$ м², диаметром пор 15 мкм и толщиной 9 мм; капиллярные каналы имеют прямоугольную форму, $w=0,4$ мм, $h=1$ мм, $s=1$ мм, $A_b=0,01$ м². Экспериментально полученная зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока (рис. 8) свидетельствует о высокой интенсивности теплообмена в конденсаторе с пористой пластиной. Ее характерной особенностью является наличие максимума при плотностях теплового потока 6–9 Вт/см² и плато с незначительным снижением величины коэффициента теплоотдачи при увеличении тепловой нагрузки.

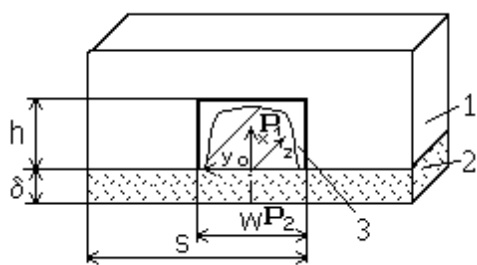


Рис. 7. Схема конденсации в капиллярном канале с пористой стенкой

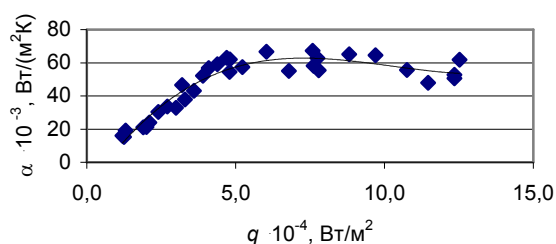


Рис. 8. Влияние плотности теплового потока на теплоотдачу при конденсации ацетона в капиллярных каналах с пористой стенкой

Экспериментальные данные обобщены в критериальной форме зависимостью $Nu = CRe^n$ с погрешностью не более ± 20 % с соответствующими коэффициентами для двух характерных областей: для $Re < 0,4$, $C = 885,4$, $n = 1$; для $Re \geq 0,4$, $C = 327,3$, $n = -0,145$. В качестве определяющего размера был принят шаг капиллярного оребрения s . Критерий Рейнольдса Re определяется как

$$Re = \frac{Qs}{A_b h_{fg} \mu}, \quad \text{критерий Нуссельта} - \text{как } Nu = \frac{\alpha_b s}{\lambda_1}.$$

3. Теплообмен в пористых сублимационных теплообменниках

Система контроля теплообмена и влагосодержания играет важную роль в разработке скафандров космонавтов. Необходимо эффективно отводить влагу и обеспечивать нужный температурный режим внутри костюма. В качестве одного из основных способов решения данной задачи является применение сублимационного теплообменника (рис. 9). В лаборатории пористых сред ИТМО НАН Беларуси в 2002–2003 гг. были проведены экспериментальные исследования процесса сублимационного охлаждения для системы терморегулирования скафандра (рис. 10, 11). Цилиндрический сублимационный теплообменник содержал металлическую пористую оболочку, жидкостный теплообменник и специальную капиллярно-пористую структуру внутри аппарата. С целью повышения интенсивности охлаждения рабочей жидкости костюма космонавта был организован процесс тепло- и массообмена внутри аппарата по принципу работы микротепловых труб.

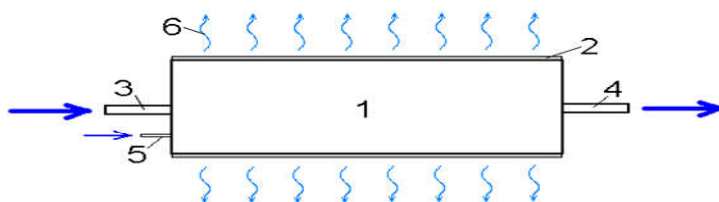


Рис. 9. Схема цилиндрического сублимационного теплообменника:
1 – трубчатый жидкостный теплообменник, 2 – металлическая пористая оболочка, 3 – вход теплой воды, 4 – выход холодной воды, 5 – вход воды в пористую структуру сублиматора, 6 – водяной пар на выходе из сублиматора

Основным требованием к сублимационному теплообменнику является обеспечение минимума перепада температуры между стенкой жидкостного теплообменника внутри сублиматора и поверхностью пористой оболочки, где происходит процесс замораживания воды и сублимации пара в вакуум.

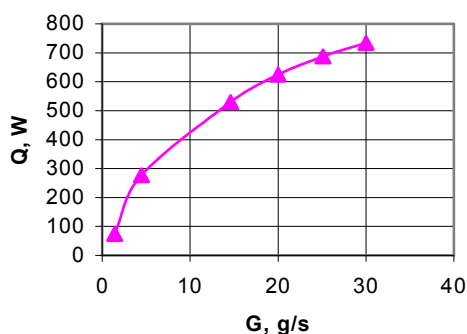


Рис. 10. Теплосъем в сублиматоре как функция скорости потока воды в жидкостном теплообменнике, $T_{ж} = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$

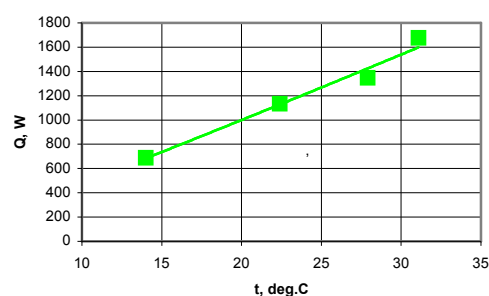


Рис. 11. Теплосъем в сублиматоре как функция температуры жидкости в теплообменнике при постоянном расходе жидкости 27 г/с

Разработанный сублимационный теплообменник имеет простую и надежную конструкцию, изготовлен из дешевых материалов и может быть использован как в космических технологиях, так и в других отраслях промышленности.

Заключение

В ИТМО НАН Беларуси имеется большой научный задел и современная экспериментальная база для проведения исследований компонентов космической аппаратуры, в частности двухфазных систем терморегулирования космических аппаратов. Часть работ по космической тематике в настоящее время выполняется в рамках проекта ИНТАС (INTAS Collaborative Call with CNES and NSAU on Space Technologies, Ref. Nr. 06-1000024-8916).

Список литературы

1. Васильев, Л.Л. Испытания тепловой трубы в космических условиях / Л.Л. Васильев, В.В. Гиль, А.Н. Жариков // ИФЖ. – 1976. – Т. 31. – С. 990–995.
2. Натурные испытания тепловых труб для систем терморегулирования космических аппаратов / Л.Л. Васильев [и др.] // ИФЖ. – 1980. – Т. 38, № 5. – С. 779–783.
3. Vasiliev, L.L. Low Temperature Axially Grooved Heat Pipes / L.L. Vasiliev, L.P. Grakovich, D.K. Khrustalev // Advances in Heat Pipe Technology. Proc. of the IV Int. Heat Pipe Conf. – England, 1981. – P. 337–348.
4. Vasiliev, L.L. Heat Pipes with alternative sources of Energy / L.L. Vasiliev, G.P. Grakovich, D.K. Khrustalev. – Minsk: Science and Technology, 1988. – 160 p.
5. Vasiliev, L.L. High-Efficient Condenser with Porous Element / L.L. Vasiliev, D.K. Khrustalev, A.G. Kulakov // SAE Technical Paper Series 911524. 21st Int. Conf. on Environmental Systems. – San Francisco, California, 1991.
6. High-Efficient Condensers with Capillary Channels / L.L. Vasiliev [et al.] // Advances in Heat Pipe Science and Technology. Proc. of the 8th Int. Heat Pipe Conf. – China, 1992. – P. 259–263.
7. Vaporization Heat Transfer in Porous Wicks of Evaporators / L.L. Vasiliev [et al.] // Archives of Thermodynamics. – Vol. 25, № 3. – 2004. – P. 47–59.
8. Vasiliev, L. Heat Pipes in Modern Heat Exchangers / L. Vasiliev // Applied Thermal Engineering. – Vol. 25. – 2005. – P. 1–19.
9. Vasiliev, L. Sorption Heat Pipe – a New Thermal Control Device for Space and Ground Application / L. Vasiliev, L. Vasiliev Jr. // Int. J. Heat Mass Transfer. – Vol. 48. – 2005. – P. 2464–2472.
10. Vasiliev, L. Heat Transfer with Propane Evaporation from a Porous Wick of Heat Pipe / L. Vasiliev [et al.] // J. Porous Media. – Vol. 4, № 2. – 2001. – P. 103–111.

Поступила 16.07.07

*Институт тепло- и массообмена
им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
Минск, ул. П. Бровки, 15
e-mail: LVASIL@hmti.ac.by*

S.A. Zhdanok, L.L. Vasiliev, A.G. Kulakov, M.I. Rabetsky

APPLICATION OF HEAT AND MASS TRANSFER TECHNOLOGIES AT TEMPERATURE CONTROL SYSTEMS OF SPACECRAFTS

The developments concerning the space technologies in A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Sciences of Belarus are considered. Heat pipes and temperature control systems based on heat pipes are used for space satellites of «Intercosmos» and spacecrafts of «Soyuz» series, orbital station «Mir». A sublimation heat exchanger for thermal control in a cosmonaut spacesuit is described.