



УДК 629.7.023.224

*Симбиркина А. Н.<sup>1</sup>, Черваков О. В.<sup>2</sup>, Потапов А. М.<sup>1</sup>, Мацука А. И.<sup>2</sup>, Черваков Д. О.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля.  
Украина, г. Днепропетровск

<sup>2</sup>Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет». Украина, г. Днепропетровск

#### ОТЕЧЕСТВЕННОЕ НАПЫЛЯЕМОЕ ТЕПЛОЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

*В данной работе приведена информация об отечественном напыляемом теплозащитном покрытии НТЗП-У, получаемого послойным нанесением методами пневматического или безвоздушного распыления. НТЗП-У представляет собой композицию на основе полиуретановых водных дисперсий, стеклянных и полимерных микросфер, антипиренов и ряда других добавок, обеспечивающих как технологичность напыления его жидкой композиции, так и стойкости готового покрытия на ее основе в условиях длительного хранения.*

*Достигнутый уровень физико-механических и теплофизических характеристик разработанного покрытия НТЗП-У позволяет рекомендовать его в качестве наружной теплозащиты перспективных изделий космической и авиационной техники.*

*Ключевые слова:* напыляемое теплозащитное покрытие; полиуретановые водные дисперсии; стеклянные и полимерные микросферы; космическая и авиационная техника.

Напыляемые теплозащитные покрытия (НТЗП) применяются для кратковременной защиты внешних поверхностей летательных аппаратов от аэродинамического и других видов нагрева, а также механических воздействий [1].

В настоящее время для получения НТЗП используют жидкие композиции, наносимые на корпус ракетно-космической техники (РКТ) методами пневматического или безвоздушного распыления, и которые способны формировать покры-

Теплофизические свойства напыляемых теплозащитных покрытий

Описание образца	Плотность НТЗП, г/см <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)		Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	
		при 25 °С	при 50 °С	при 25 °С	при 50 °С
НТЗП-У	0,50 (0,4–0,55)*	0,120	0,145	1,46	1,63
ТТП-ФСУ	0,39 (0,28–0,44)*	0,1792	0,2009	2,063	2,456

\*В скобках приведен теоретически достигаемый диапазон плотностей покрытий

тия как при температуре окружающей среды, так и в условия незначительного нагрева — до 60–70 °С.

В области космической техники наиболее распространены являются напыляемые теплозащитные тонкослойные покрытия типа ТТП-ФСУ, которые представляют собой композиции на основе хлорсульфированного полиэтилена и наполнителей (полиметилметакрилата, полипропилена, фенол-формальдегидных микросфер и древесной муки) и толуола, который входит в группу ядовитых технических жидкостей [1].

В результате совместных усилий ведущими специалистами ГП КБ «Южное» и ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет» было разработано экологически чистое отечественное напыляемое теплозащитное покрытие (НТЗП-У) на основе полиуретановых водных дисперсий, стеклянных и полимерных микросфер, порошкообразных антипиренов и ряда технологических добавок (загустителя, смачивателя, гидрофобизатора, биоцида и др). Разработанное покрытие НТЗП-У характеризуются термической стабильностью до 250 °С и обладают достаточно хорошим комплексом физико-механических свойств: плотность 0,4–0,6 г/см<sup>3</sup>, прочность при растяжении 0,80–1,65 МПа, относительное удлинение 12,8–69,0%, прочность при отрыве 0,98–1,04 МПа [2].

В данной работе представлены некоторые сравнительные эксплуатационные характеристики разработанного и ранее применяемого напыляемого НТЗП в изделиях РКТ разработки ГП «КБ «Южное».

В отличие от ТТП-ФСУ, жидкий состав которой готовится непосредственно на месте применения, жидкие композиции отечественного состава НТЗП-У планируется изготавливать на одном из лакокрасочных предприятий Украины и поставлять в герметично закрытой таре (в пластиковых ведрах или металлических бочках). НТЗП-У готовится смешением его компонентов в определенной последовательности и необходимых пропорциях на лабораторном или промышленном смесителе, который снабжен перемешивающим устройством с регулируемой скоростью оборотов.

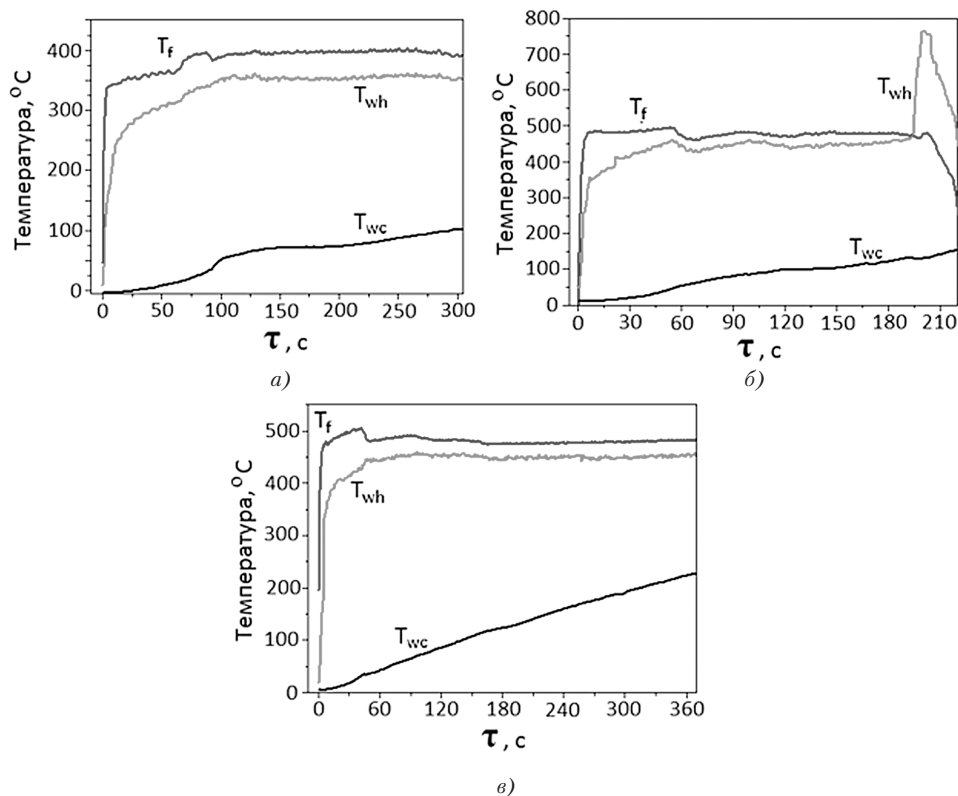
Жидкий состав покрытий наносили на защищаемую поверхность послойно с использованием типового оборудования для пневматического распыления (типа краскораспылителя марки КРУ-1 с диаметром сопла 2,5 мм) при давлении сжатого воздуха до 3,0 кгс/см<sup>2</sup> (толщина одного наносимого слоя 0,3–0,4 мм). Сушку каждого слоя получаемого покрытия осуществляли как при комнатной температуре, так и при температуре 60–70 °С при наборе каждого 1 мм толщины покрытия, а также при окончательной сушке. Максимальная толщина покрытия 18 мм.

В таблице 1 приведены сравнительные данные теплофизических свойств покрытий типа НТЗП-У и ТТП-ФСУ.

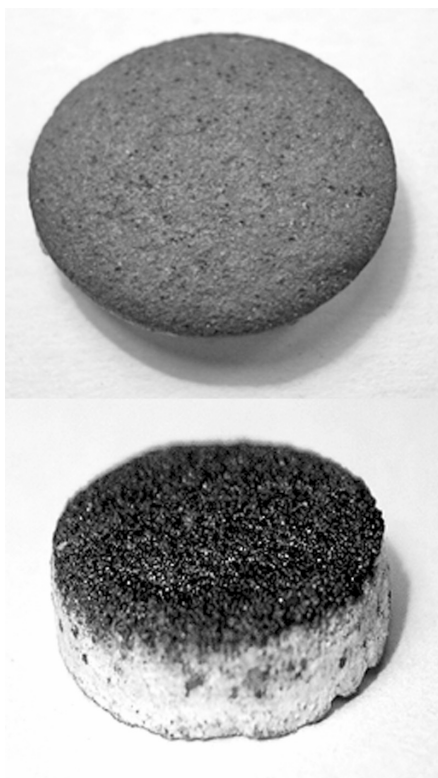
Достигнутый уровень теплофизических характеристик для отечественного покрытия НТЗП-У показал возможность его применения в качестве тепловой защиты конструкций ракетно-космической техники. Такая оценка была осуществлена в результате его испытания в условиях теплового режима, моделирующем температурный режим поверхности покрытия при эксплуатации РКТ.

### Термоэрозионные испытания

Испытания осуществлялась на установке, специально разработанной ведущими специалистами Института проблем материаловедения им. И.М. Францевича, и заключались в нагреве образцов потоком горячего воздуха, подогреваемого промышленным феном с электронной стабилизацией температуры и расхода воздуха (GHG660 LCD, фирма Bosch, ФРГ), который был установлен на штативе с возможностью вертикального перемещения. Управление температурой поверхности ( $T_{wh}$ ) по заданной программе осуществлялось в ручном режиме варьированием режима работы фена и расстоянием от среза его сопла до поверхности образца. Нагреватель обеспечивает возможность задания температуры нагрева воздуха ( $T_f$ ) в диапазоне от 50 °С до 660 °С с шагом 10 °С с точностью стабилизации  $\pm 5\%$  и величины расхода воздуха от 0,25 м<sup>3</sup>/мин до 0,5 м<sup>3</sup>/мин. Выходной диаметр



**Рис. 1.** Температуры набегающего потока воздуха  $T_f$ , нагреваемой поверхности  $T_{wh}$  и нижней поверхности  $T_{wc}$  образцов НТЗП-У (а, б) и ГТП-ФСУ (в) в условиях, моделирующих условия нагрева поверхности РКТ при полете. Толщина испытуемых образцов 3,0–5,2 мм



**Рис. 2.** Внешний вид образца напыляемого покрытий НТЗП-У после испытания в условиях нагрева, приведенного на рис.1а. Потеря массы образца после испытания составила 6,1%

сопла – 20 мм. Максимальный тепловой поток в холодную стенку –  $60 \text{ кВт/м}^2$  – достигается при заданной температуре потока  $660 \text{ °C}$  на минимальном расстоянии от среза сопла (25 мм).

Температуру поверхности ( $T_{wh}$ ) измеряли пирометром-регистратором Flus IR-86 1U (КНР), со спектральной чувствительностью в диапазоне длин волн  $\lambda = 8\text{--}14 \text{ мкм}$  и точностью измерений  $1,5\% \pm 2 \text{ °C}$  в диапазоне температур  $0 \text{ °C} - 500 \text{ °C}$ . Пирометр был установлен на расстоянии 250 мм от поверхности образца, на котором диаметр пятна измерения составляет 5 мм. Коэффициент излучения ( $\epsilon$ ) принимался равным 0,9 на основании его определения при комнатной температуре.

В ходе эксперимента также определяли температуру нижней поверхности образца ( $T_{wc}$ ), которая характеризовала теплоизолирующие свойства испытуемых материалов.

В условиях нагрева поверхности покрытий при температурах  $350 \text{ °C}$  (рис. 1, а) и  $450 \text{ °C}$  (рис. 1, б) температура покрытия на его обратной стороне длительное время не превышала  $150 \text{ °C}$ , что свидетельствует о его хороших теплоизолирующих свойствах, требуемых при эксплуатации РКТ.

Внешний вид образцов НТЗП-У после испытаний показан на рис. 2 и 3.

Следует отметить, что форма и размеры образцов после испытаний практически не претерпели замет-

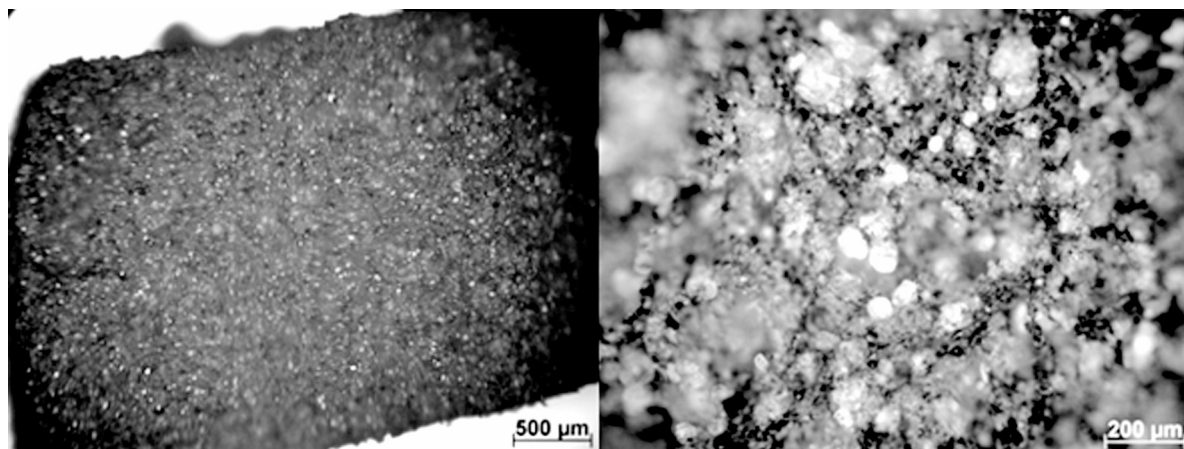


Рис. 3. Данные оптической микроскопии внешней поверхности НТЗП-У после длительного нагрева при 350 °С

ных изменений. Нагреваемая поверхность после испытаний почернела в результате коксования связующего (пленкообразующего) и полимерных микросфер, а задняя осталась светлой, без изменений.

#### Термомеханический анализ.

Данные термомеханического анализа (ТМА) позволяют определить способность полимерных материалов к деформации (обратимой или необратимой) при действии механических нагрузок в определенном температурном диапазоне эксплуатации. С практической точки зрения результаты ТМА позволяют оценить способность материалов НТЗП к размягчению при действии повышенных температур.

Данные ТМА образцов разработанных покрытий типа НТЗП-У и ТТП-ФСУ приведены на рис. 4 и 5.

На рис. 4 показаны кривые ТМА для одного из составов НТЗП-У. Необратимая деформация для него имеет максимальное значение 43% при температуре 200 °С, а обратимая деформация имеет максимальное значение 11,5% при температуре 225 °С.

Анализ полученных результатов показал, что материал покрытия НТЗП-У при температуре 141 °С и постоянной нагрузке 0,249 МПа значительно теряет свои упругие свойства за счет размягчения полимерного пленкообразующего, однако после температуры 200 °С снижение деформации прекращается и происходит окончание процесса его структурирования (сшивки, очевидно плен-

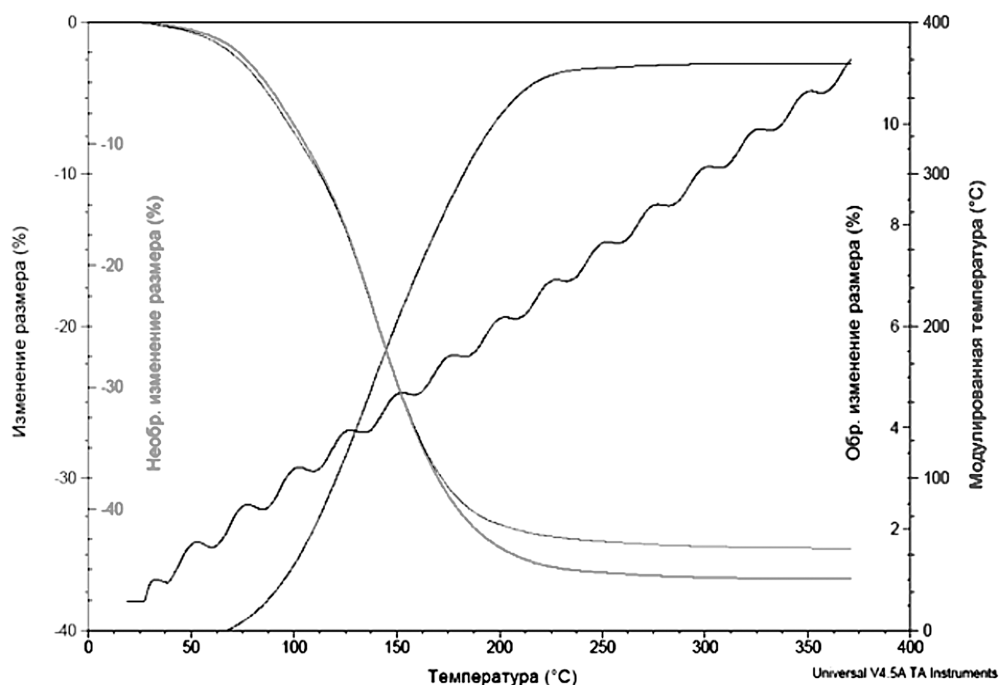


Рис. 4. Данные термомеханического анализа образца материала НТЗП-У (плотность 0,51 г/см<sup>3</sup>)

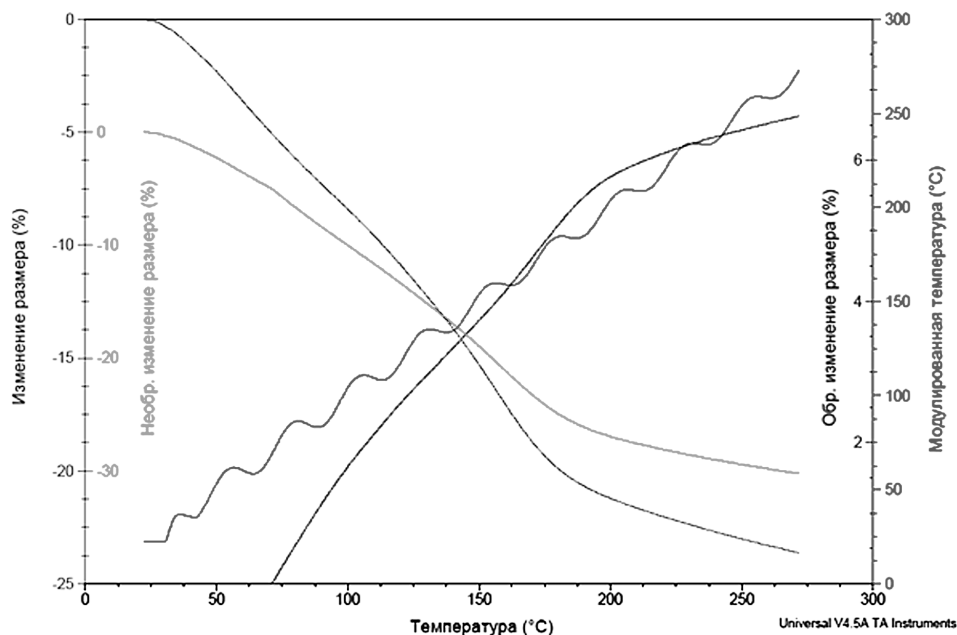


Рис. 5. Данные термомеханического анализа образца покрытия ТТП-ФСУ (плотность 0,39 г/см<sup>3</sup>)

кообразующего – полиуретановой дисперсии). Увеличение обратимой деформации до 11,5 % при 200 °С с ярко-выраженным снижением эластичности и проявлением вынужденной деформации, очевидно, вызвано: термодеструкцией полимера и ликвидацией пористой структуры за счет возможной деструкции полимерных микросфер, входящих в его состав.

Анализ кривой ТМА для штатного покрытия типа ТТП-ФСУ, представленной на рис. 5, свидетельствует о том, что необратимая деформация имеет максимальное значение 27,5% при температуре 180 °С, а обратимая деформация имеет максимальное значение 6,4% при температуре 250 °С. Такая зависимость может быть связана с возникновением псевдопластичного или вязкого течения материала покрытия в диапазоне температур 150–200 °С, что косвенно подтверждается перегибом кривой обра-

тимой деформации без выхода на «плато» в диапазоне температур 175–200 °С.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что покрытие типа ТТП-ФСУ при температуре 180 °С и постоянной нагрузке 0,249 МПа теряет свои упругие свойства за счет размягчения полимерного связующего, и в диапазоне температур 175–200 °С наблюдается начало псевдопластичного или вязкого течения материала НТЗП.

В таблице 2 сведены данные термомеханического анализа штатного и разработанного НТЗП.

Таким образом, по данным термомеханического анализа установлено, что для всех типов НТЗП (НТЗП-У и ТТП-ФСУ) характерны процессы размягчения материалов при повышении температуры.

Отличительной особенностью разработанных материалов является образование пространственно

Таблица 2

Данные ТМА напыляемых теплозащитных покрытий

Показатель свойств	Теплозащитное покрытие	
	НТЗП-У	ТТП-ФСУ
Температура максимума необратимой деформации, °С	200	180
Максимальное значение необратимой деформации, %	43,0	27,5
Температура максимума обратимой деформации, °С	225	250
Максимальное значение обратимой деформации, %	11,5	6,4
Физические процессы, сопровождающие максимальное значение обратимой деформации	СМ, РМ, КМ	РМ, ВТ, КМ

Примечание: СМ – сшивание материала; РМ – размягчение материала; КМ – карбонизация материала; ВТ – вязкое течение материала.



шпитей структуры с участием полимерного пленкообразующего. Ожидается, что такие процессы будут способствовать способности материала сохранять свою форму в условиях действия высоких температур, действующих на НТЗП в процессе полета РКН.

Таким образом, в результате проведенных работ разработано экологически чистое отечественное напыляемое покрытие НТЗП-У, которое можно рекомендовать в качестве теплозащитного материала при изготовлении ракетно-космической техники, взамен ранее освоенного на ГП КБ «Южное» материала типа ТТП-ФСУ [3].

Благодарим специалистов Института проблем материаловедения НАН Украины: Киселя В. М., Фролова Г. А., Евдокименко Ю. И. за проведение совместных работ по исследованию нового теплозащитного материала НТЗП-У.

### Литература

- [1] Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці: Підручник / Є.О. Джур, Л.Д. Кучма, Т.А. Манько, В.Г. Сітало, Ф.П. Санін, А.Ф. Санін. — К.: Вища освіта, 2003. 399 с.
- [2] Thermal protection materials of special application / O.V. Chervakov, Yu.A. Suvorova, A.I. Matsuka, D.O. Chervakov, A.N. Simbirkina, A.M. Potapov // The 2<sup>nd</sup> CEEP Workshop on Polymer Science: abstracts of rep. (Iasi, Romania, 24-25 October 2014). — Iasi: IMC, 2014. — P. 87-89.
- [3] Разработка и перспективы применения напыляемых синтактичных пенопластов в качестве теплозащитных материалов ракетно-космической техники. Журнал «Физико-химическая механика материалов» / А.М. Потапов, А.Н. Симбиркина, О.В. Черваков, В.М. Кисель / г. Львов, Физико-механический институт им. Г.В.Карпенко (в печати)

*Simbirkina A.N.<sup>1</sup>, Chervakov O.V.<sup>2</sup>, Potapov O.M.<sup>1</sup>, Matsuka A.I.<sup>2</sup>, Chervakov D.O.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Yuzhnoye, State-owned Design Office named after M. K. Yangel. Ukraine, Dnepropetrovsk

<sup>2</sup>State High Educational Institution «Ukrainian State University of Chemical Technology». Ukraine, Dnepropetrovsk

### DOMESTIC SPRAYED THERMAL BARRIER COATING. TECHNOLOGY AND APPLICATIONS

*This paper provides information about the domestic sprayed thermal barrier coating HTЗП-У, obtained by resulting layering with using pneumatic or airless spray techniques. HTЗП-У is a composition based on aqueous dispersions of polyurethane, glass and polymeric microspheres, fire-retardants and other additives, ensuring both its processability spraying liquid compositions, and durability of the finished coating on its base in conditions of prolonged storage.*

*The achieved level of physical-mechanical and thermophysical properties the developed coating HTЗП-У allows us to recommend it as outer thermal protection perspective articles of space and aviation technology.*

*Keywords:* sprayed thermal barrier coating; polyurethane aqueous dispersions; glass and polymeric microspheres; space and aviation technology.

### References

- [1] Polymer composite materials in aerospace engineering: Textbook / Ye.O.Dzhur, L.D.Kuchma, T.A. Manko, V.G. Sitalo, Ph.P. Sanin, A.Ph. Sanin. — K.: High education, 2003. 399 p. (In Ukrainian)
- [2] Thermal protection materials of special application / O.V. Chervakov, Yu.A. Suvorova, A.I. Matsuka, D.O. Chervakov, A.N. Simbirkina, O.M. Potapov // The 2<sup>nd</sup> CEEP Workshop on Polymer Science: abstracts of rep. (Iasi, Romania, 24-25 October 2014). — Iasi: IMC, 2014. — P. 87-89.
- [3] The development and application prospects sprayed syntactic foams as heat-protection materials for rocket and space technology. / Magazine «Physical and chemical mechanics of materials» O.M. Potapov, A.N. Simbirkina, O.V. Chervakov, V.M.Kisel / Lvov, Physical and mechanical institute of the name Karpenko G.V. (in the press)