



**Н. М. Фіалко, В. Г. Прокопов, Ю. В. Шеренковський, Н. О. Меранова,
С. А. Алешко, М. В. Ганжа, В. Л. Юрчук, Л. А. Швецова**

Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОПЕРЕНОСУ В МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЯХ З ТЕРМОБАР'ЄРНИМИ ПОКРИТТЯМИ

Наведено дані математичного моделювання теплового стану стабілізаторів полум'я мікрофакельних пальникових пристроїв за наявності термобар'єрних покриттів. Розглянуто особливості методики комп'ютерного моделювання щодо застосованого підходу та вибору моделі турбулентного переносу. Встановлено закономірності впливу термобар'єрного покриття на характеристики температурного режиму стінок стабілізаторів полум'я у широкому діапазоні зміни навантаження котлоагрегату. Зокрема показано, що за низьких навантажень котла за відсутності покриттів рівень температури стабілізаторів полум'я може перевищувати допустиму межу (550°C). У разі ж нанесення термобар'єрних покриттів на зовнішню поверхню стабілізаторів забезпечується їхній необхідний тепловий стан. Особливу увагу приділено аналізу ролі термобар'єрних покриттів у формуванні теплового стану стабілізаторів полум'я в зоні розташування приторцевого виступу, де температура є максимальною. Зазначено, що температурний режим цієї зони зумовлений дією двох конкуруючих факторів, пов'язаних з нанесенням покриттів, а саме їхнім додатковим термічним опором та помітним збільшенням поверхні теплообміну виступу з нанесеним на нього шаром. Отримано дані щодо розподілу коефіцієнта тепловіддачі на внутрішній поверхні стабілізатора полум'я. Встановлено, що наявність захисних покриттів практично не впливає на величини зазначених коефіцієнтів тепловіддачі в усьому діапазоні зміни навантаження котлоагрегату. За результатами виконаних досліджень зроблено висновок про перспективність застосування термобар'єрних покриттів стабілізаторів полум'я поряд із спеціальними системами їх охолодження.

Ключеві слова: пальникові пристрої; стабілізатори полум'я; тепловий стан; захисні покриття.

Введение. Один из эффективных путей повышения долговечности и надежности теплонапряженных элементов различных энергетических устройств состоит в применении термобарьерных покрытий. При этом нанесение последних на поверхности таких элементов, как правило, используется наряду со специальными системами охлаждения данных устройств (Davidson, Dees, & Bogard, 2011; Feuerstein et al., 2008; Davidson, Kistenschlager, & Bogard, 2013; Maikell, 2008).

Представляет интерес анализ возможности применения термобарьерных покрытий для стабилизаторов пламени микрофакельных горелочных устройств, которые обычно оснащаются системами охлаждения различных модификаций. Использование этих систем и нанесение барьерных покрытий на наружные поверхности стабилизаторов пламени призвано обеспечить их благоприят-

ное тепловое состояние, при котором температура стенок стабилизаторов не превышает заданную допустимую величину.

Анализ работ по изучению теплового состояния микрофакельных горелочных устройств свидетельствуют о том, что исследования температурных режимов стабилизаторов пламени с термобарьерными покрытиями находятся на начальной стадии и требуют дальнейшего развития (Fialko, et al., 2017a, 2017b).

Цель исследования заключается в определении эффективности использования термобарьерных покрытий для обеспечения требуемого теплового состояния микрофакельных горелочных устройств.

Методика исследования. Рассмотрению подлежало микрофакельное горелочное устройство с плоскими стабилизаторами пламени, оснащенными специальны-

Інформація про авторів:

Фіалко Наталія Михайлівна, д-р техн. наук, професор, член-кореспондент НАН України. **Email:** nmfialko@ukr.net.

Прокопов Віктор Григорієвич, д-р техн. наук, професор, тел. +38 (044) 453-28-95. **Email:** prokopov_vg@ukr.net.

Шеренковський Юлій Владиславович, канд. техн. наук, пров. наук. співробітник, тел. +38 (044) 453 28 95. **Email:** j_sher@ukr.net.

Меранова Наталія Олегівна, канд. техн. наук, пров. наук. співробітник, тел. +38 (044) 453-28-58. **Email:** mnata1956@ukr.net.

Алешко Сергей Александрович, канд. техн. наук, пров. наук. співробітник, тел. +38 (044) 453-28-58. **Email:** s_aleshko@ukr.net.

Ганжа Марк Володимирович, мол. наук. співробітник, тел. +38 (044) 453 28 58. **Email:** mark.hanzha@gmail.com.

Юрчук Володимир Леонідович, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, тел. +38 (044) 453-28-58. **Email:** vyur1@yandex.ua.

Швецова Людмила Якимівна, мол. наук. співробітник, тел. +38 (044) 453-28-58. **Email:** nmfialko@ukr.net.

Цитування за ДСТУ: Фіалко Н. М., Прокопов В. Г., Шеренковський Ю. В., Меранова Н. О., Алешко С. А., Ганжа М. В., Юрчук В. Л., Швецова Л. А. Комп'ютерне моделювання процесів теплопереносу в мікрофакельних пальникових пристроях з термобар'єрними покриттями. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Вип. 27(5). С. 130-133.

Citation APA: Fialko, N. M., Prokopov, V. H., Sherenkovskiy, Yu. V., Meranova, N. O., Aleshko, S. A., Hanzha, M. V., Yurchuk, V. L., & Shvetsova, L. A. (2017). Computer modeling of heat transfer processes in stabilizer burner device with thermo barrier coatings. Scientific Bulletin of UNFU, 27(5), 130-133. <https://doi.org/10.15421/40270526>

ми системами охлаждения (рис. 1). В качестве хладагента в этих системах применялся природный газ, подлежащий дальнейшему сжиганию.

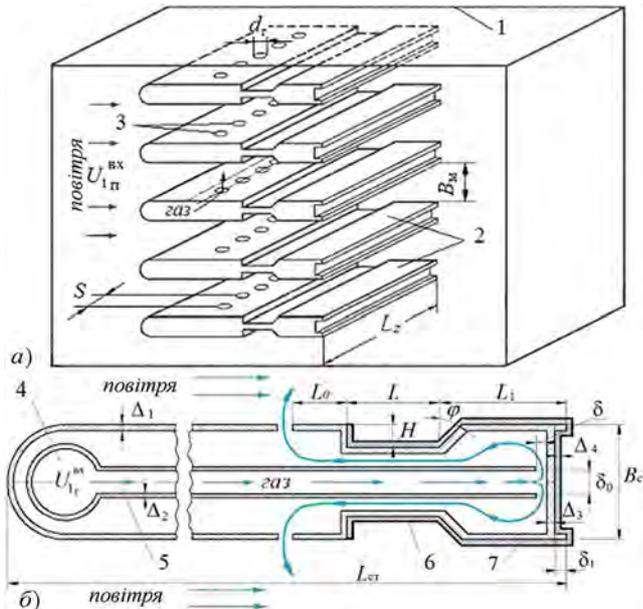


Рис. 1. Схема стабилизаторного горелочного устройства (а) и системы его охлаждения (б): 1) плоский канал; 2) стабилизаторы пламени; 3) газоподающие отверстия; 4) газоподающий коллектор; 5) канал для охлаждающего газа; 6) нишевая полость; 7) покрытие

При решении задачи, отвечающей данной физической ситуации, использовалась методика поэтапного моделирования (Kharchenko, Aleshko, & Fialko, 2012). Решение получено на основе URANS подхода с применением пакета FLUENT. В работе выполнена верификация моделей турбулентного переноса, по результатам которой обосновано использование RNG k-ε модели турбулентности.

Результаты исследования. На рис. 2-4 представлены характерные данные компьютерного моделирования, которые отвечают следующим исходным параметрам: расход природного газа $G = 200 \text{ м}^3/\text{ч}$, что соответствует 100 %-й нагрузке котлоагрегата; коэффициент избытка воздуха равнялся 1,1; температура газа на входе в систему охлаждения $t_{\text{гв}}^{\text{ex}} = 15 \text{ °C}$; температура воздуха на входе в горелочное устройство $t_{\text{вг}}^{\text{ex}} = 20 \text{ °C}$; материал стенки стабилизатора пламени – сталь 12X18H9T; коэффициент загромождения проходного сечения канала $k_f = 0,3$; диаметр газоподающих отверстий $d_z = 0,004 \text{ м}$; относительный шаг расположения отверстий $S/d_z = 3,33$; длина стабилизатора $L_{\text{cm}} = 0,225 \text{ м}$; ширина стабилизатора $B_{\text{cm}} = 0,030 \text{ м}$; $L_0 = 0,016 \text{ м}$; $L = 0,024 \text{ м}$; $L_1 = 0,033 \text{ м}$; $\Delta_1 = 0,0015 \text{ м}$; $\Delta_2 = 0,001 \text{ м}$; $\Delta_3 = 0,002 \text{ м}$; $\delta_1 = 0,003 \text{ м}$; $\delta_0 = 0,006 \text{ м}$; $\delta = 0,003 \text{ м}$; коэффициент теплопроводности материала покрытия $\lambda_{\text{п}} = 0,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; толщина покрытия $\Delta_4 = 0,0013 \text{ м}$.

С целью выявления роли термобарьерных покрытий в формировании теплового состояния стабилизаторов пламени рассмотрению подлежали как условия наличия, так и отсутствия покрытия на их наружной поверхности. При этом сопоставление температурных режимов стабилизаторов пламени для указанных условий проводилось в широком диапазоне нагрузки котлоагрегата (20-100 %). Необходимость изучения закономерностей влияния нагрузки котла на уровни температур стабилизаторов пламени обусловлена тем, что эффек-

тивность их систем охлаждения существенно зависит от данной нагрузки. Действительно, в рассматриваемой системе охлаждения расход хладагента изменяется в соответствии с нагрузкой котла. Следовательно, условия охлаждения стабилизатора пламени ухудшаются с уменьшением данной нагрузки. В этой связи при оценке эффективности применения барьерных покрытий и систем охлаждения стабилизаторов пламени особое внимание следует уделить условиям эксплуатации микрофакельных горелочных устройств при минимально допустимых нагрузках котлоагрегата.

На рис. 2 представлено распределение температуры вдоль фрагмента наружной поверхности стенки стабилизатора пламени, начиная со срывной кромки нишевой полости и заканчивая серединой торцевой поверхности стабилизатора. Как видно, при снижении относительной нагрузки котлоагрегата от 100 % до 20 % уровни температур стенки стабилизатора пламени существенно повышаются. При этом в случае наличия термобарьерного покрытия эти уровни оказываются более низкими. Как свидетельствуют полученные данные, понижение температуры стабилизатора, обусловленное наличием термобарьерного покрытия, является тем более значительным, чем выше нагрузка котлоагрегата.

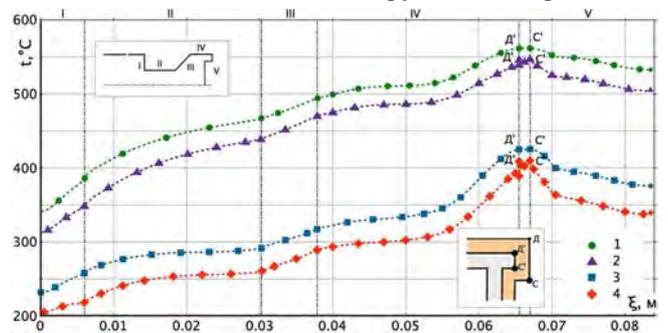


Рис. 2. Распределение температуры вдоль наружной поверхности стенки стабилизатора при наличии (2, 4) и отсутствии (1, 3) термобарьерного покрытия для относительной нагрузки котлоагрегата 20 % (1, 2) и 100 % (3, 4)

Согласно результатам компьютерного моделирования при относительной нагрузке котлоагрегата, равной 20 %, в ситуации, когда термобарьерное покрытие отсутствует, температура стенки стабилизатора оказывается несколько выше допустимого значения 550 °C. При нанесении же термобарьерного покрытия на наружную поверхность стабилизатора пламени обеспечивается снижение его температуры до допустимых величин.

Данные вычислительных экспериментов свидетельствуют также о том, что изменение температуры вдоль рассматриваемого фрагмента наружной поверхности стабилизатора пламени имеет сходный характер при наличии и отсутствии термобарьерных покрытий для различных нагрузок котлоагрегата. А именно, максимальные значения температур стенки стабилизатора пламени имеют место в области выступа, служащего образованию приторцевой ниши. С удалением от данного выступа вдоль торца стабилизатора и его боковой поверхности температура стенок стабилизатора падает.

Как следует из приведенных данных, разница температур наружной поверхности стенки стабилизатора, отвечающих наличию и отсутствию термобарьерного покрытия, несколько изменяется вдоль этой поверхности. На торцевой поверхности стабилизатора данная раз-

ница остается практически постоянной. Она снижается на поверхности выступа, служащего образованию приторцевой ниши. И далее вдоль горизонтальной поверхности стабилизатора эта разница меняется незначительно.

Таким образом, на поверхности собственно выступа, где температура стабилизатора является максимальной, эффект влияния покрытия оказывается наименьшим. Это обусловлено действием двух конкурирующих факторов, связанных с нанесением термобарьерного покрытия. С одной стороны, последнее, как дополнительное термическое сопротивление низкотеплопроводного слоя, должно обеспечивать снижение температуры наружной поверхности стабилизатора. С другой стороны, нанесение покрытия на рассматриваемый выступ приводит к развитию поверхности и, следовательно, является фактором повышения данной температуры. В анализируемой ситуации доминирующим оказывается первый из указанных факторов. Однако его действие несколько снижается ввиду отмеченного развития поверхности.

Рис. 3 иллюстрирует изменение температуры вдоль наружной и внутренней поверхностей термобарьерного покрытия. Как видно, по толщине покрытия имеет место значительный перепад температуры, величина которого существенно снижается при уменьшении нагрузки котла. На наружной поверхности покрытия в зоне расположения выступа, служащего образованию приторцевой ниши, наблюдается бимодальный пик температур (точки Д, С), связанный с эффектом развития поверхности ввиду наличия термобарьерного слоя. Данный бимодальный пик существенно сглаживается на внутренней поверхности покрытия (точки Д', С').

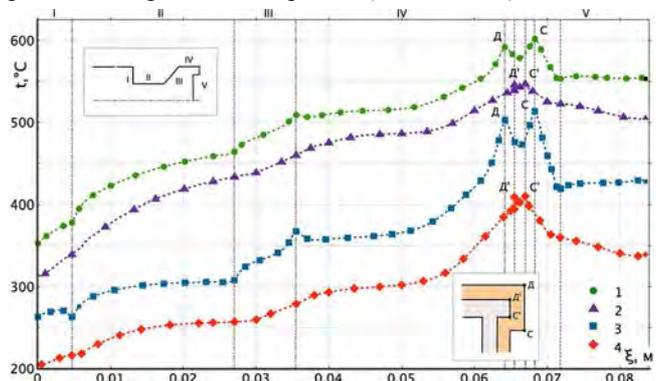


Рис. 3. Распределение температуры наружной (1, 3) и внутренней (2, 4) поверхности термобарьерного покрытия для относительной нагрузки котлоагрегата 100 % (3, 4) и 20 % (1, 2)

На рис. 4 представлено распределение коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности стабилизатора пламени. Приведенные данные отвечают условиям наличия и отсутствия термобарьерного покрытия при различных относительных нагрузках котлоагрегата. Представленный сложный характер поведения коэффициента теплоотдачи отвечает картине течения хладагента (природного газа) во внутренней полости стабилизатора пламени. Положения экстремумов на кривой $\alpha = f(\xi)$ соответствуют критическим точкам отрыва и присоединения потока, угловым вихревым зонам и пр. Как следует из данных, приведенных на рис 4, значения коэффициента теплоотдачи α существенно повышаются с ростом относительной нагрузки котлоагрегата, что, как очевидно, связано с увеличением расхода хладагента.

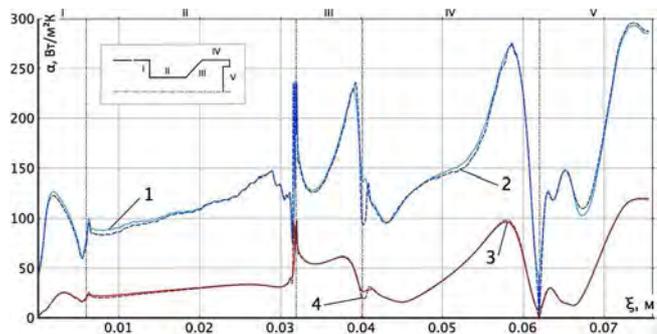


Рис. 4. Распределение коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности стабилизатора пламени при отсутствии (1, 3) и наличии (2, 4) термобарьерного покрытия для относительной нагрузки котлоагрегата 100 % (1, 2) и 20 % (3, 4)

Что касается влияния слоя покрытия на величины коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности стабилизатора пламени, то это влияние оказывается незначительным. То есть имеет место определенная консервативность α по отношению к увеличению толщины стенок стабилизатора за счет нанесения термобарьерного слоя.

Выводы. Нанесение термобарьерных покрытий на наружную поверхность стабилизаторов пламени микрофакельных горелочных устройств является эффективным средством снижения их температуры до допустимых значений. Применение таких покрытий позволяет обеспечить благоприятный температурный режим стабилизаторов пламени во всем диапазоне нагрузок котлоагрегата (20-100 %). Особого внимания при исследовании термобарьерных покрытий и систем охлаждения стабилизаторов пламени требуют зоны их максимальных температур в области расположения приторцевого выступа. Дальнейшие исследования теплового состояния стабилизаторов пламени с термобарьерными покрытиями могут быть направлены на выбор типа покрытия, их геометрических характеристик, области нанесения и пр.

Перелік використаних джерел

- Davidson, F. T., Dees, J. E., & Bogard, D. G. (2011). An Experimental Study of Thermal Barrier Coating and Film Cooling on an Internally Cooled Simulated Turbine Vane. *ASME Turbo Expo GT2011-46604*, pp. 559–570. <https://doi.org/10.1115/GT2011-46604>
- Davidson, F. T., Kistenmacher, D. A., & Bogard, D. G. (2013). Film cooling with a thermal barrier coating: round holes, craters and trenches. *Journal of Turbomachinery*, 136(4), 041007 <https://doi.org/10.1115/1.4024883>
- Feuerstein, A., et al. (2008). Technical and Economical Aspects of Current Thermal Barrier Coating Systems for Gas Turbine Engines by Thermal Spray and EB-PVD: A Review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 17(2), 199–213. <https://doi.org/10.1007/s11666-007-9148-y>
- Fialko, N. M., Prokopov, V. G., Sherenkovskij, Ju. V., Meranova, N. O., et al. (2017a). Temperaturnye rezhimy stенок stabilizatorov plameni s zashhitnymi pokrytijami. *Tezi X Mizhnarodnoi konferencii "Problemi teplofiziki ta teploenergetiki" Kyiv 23-26 travnja 2017*. [in Russian].
- Fialko, N. M., Sherenkovskii, I. V., Meranova, N. O., et al. (2017b). Teplovoe sostojanie stabilizatornykh gorelok s zashhitnymi pokrytijami. *Sbornik trudov "Problemy ekologii i ekspluatcii obektov energetiki", Institut promyshlennoi ekologii*, 102–105. [in Russian].
- Kharchenko, A. A., Aleshko, S. A., & Fialko, N. M. (2012). Metodika pojetapnogo modelirovanija dlja reshenija trehkomponentnykh soprijazhennykh zadach teploperenosa v sistemah ohlazhdenija gorelochnykh ustrojstv. *Suchasni problemy naukovoho zabezpechennia*

enerhetyky: Mizhn. nauk.-prakt. konf. aspirantiv, mahistriv i studentiv, 17-20 kvitnia 2012 r.: tezy dopovidei, 1, 136–139. [in Russian].
Maikell, J. S. (2008). Experimental Study of the Effect of TBC and Angel of Attack on Overall Cooling Performance on a Leading

Edge with One and Three Rows of Cooling Holes. *M. S. Thesis, The University of Texas at Austin.*

**Н. М. Фялко, В. Г. Прокопов, Ю. В. Шеренковский, Н. О. Меранова,
С. А. Алешко, М. В. Ганжа, В. Л. Юрчук, Л. А. Швецова**

Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев, Украина

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В МИКРОФАКЕЛЬНЫХ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ С ТЕРМОБАРЬЕРНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Приведены данные математического моделирования теплового состояния стабилизаторов пламени микрофакельных горелочных устройств при наличии термобарьерных покрытий. Рассмотрены особенности методики компьютерного моделирования, касающиеся применяемого подхода и выбора модели турбулентного переноса. Установлены закономерности влияния термобарьерного покрытия на характеристики температурного режима стенок стабилизаторов пламени в широком диапазоне изменения нагрузки котлоагрегата. В частности показано, что при низких нагрузках котла при отсутствии покрытий уровень температуры стабилизаторов пламени может превышать допустимый предел (550 °C). При нанесении же термобарьерных покрытий на наружную поверхность стабилизаторов обеспечивается их необходимое тепловое состояние. Особое внимание уделено анализу роли термобарьерных покрытий в формировании теплового состояния стабилизаторов пламени в зоне расположения приторцевого выступа, где температура является максимальной. Отмечено, что температурный режим данной зоны обусловлен действием двух конкурирующих факторов, связанных с нанесением покрытий, а именно их дополнительным термическим сопротивлением и заметным увеличением поверхности теплообмена выступа с нанесенным на него слоем. Получены данные о распределении коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности стабилизатора пламени. По результатам выполненных исследований сделан вывод о перспективности применения термобарьерных покрытий стабилизаторов пламени наряду со специальными системами их охлаждения.

Ключевые слова: горелочные устройства; стабилизаторы пламени; тепловое состояние; защитные покрытия.

**N. M. Fialko, V. H. Prokopov, Yu. V. Sherenkovskiy, N. O. Meranova,
S. A. Aleshko, M. V. Hanzha, V. L. Yurchuk, L. A. Shvetsova**

Institute of Engineering Thermophysics of NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine

COMPUTER MODELING OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN STABILIZER BURNER DEVICE WITH THERMO BARRIER COATINGS

The article is devoted to the mathematical modeling of the thermal state of the flame stabilizers of the stabilizer burner device when thermal barrier coatings are applied on their surfaces. The solution of the problem was obtained on the basis of the URANS approach using the FLUENT. Verification of turbulent transfer models has been carried out and the RNG k-ε model has been justified. A comparative analysis of the temperature regimes of flame stabilizers is performed with and without of thermal barrier coatings on their surfaces. This analysis was carried out in a wide range of boiler load (20-100 %). It is noted that the need to study the regularities of the influence of the boiler load on the thermal state of flame stabilizers is due to the fact that this load determines the refrigerant flow in the cooling system and, consequently, the efficiency of this cooling. Based on the studies performed, it was shown that with a relative load of the boiler 20 %, the temperature level of the wall of the flame stabilizer exceeds the allowable limit (550°C) in the absence of coating and is below this limit when coating is applied. It has been established that the effect of the coating is the smallest in the region of the end protrusion, where the wall temperature is maximal. An interpretation of this fact is given in terms of the effect of several competing factors associated with the application of the coating. Data on the behaviour of the heat transfer coefficient on the inner surface of the stabilizer are obtained for the conditions with and without of a thermal barrier coating for various loads of the boiler. It is shown that the presence of a coating does not significantly affect the value of this coefficient in the whole range of loads of the boiler. It is also established that an increase in this load leads to a significant increase in the heat transfer coefficient at the inner surface of the flame stabilizer. Based on the performed studies, it was concluded that, in order to provide the required temperature regimes for the stabilizer burner device, it is promising to share thermal barrier coatings applied on their external surfaces and special cooling systems. It is also noted that this research requires further development in the direction of choosing the types of coatings, their geometric parameters, the area of application, etc.

Keywords: burner device; flame stabilizers; thermal state; protective coatings.