

Технічні науки

УДК 536.24:533

**Фіалко Наталія Михайлівна**

*доктор технічних наук, професор,  
член-кореспондент НАН України, завідував відділу  
Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Фиалко Наталия Михайловна**

*доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент НАН Украины, заведующая отделом  
Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Fialko Nataliia**

*Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Corresponding Member of NAS of Ukraine, Head of the Department  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Прокопов Віктор Григорович**

*доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник  
Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Прокопов Виктор Григорьевич**

*доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник  
Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Prokopov Viktor**

*Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Шеренковський Юлій Владиславович**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,*

*провідний науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Шеренковский Юлий Владиславович**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник,*

*ведущий научный сотрудник*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Sherenkovskiy Julii**

*Candidate of Technical Sciences (PhD),*

*Senior Scientific Researcher, Leading Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**Меранова Наталія Олегівна,**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,*

*провідний науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Меранова Наталия Олеговна**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник,*

*ведущий научный сотрудник*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Meranova Nataliia**

*Candidate of Technical Sciences (PhD),*

*Senior Scientific Researcher, Leading Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**Альошко Сергій Олександрович**

*кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Алёшко Сергей Александрович**

*кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Aleshko Sergey**

*Candidate of Technical Sciences (PhD), Leading Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**Малецька Ольга Євгенівна,**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Малецкая Ольга Евгеньевна**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Maletska Olha**

*Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**Кутняк Ольга Миколаївна**

*науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Кутняк Ольга Николаевна**

*научный сотрудник*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Kutnyak Olha**

*Scientific Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**Бабак Віталій Павлович**

*доктор технічних наук, професор,*

*член-кореспондент НАН України, завідував відділу*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Бабак Виталий Павлович**

*доктор технических наук, профессор,*

*член-корреспондент НАН Украины, заведующий отделом*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Babak Vitaliy**

*Doctor of Technical Sciences, Professor,*

*Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Head of Department*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**Щепетов Віталій Владимирович**

*доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Щепетов Виталий Владимирович**

*доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Shchetov Vitaliy**

*Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**Харченко Сергій Дмитрович**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Харченко Сергей Дмитриевич**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Kharchenko Sergiy**

*Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**CFD МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ  
ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПОКРИТТІВ З  
РІЗНИМИ ТЕПЛОПРОВІДНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ  
CFD МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ  
ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОКРЫТИЙ С  
РАЗЛИЧНЫМИ ТЕПЛОПРОВОДНЫМИ СВОЙСТВАМИ  
CFD SIMULATION OF TEMPERATURE REGIMES OF BURNER  
DEVICES USING COATINGS WITH DIFFERENT HEAT-CONDUCTING  
PROPERTIES**

***Анотація.** Наведено результати досліджень впливу коефіцієнтів теплопровідності багатошарових покриттів на температурні режими мікрофакельних пальникових пристроїв з даними покриттями.*

***Ключові слова:** мікрофакельні пальникові пристрої, CFD моделювання, температурні режими.*

**Аннотация.** Приведены результаты исследований влияния коэффициентов теплопроводности многослойных покрытий на температурные режимы микрофакельных горелочных устройств данным покрытиями.

**Ключевые слова:** микрофакельные горелочные устройства, CFD моделирования, температурные режимы.

**Summary.** The results of studies of the influence of the heat conductivity coefficients of multilayer coatings on the temperature regimes of microjet burners with these coatings are presented.

**Key words:** microjet burner devices, CFD simulation, temperature regimes.

Температурні рівні стінок мікрофакельних пальників за певних умов можуть перевищувати допустимі значення. З огляду на це слід застосовувати заходи, спрямовані на зниження температури у теплонапружених зонах даних пальників. Серед таких заходів на особливу увагу заслуговує нанесення термозахисних покриттів на зовнішні поверхні мікрофакельних пальникових пристроїв [1-6].

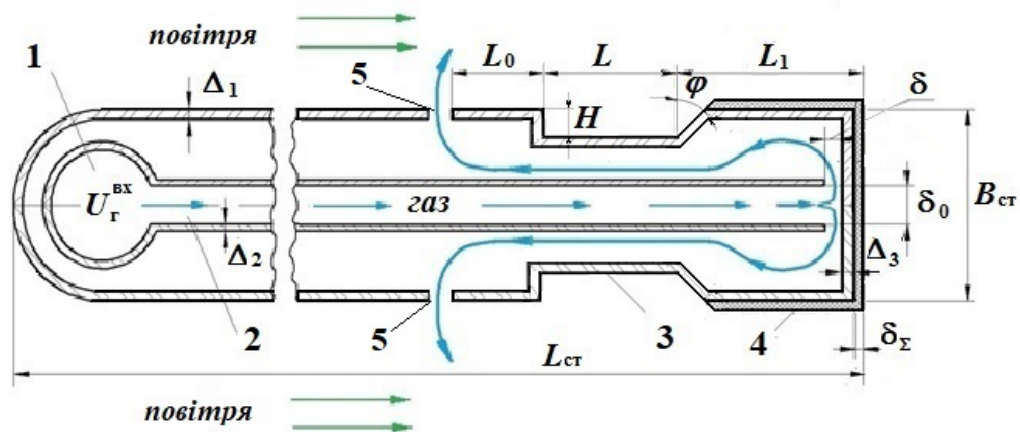
Вказані покриття характеризуються значним розмаїттям і можуть суттєво відрізнитися за теплопровідними властивостями. Останні, як відомо, впливають на рівні температур стінок пальників, перепади температур по товщині покриттів тощо. Це зумовлює актуальність досліджень з визначення ефективності застосування покриттів з різними теплопровідними властивостями для забезпечення необхідного теплового стану мікрофакельних пальникових пристроїв.

В межах даної роботи досліджувалась ситуація, що відповідає застосуванню на поверхнях пальникових пристроїв покриттів, теплопровідні властивості яких відрізняються в залежності від технологічного режиму їх

нанесення. При цьому вихідний матеріал для нанесення покриттів при реалізації різних режимів залишався незмінним.

За результатами виконаних досліджень розгляду підлягали два граничних технологічних режими нанесення покриттів, що відповідали найменшим і найбільшим значенням коефіцієнтів теплопровідності усіх шарів покриття.

Принципову схему модуля досліджуваного пальникового пристрою з чотирьохшаровим теплозахисним покриттям наведено на рис. 1. Модуль оснащено системою охолодження з обдувом внутрішньої торцевої поверхні стабілізатора полум'я плоским імпактним струменем. Дослідження виконувались при мінімальному (20%) навантаженні вогнетехнічного об'єкта, в якому встановлені вказані пальникові пристрої. Це зумовлено тим, що саме за даних умов застосовувана система охолодження є найменш ефективною, оскільки витрата охолоджуваного агента, роль якого виконує паливний газ, зменшується зі зниженням навантаження вогнетехнічного об'єкта.



**Рис. 1. Схема модуля мікрофакельного пальника, оснащеного системою охолодження з обдувом торцевої поверхні стабілізатора полум'я плоским імпактним струменем:**

- 1 – газоподавальний колектор; 2 – канал для охолоджувального газу; 3 – нішева порожнина; 4 – захисне покриття; 5 – газоподавальні отвори

Як метод досліджень застосовувалось комп'ютерне моделювання, що стає все більш надійним інструментом вивчення процесів переносу в

пальниках різного призначення [7-15]. Вихідні дані для комп'ютерного моделювання відповідають таким параметрам: витрата природного газу  $G = 40 \text{ м}^3/\text{год}$ , що відповідає 20% навантаженню вогнетехнічного об'єкта; коефіцієнт надлишку повітря дорівнював 1,1; температура газу на вході в систему охолодження  $t_r^{\text{BX}} = 15^\circ\text{C}$ ; температура повітря на вході в пальниковий пристрій  $t_{\text{п}}^{\text{BX}} = 20^\circ\text{C}$ ; матеріал стінки стабілізатора полум'я – сталь 12Х18Н9Т; коефіцієнт загромадження прохідного перерізу каналу  $k_f = 0,3$ ; діаметр газоподавальних отворів  $d_r = 0,004 \text{ м}$ ; відносний крок розташування отворів  $S/d_r = 3,33$ ; довжина стабілізатора  $L_{\text{ст}} = 0,225 \text{ м}$ ; ширина стабілізатора  $B_{\text{ст}} = 0,030 \text{ м}$ ;  $L_0 = 0,016 \text{ м}$ ;  $L = 0,024 \text{ м}$ ;  $L_1 = 0,033 \text{ м}$ ;  $\Delta_1 = 0,0015 \text{ м}$ ;  $\Delta_2 = 0,001 \text{ м}$ ;  $\Delta_3 = 0,002 \text{ м}$ ;  $\delta_0 = 0,006 \text{ м}$ ;  $\delta = 0,003 \text{ м}$ ; покриття включало чотири шари: перший – адгезійний шар з силікатного скла, що наноситься на зовнішню поверхню стабілізатора полум'я; другий – теплозахисний шар з керамічного матеріалу; третій – з боросилікатного скла і четвертий зовнішній теплозахисний зносостійкий шар; товщини  $\delta_{\text{пi}}$  зазначених шарів становили відповідно  $\delta_{\text{п1}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $\delta_{\text{п2}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $\delta_{\text{п3}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $\delta_{\text{п4}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; в табл. 1 наведено коефіцієнти теплопровідності шарів покриття, що відповідають їх максимальним і мінімальним значенням.

Таблиця 1

**Мінімальні  $\lambda_{\text{min}}$  і максимальні  $\lambda_{\text{max}}$  значення теплопровідності шарів покриття**

Значення коефіцієнта теплопровідності	Номер шару покриття			
	1	2	3	4
$\lambda_{\text{min}}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,55	0,89	0,4	0,82
$\lambda_{\text{max}}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,6	1,05	0,5	0,94

Мінімальне і максимальне значення еквівалентного коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{\text{екв}}$  досліджуваного багат шарового покриття становить



0,57 і 0,67 Вт/(м·К) відповідно. Тобто вказані еквівалентні коефіцієнти теплопровідності відрізняються приблизно на 17%.

В таблиці 2 наведено значення температур в характерних точках зовнішньої поверхні стабілізатора полум'я для вказаних вище мінімальних і максимальних величин коефіцієнтів теплопровідності шарів покриття. (Схему розташування зазначених характерних точок ілюструє рис. 2).

Як видно з табл. 2, найбільші температури стінки стабілізатора полум'я, що мають місце на його затупленій задній кромці (точка Е), не перевищують допустимі значення 550°C при нанесенні покриттів як з мінімальним, так і з максимальним коефіцієнтом теплопровідності шарів покриття. При цьому рівень температури на зовнішній поверхні стабілізатора полум'я є дещо вищим для максимальних значень  $\lambda$  шарів покриття. Щодо зовнішньої поверхні власне покриття, то тут навпаки температура виявляється більшою при мінімальних величинах коефіцієнтів теплопровідності покриття (табл. 3). Тобто зі збільшенням теплопровідності покриття спостерігається ефект вирівнювання температури в ньому. Відповідно має місце зменшення перепаду температури по товщині покриття (рис. 3). Згідно з наведеними даними це зменшення становить 7,9°C в зоні зривної кромки стабілізатора полум'я.

Таблиця 2

**Значення температур в характерних точках зовнішньої поверхні стабілізатора полум'я для мінімальних і максимальних величин коефіцієнтів теплопровідності шарів покриття, °С**

Характерні точки Лекв	А	В	С	Д	Е	Ф
min	342,6	387,6	467,7	514,6	545,3	497,2
max	343,0	388,0	469,3	517,2	549,9	502,3

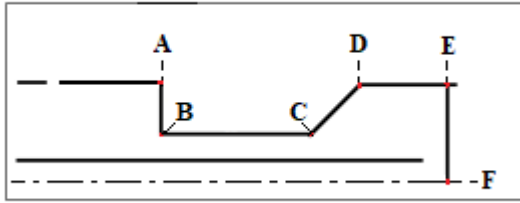


Рис. 2. Схема розташування характерних точок на зовнішній поверхні стабілізатора полум'я

Таблиця 3

**Значення температур в характерних точках зовнішньої поверхні покриття для мінімальних і максимальних величин коефіцієнтів теплопровідності шарів покриття, °С**

Характерні точки $\lambda_{\text{екв}}$	D	E	F
min	556,2	604,0	552,6
max	553,8	600,7	550,0

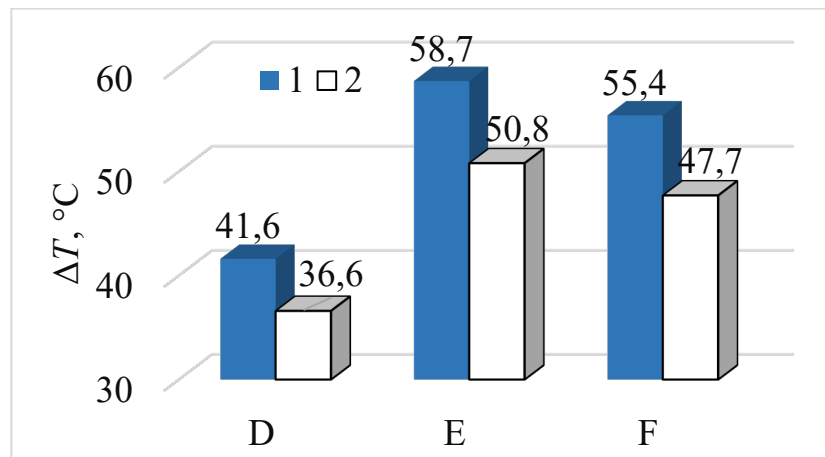


Рис. 3. Перепади температури по товщині покриття в його характерних точках для мінімальних (1) і максимальних (2) величин коефіцієнтів теплопровідності шарів покриття

Виконані на основі комп'ютерного моделювання дослідження впливу зміни теплопровідності покриттів, яка зумовлена різними режимами їх нанесення на зовнішню поверхню мікрофакельних пальників, показали наступне:

1. За досліджуваних умов в межах вказаної зміни зберігається сприятливий тепловий стан пальників, що розглядаються.
2. Застосування покриттів з максимальним значенням теплопровідності призводить до вирівнювання температур в покритті, зменшення температурних перепадів в ньому і зростання температур зовнішньої поверхні пальникових пристроїв.

### **Література**

1. 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. 27(5). С. 130-133.
2. Фиалко Н.М., Алешко С.А., Юрчук В.Л., Малецкая О.Е., Ганжа М.В., Милко Е.И., Ольховская Н.Н., Кутняк О.Н., Реграги А., Евтушенко А.А. Температурные режимы стабилизаторных горелок при нанесении термобарьерных покрытий на различные участки их поверхности. *Journal of New Technologies in Environmental Science*. 2018. (3). P. 121-124.
3. Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovsky Ju.V., Aleshko S.A., Hanzha M.V., Polozenko N.P., Maletskaya O.E., Kutniak O.N., Regragui A., Donchak M.I. Mathematical modeling of temperature regimes of burners of stabilizer type with thermo-barrier coatings. *Технологические системы*. 2018. 2(38). С. 41-47.
4. Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskyi Ju. V., Aleshko S.A., Meranova N.O., Yurchuk V.L., Hanzha M.V. Modeling of heat transfer processes in stabilizer burners with heat-resistant coatings. *The development of technical sciences: problems and solutions: Conference Proceedings, April 27-28, 2018*. Brno: Baltija Publishing. P. 189-192.

5. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алешко С.А., Ганжа М.В., Юрчук В.Л., Швецова Л.А. Тепловое состояние стабилизаторных горелок с защитными покрытиями. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2017. С.102-105.
6. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Альошко С.О., Ганжа М.В., Юрчук В.Л., Мілко Є.І., Озеров А.А. Тепловий стан мікрофакельних пальникових пристроїв при нанесенні термобар'єрного покриття на теплонапружені ділянки їх поверхні. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2019. С. 140-144.
7. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Бутовский Л.С., Абдулин М.З., Полозенко Н.П., Клищ А.В., Стрижеус С.Н., Тимощенко А.Б. Математическое моделирование процессов течения и смесеобразования в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве. Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2014. Т.3. №8(69). С. 40-44.
8. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Тимощенко А.Б., Абдулин М.З., Бутовский Л.С. Эффективность систем охлаждения горелочных устройств струйно-стабилизаторного типа. Технологические системы. 2012. № 1. С. 52-57.
9. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Бутовский Л.С., Абдулин М.З., Полозенко Н.П., Клищ А.В., Стрижеус С.Н., Тимощенко А.Б. Интенсификация процессов переноса в горелочном устройстве с цилиндрическим стабилизатором пламени. Науковий вісник НЛТУ України. 2014. Вип. 24.5 С. 136-142.

10. Fialko N.M., Aleshko S.A., Rokitko K.V., Maletskaya O.E., Milko E.I., Kutnyak O.N., Olkhovskaya N.N., Regragui A., Donchak M.I., Evtushenko A.A. Regularities of mixture formation in the burners of the stabilizer type with one-sided fuel supply. *Технологические системы*. 2018. 3(38). С. 37-43.
11. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Алешко С.А., Меранова Н.О., Абдулін М.З., Бутовський Л.С., Миргородський А.Н. Компьютерное моделирование процессов переноса в системе охлаждения горелочных устройств стабилизаторного типа. *Промышленная теплотехника*. 2012. №1. С. 64-71.
12. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Абдулін М.З., Бутовський Л.С., Полозенко Н.П., Клищ А.В., Стрижеус С.Н., Тимощенко А.Б. Влияние пластинчатых турбулизаторов потока на характеристики течения и смесеобразования топлива и окислителя в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2014. Вип. 24.6. С. 114-121.
13. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Абдулін М.З., Рокитько К.В., Малецкая О.Е., Милко Е.И., Ольховская Н.Н., Реграги А., Евтушенко А.А. Компьютерное моделирование течения в микрофакельных горелочных устройствах с асимметричной подачей топлива. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. 28(8). С. 117-121.
14. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Альошко С.О., Меранова Н.О., Рокитько К.В. CFD моделювання температурних режимів зони горіння пальників стабілізаторного типу з асиметричною подачею палива. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. №4. С. 13-18.
15. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон М.В., Абдулін М.З., Хомук С.В., Єніна А.О., Новицький В.С., Тимощенко О.Б. Підвищення інтенсивності процесів переносу в циліндричному стабілізаторному

пальнику шляхом застосування прямокутних кільцевих ніш. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. С. 122-125.