

Технические науки

УДК 536.24:533

**Фиалко Наталия Михайловна**

*доктор технических наук, профессор, член корреспондент НАН Украины,  
Заслуженный деятель науки и техники Украины, заведующая отделом  
Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Fialko Nataliia**

*Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of NAS of Ukraine,  
Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Head of the Department  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**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*

**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 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*

**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*

**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 Николаевна**

*научный сотрудник*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Kutnyak Olha**

*Scientific Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**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 Виталий Владимирович**

*доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Shchepetov Vitaliy**

*Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**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*

## АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ МИКРОФАКЕЛЬНЫХ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ С МНОГОСЛОЙНЫМИ ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

### ANALYSIS OF HEAT STATE OF MICROJET BURNER DEVICES WITH MULTI-LAYER PROTECTIVE COATINGS

**Аннотация.** Представлены результаты компьютерного моделирования по установлению предельных возможностей применения многослойных термостойких покрытий на наружной поверхности стабилизаторов пламени микрофакельных горелочных устройств.

**Ключевые слова:** защитные покрытия, микрофакельные горелочные устройства, математическое моделирование.

**Summary.** The paper presents the results of computer modeling to determine the limiting possibilities of using multilayer heat-resistant coatings on the outer surface of flame stabilizers of microjet burners.

**Key words:** protective coatings, microjet burners, mathematical modeling

Тепловое состояние стенок микрофакельных горелочных устройств в большей мере определяет их надежность и долговечность. К важным направлениям обеспечения требуемого теплового состояния данных устройств относится использование различных защитных покрытий [1-6]. Такие покрытия обычно применяются в комбинации с системами охлаждения горелок рассматриваемого типа. Совместное использование двух указанных подходов позволяет формировать благоприятный температурный режим микрофакельных горелок, при котором их максимальная температура не превышает допустимые значения.

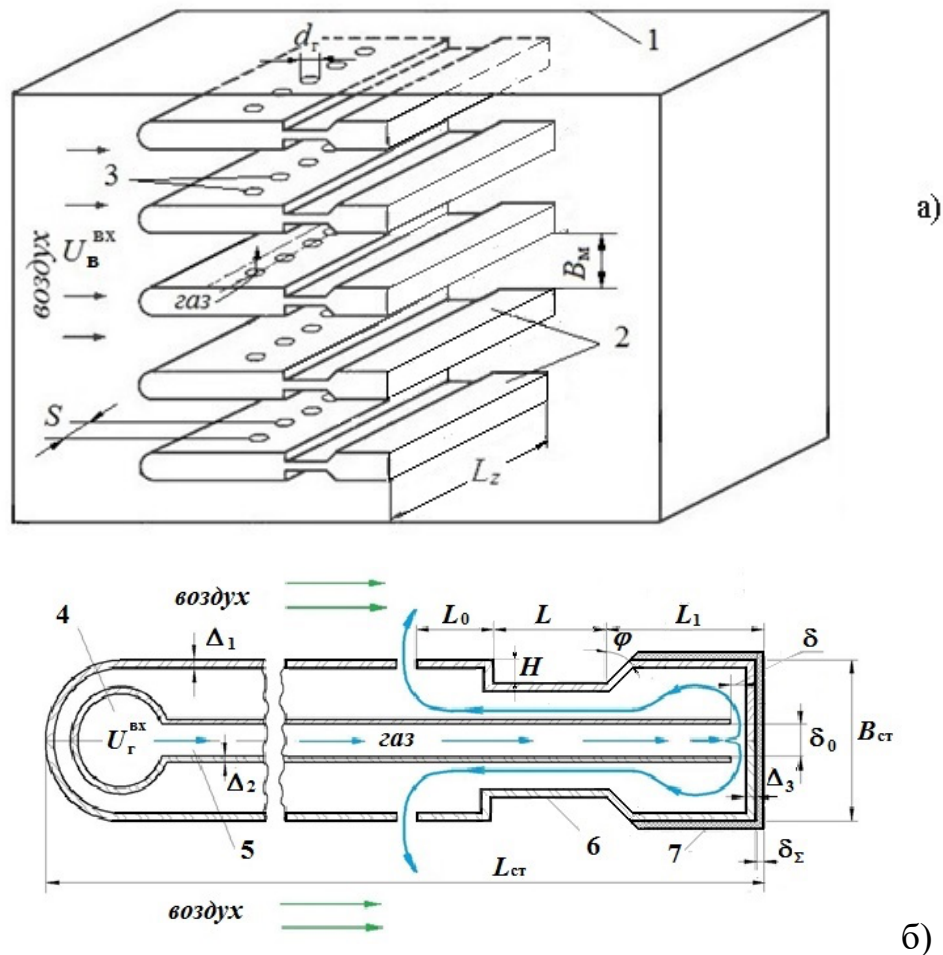
В настоящей работе рассматривается система охлаждения микрофакельного горелочного устройства, в которой не используется

специальный хладагент, а его роль выполняет природный газ, подлежащий дальнейшему сжиганию. Ввиду этого эффективность данной системы охлаждения существенно зависит от тепловой нагрузки огнетехнического объекта, в котором установлены горелочные устройства. Поскольку расход охлаждающего агента в рассматриваемой ситуации уменьшается со снижением нагрузки огнетехнического объекта, то условия охлаждения горелок оказываются наиболее неблагоприятным при минимально допустимом значении данной нагрузки. При этом предельные возможности указанных систем охлаждения, очевидно, соответствуют ситуации резкого сброса нагрузки от номинальной до минимальной.

Принимая во внимание изложенное, в рамках настоящей работы анализ эффективности использования предлагаемых защитных покрытий рассматривается для указанных выше условий, отвечающих минимальной нагрузке огнетехнического объекта.

Исследованию подлежало тепловое состояние микрофакельного горелочного устройства, схема которого представлена на рис. 1, а. Данное устройство снабжено системой охлаждения с обдувом внутренней торцевой поверхности стабилизатора плоской импактной струей. Четырехслойное защитное покрытие наносилось на участок наружной поверхности стабилизатора, охватывающий его торец и прилегающую к нему часть боковой поверхности (рис.1,б, 2).

Исследования проводились с использованием метода математического моделирования. Данный метод находит все более широкое применение при исследовании рабочих процессов горелочных устройств различного назначения [7- 15].



**Рис. 1.** К постановке задачи: схемы микрофакельного горелочного устройства стабилизаторного типа (а) и его системы охлаждения с обдувом торцевой поверхности стабилизатора плоской импактной струей (б): 1 – плоский канал; 2 – стабилизаторы пламени; 3 – газоподающие отверстия; 4 – газоподающий коллектор; 5 – канал для охлаждающего газа; 6 – нишевая полость; 7 – защитное покрытие

При решении рассматриваемой задачи применялся URANS подход с использованием FLUENT кода. В качестве модели турбулентного переноса применялась RNG  $k - \epsilon$  модель турбулентности.

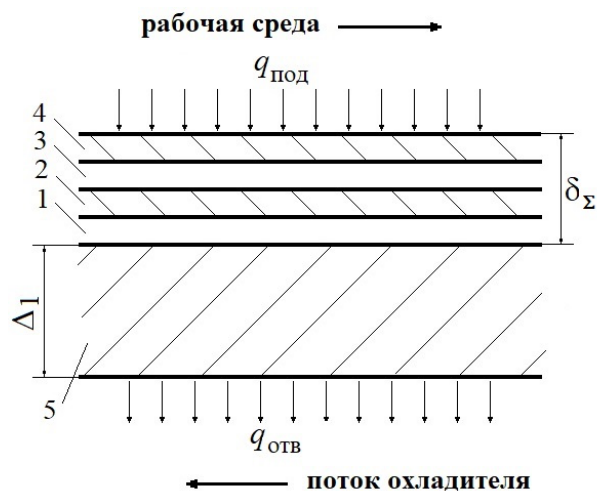
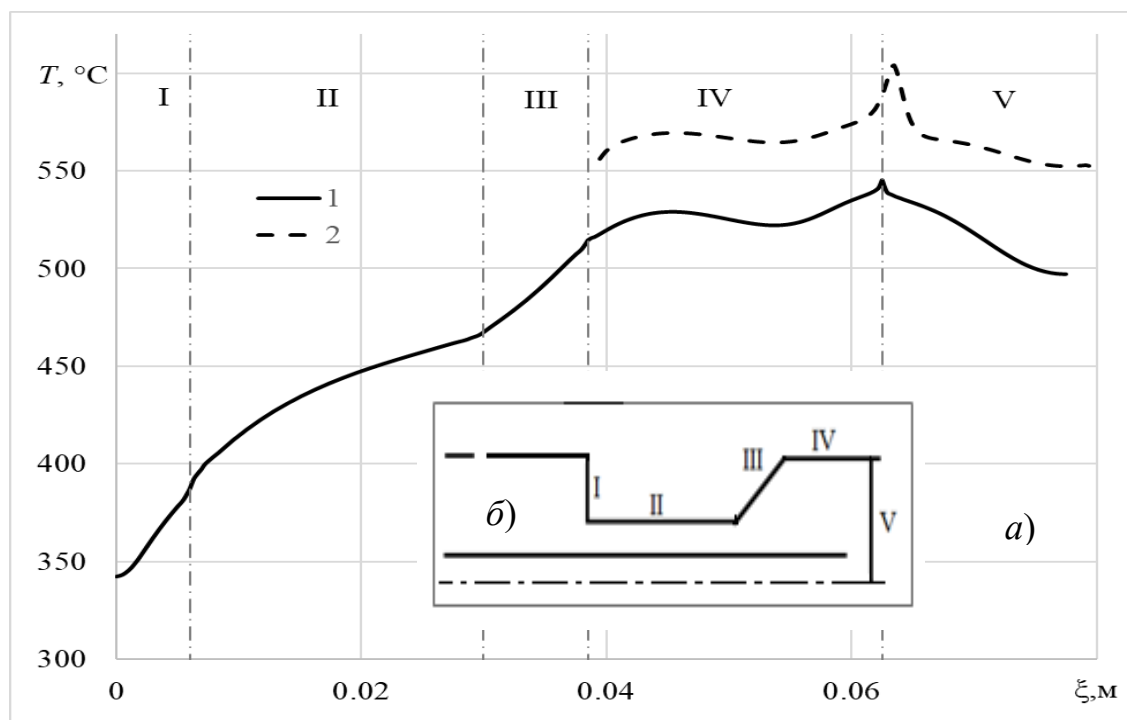


Рис. 2. Схема многослойного покрытия на стенке стабилизатора пламени: 1-4 первый, второй, третий и четвертый слой покрытия; 5 – стенка стабилизатора

Полученные результаты математического моделирования иллюстрируют рис. 3, 4. Приведенные данные отвечают следующим исходным параметрам: расход природного газа  $G = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$ , что соответствует 20% нагрузке огнетехнического объекта; коэффициент избытка воздуха равнялся 1,1; температура газа на входе в систему охлаждения  $t_r^{\text{вх}} = 15^\circ\text{C}$ ; температура воздуха на входе в горелочное устройство  $t_b^{\text{вх}} = 20^\circ\text{C}$ ; материал стенки стабилизатора пламени - сталь 12X18H9T; коэффициент загромождения проходного сечения канала  $k_f = 0,3$ ; диаметр газоподающих отверстий  $d_r = 0,004 \text{ м}$ ; относительный шаг расположения отверстий  $S/d_r = 3,33$ ; длина стабилизатора  $L_{\text{ст}} = 0,225 \text{ м}$ ; ширина стабилизатора  $B_{\text{ст}} = 0,030 \text{ м}$ ;  $L_0 = 0,016 \text{ м}$ ;  $L = 0,024 \text{ м}$ ;  $L_1 = 0,033 \text{ м}$ ;  $\Delta_1 = 0,0015 \text{ м}$ ;  $\Delta_2 = 0,001 \text{ м}$ ;  $\Delta_3 = 0,002 \text{ м}$ ;  $\delta_0 = 0,006 \text{ м}$ ;  $\delta = 0,003 \text{ м}$ ; покрытие включало четыре слоя – первый адгезионный слой из силикатного стекла, наносимый на наружную поверхность стабилизатора пламени, второй – теплозащитный слой из керамического материала; третий – из боросиликатного стекла и четвертый – внешний теплозащитный износостойкий слой; коэффициенты теплопроводности  $\lambda_{\text{п}i}$  и толщины  $\delta_{\text{п}i}$  указанных слоев составляли

соответственно –  $\lambda_{п1} = 0,55 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\delta_{п1} = 0,0002 \text{ м}$ ;  $\lambda_{п2} = 0,89 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\delta_{п2} = 0,0002 \text{ м}$ ;  $\lambda_{п3} = 0,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\delta_{п3} = 0,0003 \text{ м}$ ;  $\lambda_{п4} = 0,82 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\delta_{п4} = 0,0002 \text{ м}$ .

На рисунке 3 приводится распределение температуры вдоль фрагмента наружной поверхности стенки стабилизатора пламени, начиная со срывной кромки нишевой полости и заканчивая серединой торцевой поверхности стабилизатора (линия 1). Здесь же представлено соответствующее распределение на наружной поверхности покрытия (линия 2). Приведенные данные отвечают минимальной относительной нагрузке огнетехнического объекта, равной 20%, т.е., как уже отмечалось, наибольшим значениям температуры горелочного устройства в рассматриваемых условиях их эксплуатации.



**Рис. 3. Распределение температуры (а) вдоль наружной поверхности стенки стабилизатора пламени (1) и наружной поверхности покрытия (2) и расположение на данной поверхности характерных зон (б)**

Как видно из полученных данных, при наличии предлагаемого многослойного покрытия температура на наружной поверхности



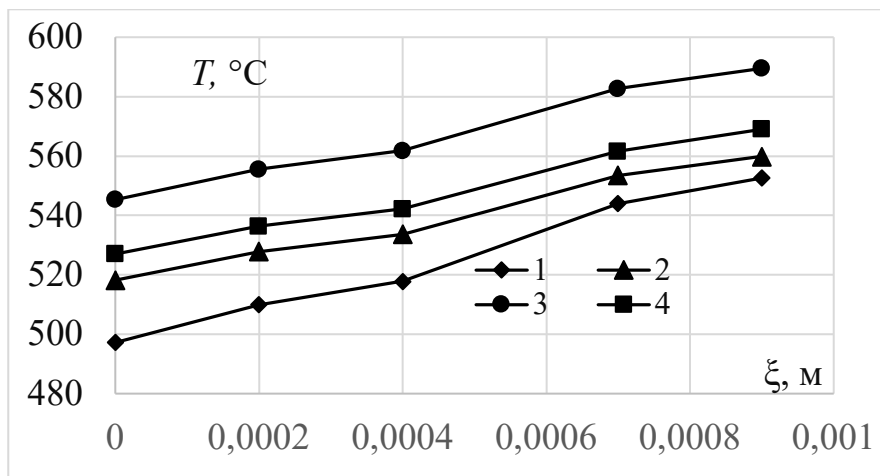
стабилизатора пламени оказывается ниже ее допустимого значения, равного 550°C.

Что касается распределения температуры вдоль рассматриваемого фрагмента наружной поверхности стабилизатора пламени, то оно характеризуется следующими особенностями. Максимальное значение температуры стенки стабилизатора наблюдается на его затупленной задней кромке. С удалением от нее вдоль торца стабилизатора температура его стенки уменьшается. Это объясняется интенсивным струйным охлаждением центральной зоны внутренней торцевой поверхности стабилизатора пламени. По мере удаления от указанной кромки вдоль боковой поверхности стабилизатора пламени в целом имеет место тенденция к незначительному понижению температуры. Далее на поверхности, отвечающей нишевой полости, температура стенки стабилизатора достаточно резко падает.

Полученные данные свидетельствуют также о том, что характер изменения температуры на наружной поверхности покрытия в большой мере сходен с соответствующим распределением для наружной поверхности стенки стабилизатора (линии 1 и 2 на рис. 3). Основное отличие здесь состоит в более ярко выраженном максимуме температуры на наружной поверхности покрытия.

Рисунок 4 иллюстрирует распределение температуры по толщине многослойного покрытия в различных сечениях горелочного устройства. Здесь линии 1 и 2 отвечают продольным сечениям, проходящим через середину торца стабилизатора и четвертую часть по его высоте, а линии 3 и 4 – поперечным сечениям, проходящим через затупленную заднюю кромку и середину прилежащей к этой кромке боковой поверхности. Согласно приведенным на рис. 4 данным распределение температуры по толщине покрытия представляет собой ломанную линию, излом на которой отвечает местам контакта слоев покрытий. При этом угол наклона каждого из отрезков

данной кривой тем больше, тем меньше коэффициент теплопроводности данного слоя. А именно, наиболее круто изменяется температура в третьем слое покрытия, несколько менее круто – в первом слое. Наиболее пологий вид имеет изменение температуры во втором слое.



**Рис. 4. Распределение температуры по толщине многослойного покрытия в различных сечениях горелочного устройства: 1- 4 номер сечения**

Таким образом, выполненный анализ показал, что совместное применение предлагаемых четырехслойных защитных покрытий и сравнительно простой системы охлаждения микрофакельных горелочных устройств стабилизаторного типа позволяет обеспечить требуемый температурный режим этих устройств в наиболее неблагоприятных условиях их эксплуатации.

### Литература

1. 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.

2. Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy 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.
3. Фіалко Н.М., Алешко С.А., Юрчук В.Л., Малецька О.Е., Ганжа М.В., Мілко Е.І., Ольховська 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.
4. 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.
5. Фіалко 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. Интенсификация процессов переноса в горелочном устройстве с цилиндрическим стабилизатором пламени. Науковий вісник НЛТУ України. 2014. Вип. 24.5. С. 136-142.
8. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Абдулин М.З., Бутовский 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.
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. Математическое моделирование процессов течения и смесеобразования в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве. Восточно-европейский журнал передовых технологий 2014. Т.3. №8(69). С. 40-44.
10. 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.
11. 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.

12. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Алешко С.А., Меранова Н.О., Абдулін М.З., Бутовський Л.С., Миргородський А.Н. Комп'ютерне моделювання процесів переносу в системі охолодження горелочних пристроїв стабілізаторного типу. Промислова теплотехніка. 2012. №1. С. 64-71.
13. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Абдулін М.З., Рокитько К.В., Малецька О.Е., Милко Е.І., Ольховська Н.Н., Реграгі А., Евтушенко А.А. Комп'ютерне моделювання течія в мікрофакельних горелочних пристроях з асиметричною подачею палива. Науковий вісник НЛТУ України. 2018. 28(8). С. 117-121.
14. 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. Технологічні системи. 2018. 3(38). С. 37-43.
15. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Алешко 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.