

Технические науки

УДК 536.24:533

**Фиалко Наталия Михайловна**

*доктор технических наук, профессор,*

*Член-корреспондент НАН Украины, заведующий отделом*

*Кафедра теплофизики энергоэффективных тепловых технологий*

*Институт технической теплофизики*

*Национальной академии наук Украины*

**Fialko Nataliia**

*Doctor of Technical Sciences, Professor,*

*Corresponding Member of NAS of Ukraine, Department Head*

*Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**Тимошенко Александра Борисовна**

*младший научный сотрудник*

*Кафедра теплофизики энергоэффективных тепловых технологий*

*Институт технической теплофизики*

*Национальной академии наук Украины*

**Tymoshchenko Oleksandra**

*Junior Research*

*Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**Малецкая Ольга Евгеньевна**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
Кафедра теплофизики энергоэффективных тепловых технологий  
Институт технической теплофизики  
Национальной академии наук Украины*

**Maletska Olha**

*Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Researcher  
Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Полозенко Нина Петровна**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
Кафедра теплофизики энергоэффективных тепловых технологий  
Институт технической теплофизики  
Национальной академии наук Украины*

**Polozenko Nina**

*Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Researcher  
Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Реграги Абубакр**

*младший научный сотрудник  
Кафедра теплофизики энергоэффективных тепловых технологий  
Институт технической теплофизики  
Национальной академии наук Украины*

**Regragui Aboubakr**

*Junior Research*

*Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**Ганжа Марк Владимирович**

*младший научный сотрудник*

*Кафедра теплофизики энергоэффективных тепловых технологий*

*Институт технической теплофизики*

*Национальной академии наук Украины*

**Hanzha Mark**

*Junior Research*

*Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА В  
МИКРОФАКЕЛЬНЫХ ГОРЕЛКАХ С ТУРБУЛИЗАТОРАМИ ПОТОКА  
REGULARITIES OF FUEL BURNOUT IN MICROJET BURNERS WITH  
FLOW TURBULATORS**

*Аннотация.* Представлены результаты численных исследований процесса выгорания топлива в горелочных устройствах стабилизаторного типа. Рассмотрены возможности использования плоских турбулизаторов потока для интенсификации процесса горения.

*Ключевые слова:* микрофакельные горелочные устройства, выгорание топлива, интенсификация процессов горения.

**Summary.** *The results of numerical studies of the process of fuel burnup in burner devices of the stabilizer type are presented. The possibilities of using flat flow turbulators to intensify the combustion process are considered.*

**Key words:** *microjet burners, fuel burnout, combustion intensification.*

**Актуальность исследования.** Микрофакельные горелочные устройства стабилизаторного типа обладают целым рядом известных достоинств и широко применяются в энергетической практике [1-10]. Применение различных методов и способов интенсификации процесса горения данных горелочных устройств призвано повысить эффективность их работы на режимах частичной нагрузки огнетехнических объектов. Кроме того, использование этих методов служит устранению ряда неблагоприятных режимов работы данных объектов, таких как заброс пламени за пределы топочного пространства, «лизание» пламенем поверхностей топок небольших размеров и т.д. К эффективным способам интенсификации горения относятся способы, связанные с увеличением периметра поджигания, повышением интенсивности турбулентности в поле горения, предварительным подогревом топливного газа и пр.

Настоящая работа посвящена анализу особенностей интенсификации процесса горения при использовании пластинчатых турбулизаторов потока, установленных на срывных кромках стабилизаторов пламени.

Целью работы является сравнительный анализ закономерностей выгорания топлива в микрофакельных горелках в условиях наличия и отсутствия турбулизаторов потока на торцевых поверхностях стабилизатора пламени.

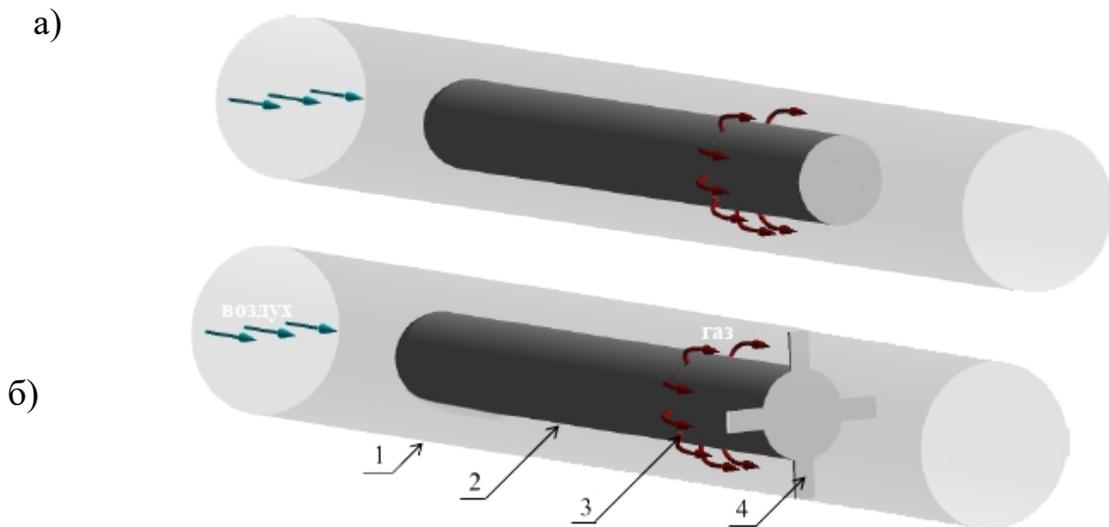
**Постановка задачи и методика исследований.** На рисунке 1 представлены схемы рассматриваемых горелочных устройств. В данных

устройствах топливный газ через газоподающие отверстия 3 на боковых поверхностях стабилизатора пламени 2 подается внедрением в сносящийся поток воздуха, поступающий в канал 1. Рассмотрению подлежат два варианта конструктивных решений горелочного устройства. Первый из них отвечает гладкому стабилизатору пламени, второй – стабилизатору с пластинчатыми турбулизаторами потока 4 на его срывной кромке.

Математическая постановка рассматриваемой задачи тепломассопереноса имеет вид:

- уравнение движения

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho U) + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla P + \nabla \cdot (S^*), \quad (1)$$



**Рис. 1. Схемы различных модификаций горелочных устройств с цилиндрическими стабилизаторами пламени:** а) гладкие; б) с пластинчатыми турбулизаторами потока на срывных кромках стабилизаторов: 1 – цилиндрический канал; 2 – цилиндрический стабилизатор; 3 – газоподающие отверстия; 4 – пластинчатые турбулизаторы потока

- уравнение сплошности

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho U) = 0, \quad (2)$$

- уравнение энергии для реагирующих турбулентных потоков

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho I) + \nabla \cdot (\rho UI) = \nabla \cdot q_{\Sigma} + q_V, \quad (3)$$

- уравнение сохранения массы  $i$ -го химического компонента

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho U Y_i) = -\nabla \cdot J_i + R_i, \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \quad (4)$$

- уравнение состояния для многокомпонентной смеси

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T \sum_i^N \frac{Y_i}{M_i}}, \quad (5)$$

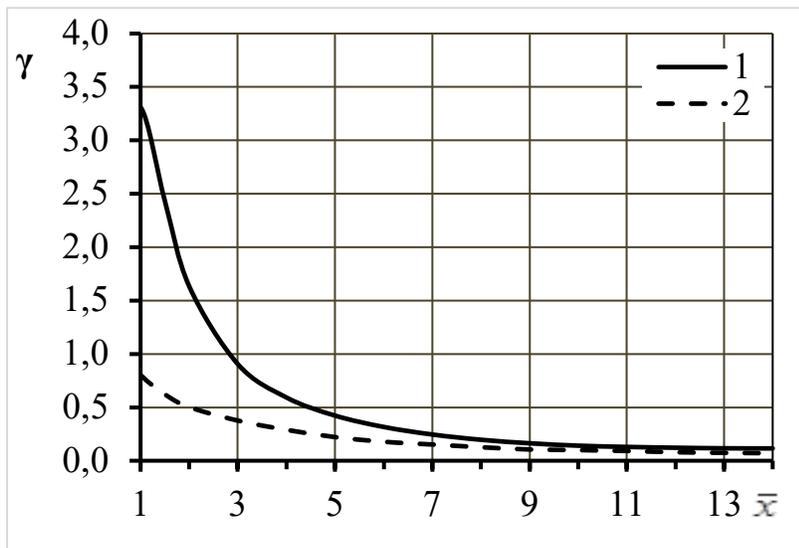
где  $U$  – вектор скорости;  $\tau$  – время;  $P$  – статическое давление;  $S^*$  – тензор напряжений, учитывающий вязкие напряжения и дополнительные напряжения, обусловленные турбулентностью;  $\rho$  – плотность;  $q_{\Sigma}$  – суммарный тепловой поток, включающий поток теплопроводностью и дополнительный поток, вызванный турбулентными пульсациями;  $q_V$  – источниковый член, учитывающий теплоту химических реакций и перенос теплоты радиацией;  $I$  – общая энтальпия,  $I = \sum_i Y_i I_i$  (здесь  $I_i$ ,  $Y_i$  – энтальпия и массовая концентрация  $i$ -го компонента);  $R_i$  – источниковый член, учитывающий скорость образования  $i$ -ой компоненты в химической реакции;  $J_i$  – поток массы  $i$ -ой компоненты, обусловленный диффузией и турбулентным переносом;  $M_i$  – молекулярная масса  $i$ -ой компоненты;  $N$  – количество компонент смеси;  $T$  – абсолютная температура;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Что касается граничных условий для приведенной выше системы уравнений, то они определялись следующим образом. В сечениях, отвечающих

входу в канал горелочного устройства и в газоподающие отверстия, задавались постоянные значения скоростей, концентраций, температур и пр. В выходном сечении канала горелочного устройства ставились так называемые «мягкие» граничные условия – равенство нулю продольных производных всех зависимых переменных. На непроницаемых граничных поверхностях канала и стабилизаторов задавались условия прилипания. На боковых поверхностях канала принимались граничные условия второго рода.

При решении поставленной задачи использовался программный продукт FLUENT. Для замыкания рассматриваемой системы уравнения применялась RNG  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности.

**Анализ результатов.** На рис. 2, 3 представлены характерные данные CFD моделирования, отвечающее следующим исходным параметрам: наружный диаметр стабилизаторов пламени  $d_{ст} = 0,03$  м; внутренний диаметр канала  $D = 0,09$  м; диаметр газоподающих отверстий  $d = 0,002$  м; количество газоподающих отверстий  $N = 12$ ; длина стабилизатора  $L = 0,25$  м; расстояние от затупленной задней кромки до газоподающих отверстий  $L_1 = 0,06$  м; количество турбулизаторов  $N_1 = 4$ ; ширина турбулизаторов  $B_1 = 0,01$  м; расход газа  $G_r = 10$  м<sup>3</sup>/час; коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,1$ ; температура топливного газа и воздуха на входе равна 300 К.



**Рис. 2. Изменение по длине канала относительной неравно-мерности поля температур  $\gamma$  в поперечных сечениях факела при отсутствии (1) и наличии (2) турбулизаторов потока**

Согласно полученным данным (рис. 2) относительная неравномерность

поля температур  $\gamma$  ( $\gamma = \frac{t_{\max} - t_{\text{ср}}}{t_{\text{ср}} - t_{\text{вх}}^{\text{B}}}$ , где  $t_{\max}$ ,  $t_{\text{ср}}$  - максимальная и средняя

температура в данном сечении;  $t_{\text{вх}}^{\text{B}}$  - температура воздуха на входе в канал) в поперечных сечениях факела оказывается существенно более высокой при

отсутствии турбулизаторов потока для всех значений  $\bar{x}$  (здесь  $\bar{x} = \frac{x}{d_{\text{ст}}}$ , где  $x$  -

координата, отсчитываемая от торца стабилизатора вниз по потоку). Это обстоятельство обусловлено, главным образом, тем, что в данном случае периметр поджигания значительно уменьшается.

Как видно из рис. 2, с удалением от торцевой поверхности стабилизатора пламени разница в значениях  $\gamma$  для сопоставляемых ситуаций уменьшается. То есть влияние особенностей начала горения локализуется вблизи торцевой поверхности стабилизатора так, что на расстоянии  $\bar{x} \approx 9,0$  данное влияние практически отсутствует.

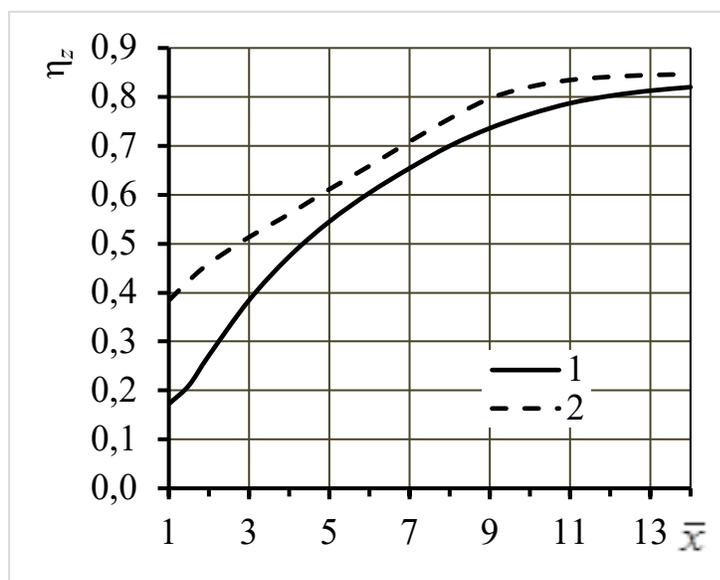


Рис. 3. Изменение коэффициента  $\eta_z$  полноты сгорания топлива по длине канала для цилиндрической горелки при отсутствии (1) и наличии (2) турбулизаторов потока

Что касается выгорания топлива, то оно является более интенсивным при наличии турбулизаторов потока (рис. 3). Так, на расстоянии от торца стабилизатора пламени, равном его диаметру ( $\bar{x} = 1,0$ ) коэффициент полноты сгорания топлива  $\eta_z$  составляет 0,39 и 0,18 при наличии и отсутствии турбулизаторов потока соответственно. По мере удаления от торца стабилизатора наблюдается тенденция к уменьшению различий в значениях  $\eta_z$  для сопоставляемых ситуаций.

**Выводы.** На основе CFD моделирования установлены закономерности влияния турбулизаторов потока на степень неравномерности полей температур в зоне горения и интенсивность выгорания топлива в микрофакельных горелочных устройствах.

### Литература

1. Бутовский Л.С. Устойчивость факела за плоским стабилизатором при подаче газа внедрением в воздушный поток / Л.С. Бутовский, Е.Л. Грановская, Н.М. Фиалко // Технологические системы. 2010, 52(3). С. 72-77.

2. Фиалко Н.М. Интенсификация процессов переноса в горелочном устройстве с цилиндрическим стабилизатором пламени /Н.М. Фиалко, Ю.В. Шеренковский, Н.В. Майсон, Н.О. Меранова, Л.С. Бутовский, М.З. Абдулин, Н.П. Полозенко, А.В. Клищ, С.Н. Стрижеус, А.Б. Тимощенко // Науковий вісник НЛТУ України. 2014. 24. С. 136-142.
3. Фиалко Н.М. Математическое моделирование процессов течения и смесеобразования в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве / Н.М. Фиалко, Ю.В. Шеренковский, Н.В. Майсон, Н.О. Меранова, М.З. Абдулин, Л.С. Бутовский, Н.П. Полозенко, А.В. Клищ, С.Н. Стрижеус, А.Б. Тимощенко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2014. №3. С.40-44
4. Фіалко Н.М. Підвищення інтенсивності процесів переносу в циліндричному стабілізаторному пальнику шляхом застосування прямокутних кільцевих ніш / Н.М. Фіалко, Ю.В. Шеренковський, М.В. Майсон, М.З. Абдулін, С.В. Хомук, А.О. Єніна, В.С. Новицький, О.Б. Тимощенко // Сб. трудов «Проблемы экологии эксплуатации объектов энергетики. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. -С. 122-125.
5. Фиалко Н.М. Влияние пластинчатых турбулизаторов потока на характеристики течения и смесеобразования топлива и окислителя в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве / Н.М. Фиалко, Ю.В. Шеренковский, Н.В. Майсон, Н.О. Меранова, М.З. Абдулин, Л.С. Бутовский, Н.П. Полозенко, А.В. Клищ, С.Н. Стрижеус, А.Б. Тимощенко // Науковий вісник НЛТУ України. 2014. 6(24). С.114-121.
6. Фиалко Н.М. Компьютерное моделирование процесса смесеобразования в горелочных устройствах стабилизаторного типа с подачей газа внедрением в сносящий поток воздуха/ Н.М. Фиалко, Л.С. Бутовский,

- В.Г. Прокопов, Ю.В. Шеренковский, Н.О. Меранова, С.А. Алёшко, Н.П. Полозенко // Промышленная теплотехника. 2011. №1. С. 52-56.
7. Фиалко Н.М. Моделирование структуры течения в эшелонированных решетках стабилизаторов при варьировании шага их смещения/ Н.М. Фиалко, Ю.В. Шеренковский, В.Г. Прокопов, Н.П. Полозенко, Н.О. Меранова, С.А. Алёшко, Г.В. Иваненко, В.Л. Юрчук, Е.И. Милко, Н.Н. Ольховская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015, №2/8. С.29-34.
8. Фиалко Н.М. Компьютерное моделирование процессов переноса в системах охлаждения горелочных устройств стабилизаторного типа/ Н.М. Фиалко, В.Г. Прокопов, Ю.В. Шеренковский, С.А. Алёшко, Н.О. Меранова, М.З. Абдулин, Л.С. Бутовский, А.Н. Миргородский // Промышленная теплотехника. 2012. №1. С. 64-71.
9. Фиалко Н.М. Эффективность систем охлаждения горелочных устройств струйно-стабилизаторного типа/ Н.М. Фиалко, С.А. Алёшко, Ю.В. Шеренковский, Н.О. Меранова, А.Б. Тимощенко, М.З. Абдулин, Л.С. Бутовский // Технологические системы. 2012. 58/1. С. 52-57.
10. Фиалко Н.М. Особенности обтекания плоских стабилизаторов ограниченным потоком / Н.М. Фиалко, Л.С. Бутовский, В.Г. Прокопов, Е.А. Грановская, Ю.В. Шеренковский, С.А. Алёшко, П.С. Коханенко// Промышленная теплотехника. 2010. № 5. С. 26-33.