

УДК 662.61:621

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ И СМЕСООБРАЗОВАНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СТАБИЛИЗАТОРНОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

**Н. М. Фиалко**

Заслуженный деятель науки и техники, член-корреспондент НАН Украины, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом\*

E-mail: nmfialko@ukr.net

**Ю. В. Шеренковский**

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник\*

E-mail: nmfialko@ukr.net

**Н. В. Майсон**

Младший научный сотрудник\*

E-mail: maisonnv@gmail.com

**Н. О. Меранова**

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник\*

E-mail: mnata1956@ukr.net

**М. З. Абдулин**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*

E-mail: mzabduлин@gmail.com

**Л. С. Бутковский**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра теплоэнергетических установок  
тепловых и атомных электростанций  
Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»  
пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

E-mail: nmfialko@ukr.net

**Н. П. Полозенко**

Научный сотрудник\*

**А. В. Клищ**

Аспирант\*

**С. Н. Стрижеус**

Младший научный сотрудник\*

E-mail: st.svitlana@yandex.ua

**А. Б. Тимощенко**

Младший научный сотрудник\*

\*Отдел малой энергетики

Институт технической теплофизики НАН Украины  
ул. Желябова, 2 а, г. Киев, Украина, 03057

E-mail: nmfialko@ukr.net

*Наведено дані числових досліджень процесів переносу в пальниковому пристрої з циліндричним стабілізатором полум'я при подачі палива з бічної поверхні стабілізатора в потік окислювача, що зносить. Обговорюються результати розрахунків щодо можливості інтенсифікації зазначених процесів шляхом використання кільцевої прямокутної нішової порожнини, а також пластинчастих турбулізаторів потоку*

*Ключові слова: стабілізаторний пальниковий пристрій, циліндричний стабілізатор полум'я, інтенсифікація процесів переносу*

*Приведены данные численных исследований процессов переноса в горелочном устройстве с цилиндрическим стабилизатором пламени при подаче топлива с боковой поверхности стабилизатора в сносный поток окислителя. Обсуждаются результаты расчетов относительно возможности интенсификации указанных процессов путем использования прямоугольной кольцевой нишевой полости, а также пластинчатых турбулизаторов потока*

*Ключевые слова: стабилизаторное горелочное устройство, цилиндрический стабилизатор пламени, интенсификация процессов переноса*

## 1. Введение

Для энергетической практики значительный интерес представляет решение проблемы повышения

тепловой эффективности сжигания топлива в горелочных устройствах, которые являются одним из важнейших элементов различных огнетехнических объектов. Среди современных горелочных устройств

особо выделяется класс устройств, реализующих технологию сжигания топлива в стабилизаторах пламени, которая имеет целый ряд известных достоинств. В настоящее время преимущества технологий сжигания топлива в стабилизаторах пламени реализованы, однако не полностью. Это связано, прежде всего, с недостаточно высокой интенсивностью массообменных процессов непосредственно за стабилизатором. Ввиду этого представляют значительный интерес работы направленные на исследования возможностей интенсификации тепломассообменных процессов в горелочных устройствах стабилизаторного типа.

## 2. Анализ литературных данных

Исследованию рабочих процессов в стабилизаторных горелочных устройствах уделяется значительное внимание. Так, в работах [1–3] дан анализ вопросов, связанных с процессами воспламенения в цилиндрическом горелочном устройстве при подаче газа внедрением в сносящий поток окислителя с боковой поверхности стабилизатора пламени (плохообтекаемого тела). Закономерности образования оксидов азота при горении за плохообтекаемым телом детально рассматриваются в работе [4]. Математическое моделирование процессов горения за стабилизатором пламени при учете детального химического механизма реагирования проведено в исследовании [5]. В работе [6] приведены результаты исследования, касающиеся влияния на устойчивость пламени предварительно перемешанной смеси формы стабилизатора пламени и др. В последний период большой интерес представляют исследования связанные с изучением процессов переноса в горелках стабилизаторного типа с газораздачей путем внедрения струй топлива в поперечный поток окислителя (например, [7]), а также с анализом различных средств интенсификации указанных процессов [8–10]. Однако, работы посвященные соответствующим вопросам являются весьма немногочисленными, несмотря на их важное значение для практики проектирования горелочных устройств.

## 3. Цель работы и задачи исследования

Цель данной статьи заключается в анализе возможностей повышения эффективности сжигания топлива в стабилизаторном горелочном устройстве путем интенсификации его рабочих процессов. В настоящей работе возможности интенсификации процессов переноса исследуются относительно цилиндрического горелочного устройства стабилизаторного типа с подачей топлива в сносящий поток окислителя через систему отверстий на боковой поверхности стабилизатора.

В рамках данной работы рассматриваются возможности использования следующих методов интенсификации процессов переноса в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве: использование прямоугольной кольцевой ниши на боковой поверхности стабилизатора; применение пластинчатых турбулизаторов потока.

## 4. Особенности математического моделирования

Схема цилиндрического стабилизаторного горелочного устройства приведена на рис. 1, а. Математическое моделирование проводилось при следующих исходных данных: длина цилиндрического стабилизатора пламени равнялась 0,25 м; его диаметр – 0,03 м; диаметр газоподающих отверстий составлял 0,002 м, а угловой шаг расположения –  $22,5^\circ$ ; диаметр цилиндрического канала 0,09 м; средняя скорость природного газа на выходе из газоподающих отверстий  $U_0^I = 55,3$  м/с; интенсивность турбулентности на входе в горелочное устройство  $I_0 = 3\%$ ; абсолютная температура воздуха и газа  $T = 300$  К; расстояние от срывной кромки стабилизатора до газоподающих отверстий  $L_1 = 0,06$  м. В условиях наличия нишевой полости ее длина и глубина составляли 0,03 м и 0,006 м соответственно (рис. 1, б). Исследование эффектов влияния плоских турбулизаторов потока на процессы переноса в рассматриваемом горелочном устройстве осуществлялось в условиях, когда средняя скорость воздуха во входном сечении горелки  $U_0^B = 10$  м/с, ширина турбулизатора составляла 0,01 м, а его толщина – 0,0015 м (рис. 1, в).

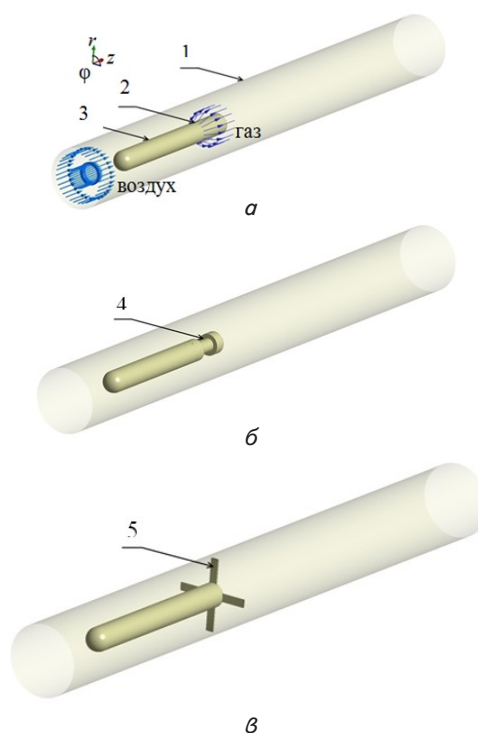


Рис. 1. Схема горелочного устройства с цилиндрическим стабилизатором пламени: а – без средств интенсификации; б – при наличии прямоугольной кольцевой ниши; в – с пластинчатыми турбулизаторами потока; 1 – цилиндрический канал; 2 – газоподающие отверстия; 3 – цилиндрический стабилизатор пламени; 4 – прямоугольная кольцевая нишевая полость; 5 – пластинчатый турбулизатор потока

Выполненные вычислительные эксперименты основывались на решении системы уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу включающей: уравнение движения; уравнение непрерывности для

смеси в целом; уравнений непрерывности для компонентов. Замыкания данной системы базировалось на использовании RNG модификации  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности.

### 5. Основные результаты расчетов процессов переноса в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве и их анализ

Одним из направлений интенсификации процессов горения в горелочных устройствах стабилизаторного типа является использование нишевых полостей. Интенсификация процессов переноса в таких условиях связана с генерацией вихревых структур при отрывном обтекании ниш.

Ниже приведены характерные результаты исследований относительно влияния кольцевой прямоугольной нишевой полости на интенсивность турбулентности потока  $I$  в горелке с цилиндрическим стабилизатором пламени.

Применение нишевой полости приводит к существенному изменению полей интенсивности турбулентности как в качественном так и в количественном отношении.

Согласно данным, приведенным на рис. 2, наличие ниши заметно влияет на величину  $I$  вблизи наружной поверхности стабилизатора, что соответствует радиальной координате  $r = 0,015$  м. Это влияние уменьшается с удалением от данной поверхности (с увеличением  $r$ ), так что на некотором расстоянии от нее становится практически неощутимым. Причем чем ближе расположено сечение  $z = \text{const}$  к входной кромке ниши, тем при меньших значениях  $r$  ( $r = r^*$ ) становятся практически одинаковыми величины интенсивностей турбулентности для ситуаций, отвечающих наличию и отсутствию нишевой полости. Так, при  $z = 0,2125$  м (четверть длины ниши от передней кромки) величина  $r^*$  равна примерно 0,02 м, а при  $z = 0,235$  м (задняя стенка ниши)  $r^* = 0,25$  м.

Таким образом, в зоне расположения ниши ее влияние на интенсивность турбулентности потока локализуется на расстоянии 5–10 мм от наружной поверхности стабилизатора  $r = 0,015$  м, что является важным для воспламенения топлива и стабилизации пламени.

По величине отклонений значений интенсивности турбулентности при наличии и отсутствии нишевой полости, то они могут быть значительными. Так, во внешнем потоке в сечении  $z = 0,235$  м, что соответствует задней стенке ниши, интенсивность турбулентности вблизи наружной поверхности стабилизатора почти вдвое превышает соответствующие значения при отсутствии ниши и составляет примерно 23 %.

Необходимо также отметить, что по результатам выполненных исследований потери давления, связанные с наличием кольцевой прямоугольной ниши, незначительны. А именно, для рассматриваемых условий в случае отсутствия нишевой полости потери давления в горелке равны 33,2 Па, а при наличии ниши – 35,2 Па. То есть, указанные потери увеличиваются лишь на 2,0 Па.

Перейдем к рассмотрению результатов вычислительных экспериментов освещающих закономерности течения и смесеобразования в стабилизаторном горелочном устройстве с цилиндрическим стабилизатором

пламени при наличии на его срывной кромке пластинчатых турбулизаторов потока.

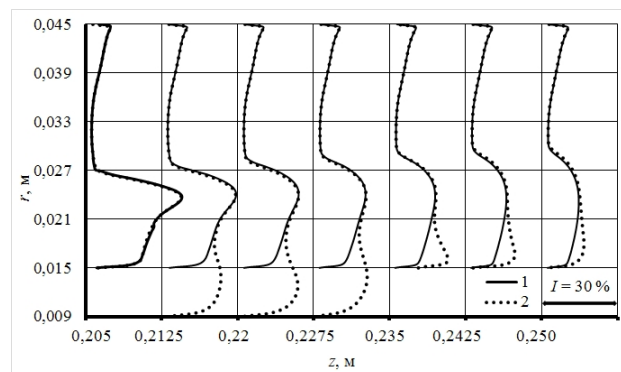


Рис. 2. Распределение интенсивности турбулентности  $I$  по радиусу горелки  $r$  при отсутствии (1) и наличии (2) прямоугольной кольцевой ниши в продольном сечении горелочного устройства, проходящем через центр газоподающего отверстия, при различных значениях осевой координаты  $z$ :  $z = 0,205$  м – передняя стенка ниши;  $z = 0,2125$  м – четверть длины ниши;  $z = 0,22$  м – середина ниши;  $z = 0,2275$  м – три четверти ниши;  $z = 0,235$  м – задняя стенка ниши;  $z = 0,25$  м – срывная кромка стабилизатора

Как видно из приведенных данных, установка турбулизаторов на срывной кромке стабилизатора обеспечивает существенную турбулизацию потока (рис. 3). При этом наибольшие различия в величинах интенсивности турбулентности  $I$ , соответствующие условиям наличия и отсутствия турбулизаторов, имеют место вблизи границ зон рециркуляции (сплошные линии на рис. 3, б, в).

При установке турбулизаторов максимальные значения  $I$  в сечении  $z = 0,25$  м, проходящем через срывную кромку стабилизатора, возрастают в 1,8 раза и достигают 58 % (рис. 3, а). С удалением от срывной кромки вниз по потоку различия максимальных значений величин интенсивности турбулентности в фиксированном сечении  $z = \text{const}$  для двух сопоставляемых ситуаций уменьшаются. Так, если в сечении расположения срывной кромки эти различия достигают 32 % (рис. 3, а), то на расстоянии 20 мм от срывной кромки вниз по потоку они составляют 20 % (рис. 3, б), а на расстоянии 50 и 150 мм – всего 15 % и 8 % соответственно (рис. 3, в, г).

Полученные результаты математического моделирования показали также, что потери давления, обусловленные наличием турбулизаторов потока, являются относительно незначительными. Так, если в случае отсутствия турбулизаторов они составляют 11,4 Па, то при наличии – 24,9 Па.

Таким образом, в горелочных устройствах с пластинчатыми турбулизаторами потока, установленными на затупленной задней кромке стабилизатора, существенно турбулизируется поток при значительном увеличении периметра зажигания факела и небольшим повышении гидравлического сопротивления горелки.

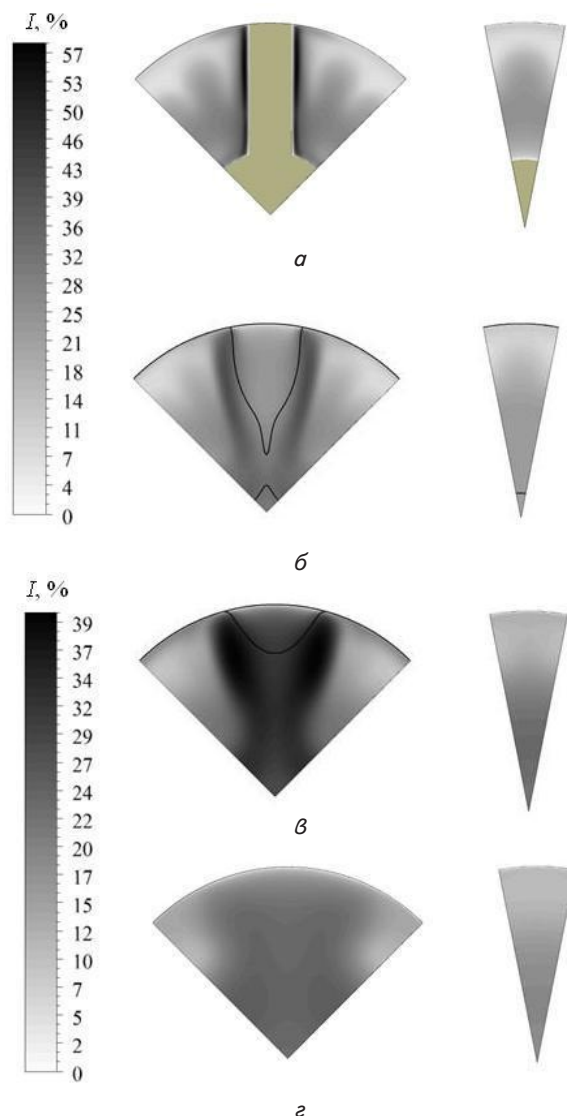


Рис. 3. Поля интенсивности турбулентности при наличии и отсутствии турбулизаторов потока в поперечных сечениях горелки  $z = \text{const}$ , расположенных на срывной кромке стабилизатора и за ней по потоку:  $a - z = 0,25$  м (срывная кромка стабилизатора);  $b - z = 0,27$  м;  $g - z = 0,3$  м;  $z - z = 0,4$  м

Выполненные исследования показали также, что при установке турбулизирующих пластин наблюдается как турбулизация потока, так и соответствующая интенсификация процессов смешивания. Данные, приведенные на рис. 4,  $a, b, g$ , свидетельствуют, что за турбулизатором потока образуется зона значительных размеров, в которой топливная смесь находится в концентрационных пределах воспламенения.

Анализ трансформации полей концентраций метана в поперечных сечениях горелочного устройства, расположенных перед срывной кромкой стабилизатора, показал, что турбулизаторы несколько интенсифицируют смешивания и в данной области (рис. 5). Как видно, в сечениях, прилегающих к устью струй, смесь соответствует концентрационным пределам воспламенения только в зонах вблизи периферии струй (рис. 5,  $a$ ). Однако, размеры таких зон при наличии

турбулизаторов потока являются большими, чем в случае их отсутствия. Эта тенденция сохраняется и на удалении от устья струй (рис. 5,  $б$ ). Следует отметить, что увеличение размеров зон с должным смешиванием при установке турбулизаторов касается, прежде всего, нижней границы струй.

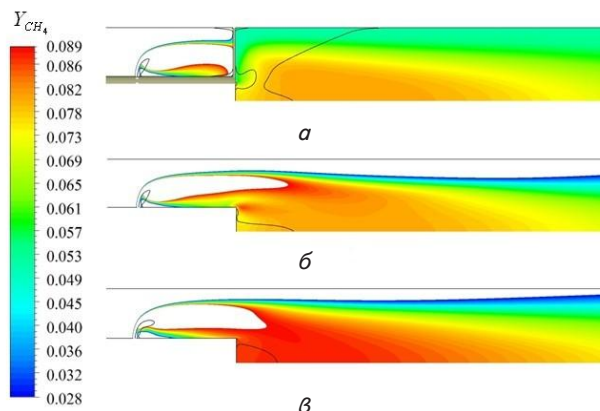


Рис. 4. Поля массовой концентрации метана  $Y_{CH_4}$  в концентрационных пределах воспламенения при наличии и отсутствии турбулизаторов потока в продольном сечении горелки:  $a -$  с турбулизатором при  $\varphi = 0^\circ$  (центр турбулизатора);  $б -$  с турбулизатором при  $\varphi = 45^\circ$ ;  $г -$  без турбулизатора при  $\varphi = 0^\circ$

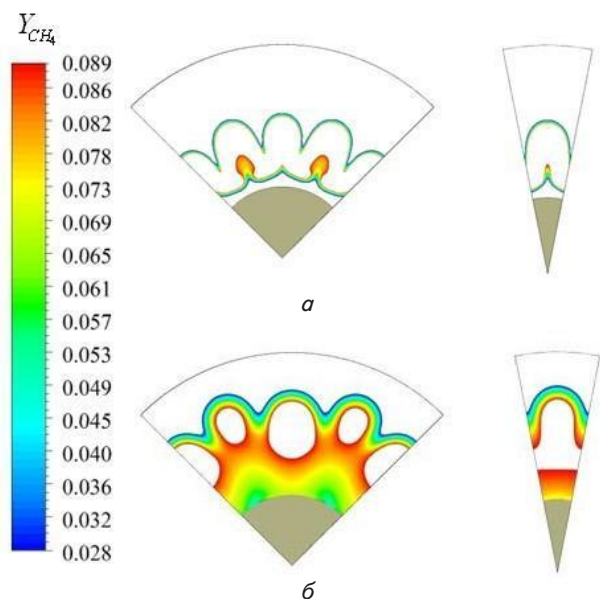


Рис. 5. Поля массовой концентрации метана  $Y_{CH_4}$  в концентрационных пределах воспламенения при наличии и отсутствии турбулизаторов потока в поперечных сечениях горелки  $z = \text{const}$ , расположенных перед турбулизаторами:  $a - z = 0,195$  м;  $б - z = 0,235$  м

Резюмируя выше изложенное, отметим, что, в рассматриваемых условиях, установка пластинчатых турбулизаторов потока на срывной кромке цилиндрического стабилизатора пламени обуславливает более интенсивное протекание процессов смешивания в горелочном устройстве и, соответственно, обеспечивает повышение степени кинетичности горения топли-



ва. Данное обстоятельство является весьма важным для практики проектирования высокоэффективных горелочных устройств стабилизаторного типа.

## 6. Выводы

1. Проведен комплекс математического моделирования по определению закономерностей влияния на характеристики процессов переноса различных способов их интенсификации в стабилизаторных цилиндрических горелочных устройствах с подачей топлива внедрением в сносящий поток окислителя.

2. Выполнены исследования влияния прямоугольной кольцевой ниши на параметры течения в цилиндрическом горелочном устройстве. При этом установлено, что:

- применение нишевой полости приводит к существенному изменению полей интенсивности турбулентности в горелке как в качественном, так и количественном отношении;

- при наличии ниши интенсивность турбулентности потока увеличивается, причем в местах ее максимальных значений может превышать соответствующие величины в случае отсутствия ниши почти в два раза;

- зона наибольшего влияния ниши на турбулизацию потока локализуется вблизи места ее расположения, что является важным для воспламенения топлива и стабилизации пламени;

- потери давления, связанные с наличием кольцевой прямоугольной ниши, являются незначительными и для рассматриваемых условий не превышают 6 % от общих потерь давления в горелке при отсутствии ниши.

3. Проведен анализ возможностей интенсификации течения и смесеобразования в цилиндрических горелках путем установки на срывных кромках стабилизатора пластинчатых турбулизаторов потока. При этом показано, что:

- применение турбулизаторов обеспечивает значительную турбулизацию потока, которая в наибольшей степени проявляется вблизи границ зон обратных токов;

- при установке турбулизаторов наблюдается интенсификация процессов смесеобразования в соответствии с турбулизацией потока топлива и окислителя, что обеспечивает повышение степени кинетичности горения топлива;

- потери давления в горелке, обусловленные наличием турбулизаторов потока, являются относительно небольшими и составляют для исследуемой ситуации 13,5 Па.

## Литература

1. Ahmed, S. F. Spark ignition of turbulent nonpremixed bluff-body flames [Text] / S. F. Ahmed, R. Balachandran, T. Marchione, E. Mastorakos // *Combustion and Flame*. – 2007. – Vol. 151. – P. 366–385.
2. Triantafyllidis, A. Large Eddy Simulations of forced ignition of a non-premixed bluff-body methane flame with Conditional Moment Closure [Text] / A. Triantafyllidis, E. Mastorakos, R. L. G. M. Eggels // *Combustion and Flame*. – 2009. – Vol. 156. – P. 2328–2345.
3. Subramanian, V. Large eddy simulation of forced ignition of an annular bluff-body burner [Text] / V. Subramanian, P. Domingo, L. Vervisch // *Combustion and Flame*. – 2010. – Vol. 157. – P. 579–601.
4. Dally, B. B. Measurements of no in turbulent non-premixed flames stabilized on a bluff body [Text] : twenty-sixth intern. symp. / B. B. Dally, A. R. Masri, R. S. Barlow, G. J. Fiechtner, D. F. Fletcher // *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion / The Combustion Institute*, 1996. – P. 2191–2197.
5. Navarro-Martinez, S. LES-CMC simulations of a turbulent bluff-body flame [Text] / S. Navarro-Martinez, A. Kronenburg // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2007. – Vol. 31. – P. 1721–1728.
6. Bagheri, G. Effects of bluff body shape on the flame stability in premixed micro-combustion of hydrogen-air mixture [Text] / G. Bagheri, S. E. Hosseini, M. A. Wahid // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – Vol. 67. – P. 266–272.
7. Фиалко, Н. М. Компьютерное моделирование процесса смесеобразования в горелочных устройствах стабилизаторного типа с подачей газа внедрением в сносящий поток воздуха [Текст] / Н. М. Фиалко, Л. С. Бутовский, В. Г. Прокопов // *Промышленная теплотехника*. – 2011. – Т. 33, № 1. – С. 51–56.
8. Terekhov, V. I. Vortex formation and heat transfer at turbulent streamlining of transverse cavities with inclined front and back walls [Text] / V. I. Terekhov, N. I. Yarygina, A. Yu. D'yachenko // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2008. – Vol. 51, № 13–14. – P. 3275–3286.
9. Леонтьев, А. И. Вихревая интенсификация тепло-и массообменных процессов с помощью луночных технологий (численное и физическое моделирование) [Текст] / А. И. Леонтьев, С. А. Исаев // *Труды 5-ой Национальной конференции по теплообмену (РНКТ-5)*, Москва. – М.: Изд-во МЭИ (ТУ). – 2010. – Т. 6. – С. 102–105.
10. Бутовський, Л. С. Експериментальні дослідження структури течії у пальникових пристроях стабілізаторного типу з застосуванням кутових турбулізаторів потоку [Текст] : матер. XXII між. конф. / Л. С. Бутовський, Н. М. Фіалко, В. Г. Прокопов та ін. // *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики (Ялта 8-12 июня 2012 г.)*. – Киев, 2012. – С. 141–145.