

ЗАКОНОМІРНОСТІ ТЕЧІЇ В ПРЯМОКУТНИХ КІЛЬЦЕВИХ НІШАХ ЦИЛІНДРИЧНИХ СТАБІЛІЗАТОРНИХ ПАЛЬНИКІВ РІЗНОЇ ПОТУЖНОСТІ

*Н. М. Фіалко, доктор технічних наук, чл.-кор. НАН України
М. В. Майсон¹ Інститут технічної теплофізики НАН України*

М. З. Абдулін², кандидати технічних наук

*М. В. Ганжа¹, К. В. Рокитько¹, А. А. Озеров, інженери¹
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Д. П. Хміль³, інженери

¹Інститут технічної теплофізики НАН України

²Національний технічний університет України «КПІ»

³Національний авіаційний університет

e-mail: nmfialko@ukr.net

Анотація. *Наведено результати розрахункових досліджень течії палива та окиснювача для типоряду циліндричних пальникових пристроїв стабілізаторного типу з нішевими порожнинами. Основну увагу приділено аналізу структури потоку власне в нішах. Наводяться дані щодо рекомендованих параметрів прямокутних кільцевих ніш для пальникових пристроїв різної потужності.*

Ключові слова: *циліндричні стабілізаторні пальники, математичне моделювання, нішеві порожнини, течія палива та окиснювача*

Одним зі способів інтенсифікації спалювання газоподібного палива в стабілізаторних пальникових пристроях є застосування нішевих порожнин різної конфігурації. Дослідженню процесів теплообміну та течії в таких порожнинах присвячено значну кількість робіт (див. наприклад, [1–6]). Однак, вони далеко не повністю забезпечують потреби практики проектування нішевих пальників стабілізаторного типу. Значний інтерес, зокрема, становить поглиблене вивчення питань щодо вибору раціональних параметрів ніш із урахуванням особливостей форми та розмірів стабілізаторів полум'я.

Дана робота спрямована на дослідження закономірностей течії в циліндричних стабілізаторних пальникових пристроях із кільцевими прямокутними нішами. Такі пальники, як відомо, знаходять широке застосування в умовах малої потужності вогнетехнічних об'єктів та при необхідності реалізації в них теплопідводу з високим ступенем рівномірності.

Як метод дослідження закономірностей течії в пальникових пристроях вибрано метод математичного моделювання. Останній, як відомо, стає все більш достовірним та інформативним інструментом при

поглибленому аналізі процесів переносу в умовах спалювання палива (наприклад, [7–11]).

Мета досліджень – встановлення структури течії палива і окиснювача в прямокутних кільцевих нішевих порожнинах пальникових пристроїв із циліндричними стабілізаторами полум'я.

Матеріали та методика досліджень. У роботі проведено математичне моделювання процесів течії для типоряду нішевих циліндричних пальників стабілізаторного типу потужністю від 30 до 200 кВт. На рис. 1 наведено схему такого пальникового пристрою, в табл. 1 – основні характеристики вказаного типоряду. У пальникових пристроях, що досліджуються, реалізується принцип неповного попереднього змішування палива і окиснювача, коли в зону горіння надходить неоднорідна горюча суміш. Природний газ подається в потік повітря, що зносить полум'я через систему круглих отворів на бічній стінці циліндричного стабілізатора. Прямокутна кільцева ніша розміщується на деякому віддаленні від газоподавальних отворів униз по потоку.

Закономірності процесів турбулентного переносу в пальникових пристроях стабілізаторного типу, що розглядаються, досліджувалися в межах *RANS* моделювання турбулентних потоків. Розрахункові експерименти базувалися на розв'язанні такої системи рівнянь:

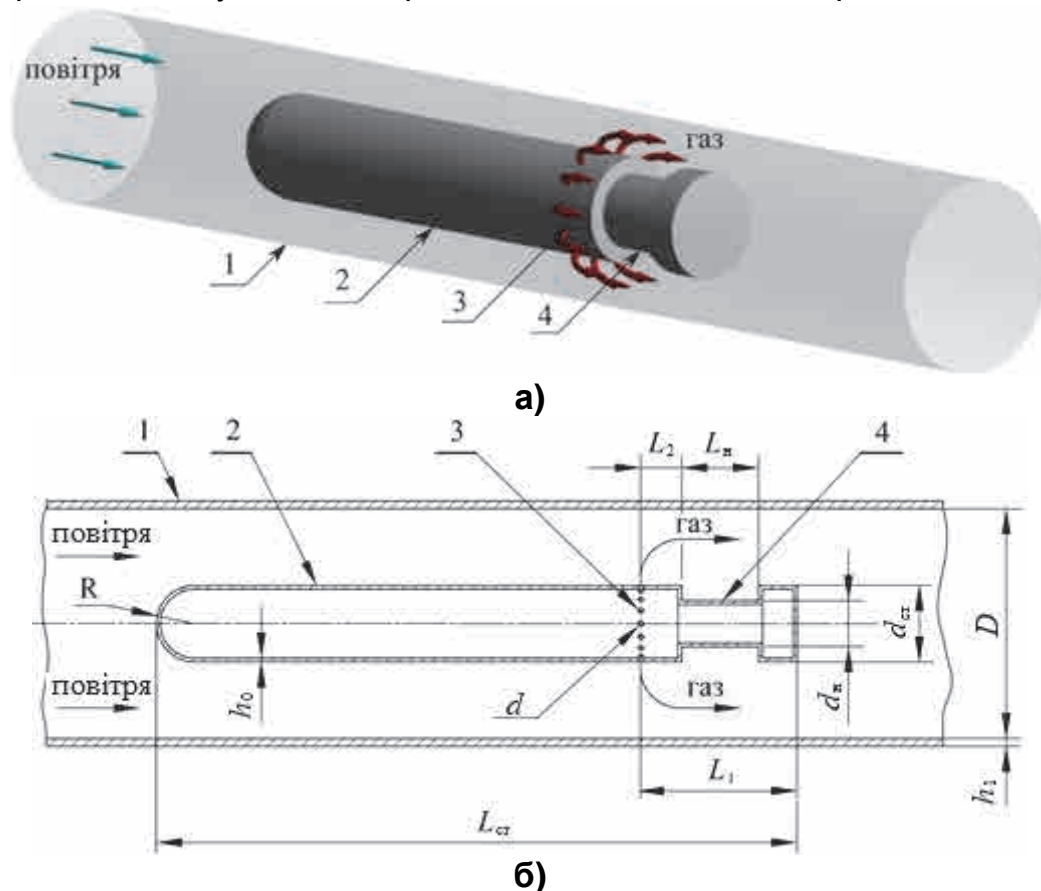


Рис. 1. Схема стабілізаторного циліндричного пальника з кільцевою нішею (а) та його поздовжній переріз (б): 1 – циліндричний канал; 2 – циліндричний стабілізатор полум'я; 3 – газоподавальні отвори; 4 – кільцева ніша

**1. Основні конструктивні та режимні параметри типоряду
циліндричних стабілізаторних пальникових пристроїв
потужністю N_n від 30 до 200 кВт**

N_n , кВт	$d_{ст}$, м	D , м	d , м	Кількість газоподвальних отворів	Витрата газу G_r , м ³ /год	Коефіцієнт надлишку повітря
30	0,02	0,0365	0,002	9	3	1,1
110	0,04	0,073	0,003	13	11	1,1
155	0,05	0,091	0,0035	14	15,5	1,1
200	0,06	0,1095	0,004	15	20	1,1

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_j Y_m}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_m}{\partial x_j}, \quad m = 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

$$\rho = \frac{P}{RT \sum_p \frac{Y_p}{M_p}}, \quad p = 1, \dots, N \quad (4)$$

де

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_t) S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_n}{\partial x_n} \right),$$

$$S_{ij} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

ρ – сумарна густина суміші компонентів;
 u_j – проекція осередненої швидкості на вісь x_j ;
 P – тиск;
 μ, μ_t – коефіцієнти молекулярної й турбулентної в'язкості;
 k – кінетична енергія турбулентності;
 δ_{ij} – символ Кронекера;
 Y_m – масова частка m -го компонента суміші;
 Sc та Sc_t – молекулярне й турбулентне числа Шмідта;
 N – кількість компонент суміші;
 R – універсальна газова стала;
 T – абсолютна температура;

M_p – молярна маса p -го компонента.

Для замикання системи рівнянь (1) – (4) було застосовано k - ε модель турбулентності в модифікації *RNG*:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k (\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + G_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - \left(C_{\varepsilon 2} + C_\mu \frac{\eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \right) \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (6)$$

де

$$G_k = \frac{\mu_t}{\rho} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

ε – швидкість дисипації кінетичної турбулентної енергії;

$$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon;$$

$$\eta = |S_{ij}| k / \varepsilon;$$

α_k та α_ε – зворотні числа Прандтля рівні 1,393;

$$C_{\varepsilon 1} = 1,42;$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1,68;$$

$$C_\mu = 0,0845; \eta_0 = 4,38; \beta = 0,012.$$

Розглядалася розрахункова область у вигляді кутового фрагмента пальникового пристрою, що відповідає половині кутового кроку розташування газоподавальних отворів. Щодо граничних умов, то у вхідному перерізі пальника та вихідних перерізах газоподавальних отворів задавалися значення середньої швидкості потоку, інтенсивності турбулентності, гідравлічного радіуса, температури та масових часток компонентів суміші; на вихідній границі значення перших похідних у напрямку до нормалі від залежних змінних приймалися рівними нулю; на границях розрахункової області, що відповідають поверхням гідродинамічної симетрії, задавалися рівними нулю нормальні до цих поверхонь компоненти швидкості та нормальні перші похідні від залежних змінних; на твердих поверхнях ставилися умови прилипання та непроникності. У пристінкових розрахункових вузлах шукані величини визначалися на основі методу пристінкових функцій.

Результати досліджень. На рис. 2 наведено результати комп'ютерного моделювання картини течії палива і окиснювача в пальникових пристроях потужністю $N_p = 30; 110; 155$ і 200 кВт за наявності нішевої порожнини розміром $L \times H = 0,03 \times 0,006$ м. Тут, у першу чергу, звертає на себе увагу той факт, що в усіх розглянутих пальникових пристроях протяжність первинного вихору в ніші є помітно коротшою, ніж її довжина. При цьому, чим менша потужність N_p , тим менша зазначена протяжність. Щодо місця розташування первинного вихору в нішевій порожнині, то він для всіх значень N_p зміщується у напрямку до передньої стінки ніші. Зона

вихрової течії біля задньої стінки ніші з ростом потужності N_p є все більш яскраво вираженою і зсувається з дна ніші до її кромки.

Для ефективного сумішоутворення і стабілізації полум'я в ніші зона первинного вихору в ній, як відомо, повинна займати основну частину простору ніші, і відповідно його протяжність не повинна значно відрізнятись від довжини L нішевої порожнини. Згідно з отриманими даними, ніша завдовжки $L = 0,03$ м в умовах, що розглядаються, не відповідає зазначеним вимогам. Довжина нішевої порожнини, очевидно, повинна бути коротшою, дещо збільшуючись із підвищенням потужності N_p .

У табл. 2 наведено отримані в результаті обчислювальних досліджень рекомендовані значення абсолютної й відносної довжини кільцевої прямокутної ніші ($\bar{L} = L/H$). Відповідну картину течії палива та окиснювача подано на рис. 3. Як видно з таблиці, відносна довжина \bar{L} для розглянутого типоряду пальників знаходиться в межах $3 \leq \bar{L} \leq 4$, що відповідає допустимому діапазону її зміни $2,5 \leq \bar{L} \leq 5,0$.

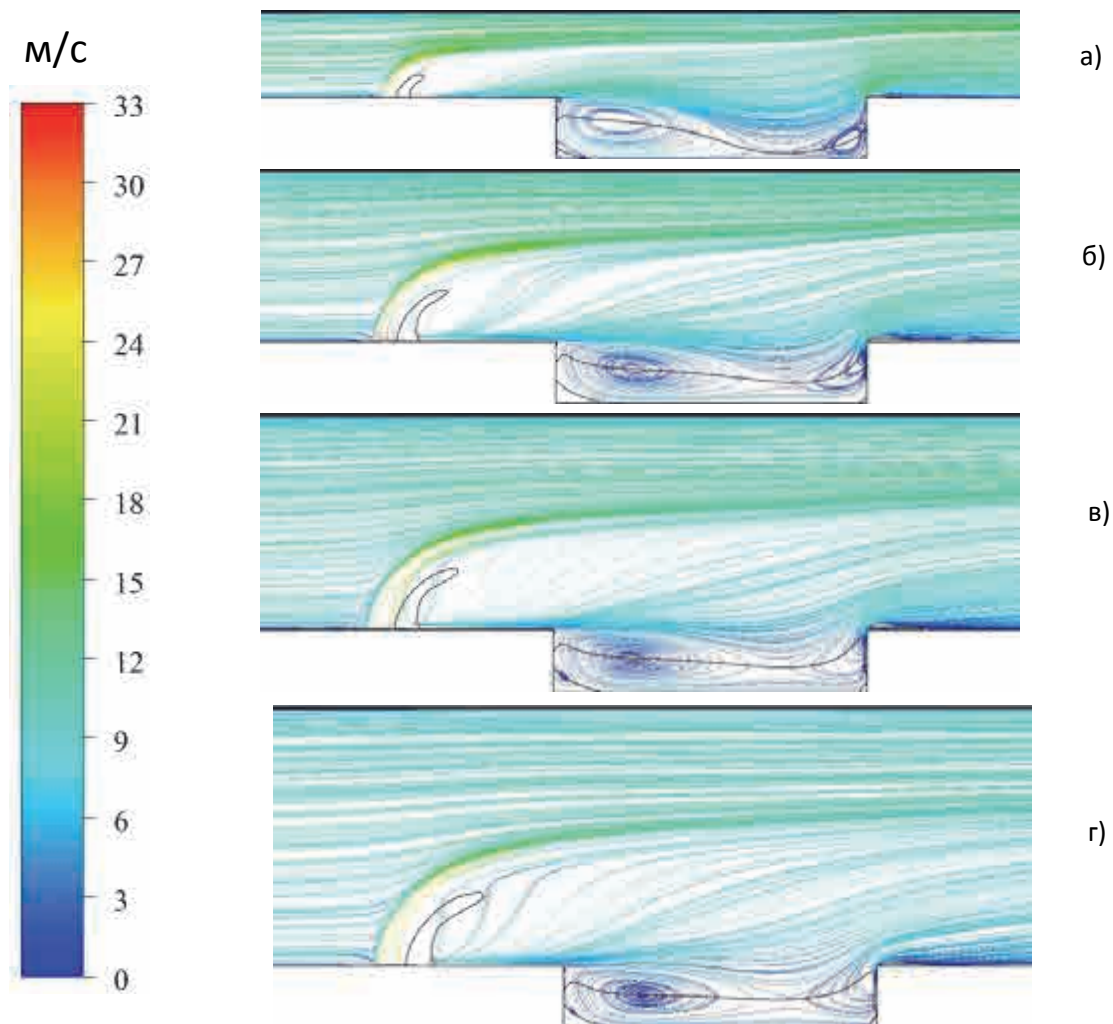


Рис. 2. Фрагмент ліній току в поздовжньому перерізі нішевого пальникового пристрою, що проходить через вісь газоподавального отвору, для ніш розміром $L \times H = 0,03 \times 0,006$ м

за різної потужності пальників:

а) $N_p = 30$ кВт; б) $N_p = 110$ кВт; в) $N_p = 155$ кВт; г) $N_p = 200$ кВт

2. Абсолютні та відносні величини рекомендованих значень довжин нішевої порожнини для типоряду циліндричних стабілізаторних пальникових пристроїв

N_n , кВт	30	110	155	200
L , м	0,018	0,021	0,0225	0,024
\bar{L}	3	3,5	3,75	4

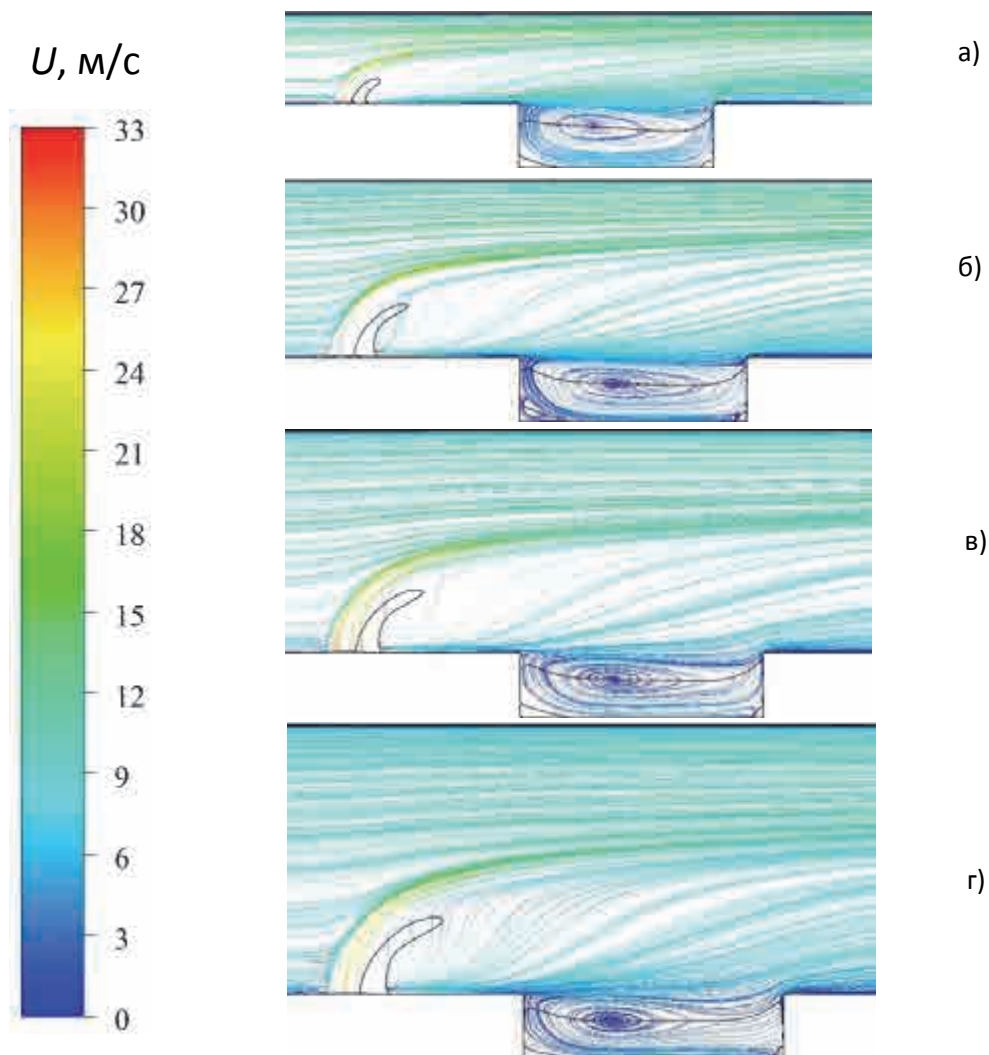


Рис. 3. Фрагмент ліній току в поздовжньому перерізі пальникового пристрою, що проходить через вісь газоподавального отвору, за рекомендованих конструктивних параметрів нішевих порожнин для пальників різної потужності:

а) $N_n = 30$ кВт; б) $N_n = 110$ кВт; в) $N_n = 155$ кВт; г) $N_n = 200$ кВт

Згідно з результатами математичного моделювання, для рекомендованих значень довжини ніші за всіх величин потужності N_n протяжності первинного вихору в нішевій порожнині лише дещо менші за її довжину, так що вихор займає основну частину цього простору (рис. 3). Останнє, як було зазначено, є однією з важливих умов сприятливого сумішоутворення та стабілізації полум'я в ніші.

Висновки

Для циліндричних пальників стабілізаторного типу потужністю від 30 до 200 кВт на основі одержаних даних щодо характеристик циркуляційної течії в нішевих порожнинах цих пристроїв розроблено рекомендації з вибору геометричних параметрів даних порожнин. Визначено, що для пальників потужністю $N_p = 30; 110; 155$ і 200 кВт, рекомендовані значення довжини ніші, віднесені до їх висоти, становлять 3,0; 3,5; 3,75; 4,0 відповідно.

Список літератури

1. Дьяченко А. Ю. Обтекание турбулентным потоком поперечной каверны с наклонными боковыми стенками. Ч. 1. Структура потока / А. Ю. Дьяченко, В. И. Терехов, Н. И. Ярыгина // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47, № 5. – С. 68–76.
2. Дьяченко А. Ю. Обтекание турбулентным потоком поперечной каверны с наклонными боковыми стенками. 2. Теплообмен. / А. Ю. Дьяченко, В. И. Терехов, Н. И. Ярыгина // Прикладная механика и техническая физика. – 2007. – Т. 48, № 4. – С. 23–29.
3. Фиалко Н. М. Анализ влияния геометрической формы нишевой полости на аэродинамическое сопротивление канала / Фиалко Н. М., Прокопов В. Г., Алешко С. А. [и др.] // Промышленная теплотехника. – 2012 – Т. 34, № 1. – С. 72–76.
4. Фиалко Н. М. Математическое моделирование взаимодействия вихревых структур в прямоугольной нише / Н. М. Фиалко, Г. В. Иваненко, В. Г. Прокопов [и др.] // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики : материалы XXII межд. конференции, Ялта 8–12 июня 2012 г. – К., 2012. – С. 148–150.
5. Фиалко Н. М. Математическое моделирование процессов течения и смесеобразования в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве / Фиалко Н. М., Шеренковский Ю. В., Майсон Н. В. [и др.] // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 3, № 8 (69). – С. 40–44.
6. 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 [та ін.] // Сб. трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». – К., 2014. – С. 122–125.
7. Blanquart, G. Modeling autoignition in non-premixed turbulent combustion using a stochastic flamelet approach / G. Blanquart, H. Pitsch // Proc. Combust. Inst. – 2005. – Vol. 30. – P. 2745–2753.
8. Echekki Tarek, Mastorakos Epaminondas Turbulent Combustion Modeling: Advances, New Trends and Perspectives. Fluid mechanics and its applications, Volume 95, 2011, 513 p.
9. 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.
10. 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.

11. Westbrook, C. K. Computational combustion / C. K. Westbrook, Y. Mizobuchi, T. J. Poinso, P. J. Smith, J. Warantz // Proc. Combust. Inst. – 2005.– Vol. 30. – P. 125–157.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ НИШАХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СТАБИЛИЗАТОРНЫХ ГОРЕЛОК РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ

***Н. М. Фиалко, Н. В. Майсон, М. З. Абдулин, М. В. Ганжа,
К. В. Рокитко, А. А. Озеров, Д. П. Хмиль***

Аннотация. *Представлены результаты расчетных исследований течения топлива и окислителя для типоряда цилиндрических горелочных устройств стабилизаторного типа с нишевыми полостями. Основное внимание в статье уделено анализу структуры потока в собственно нишах. Приводятся данные о рекомендованных параметрах прямоугольных кольцевых ниш для горелочных устройств различной мощности.*

Ключевые слова: *цилиндрические стабилизаторные горелки, математическое моделирование, нишевые полости, течение топлива и окислителя*

FLOW PATTERN IN RECTANGULAR ANNULAR CAVITIES OF CYLINDRICAL STABILIZER BURNERS OF VARIOUS CAPACITY

***N. Fialko, M. Maison, M. Abdulin, M. Ganzha,
K. Rokitko, A. Ozerov, D. Khmil***

Annotation. *The numerical simulation results of oxidizer and fuel flow to type series of cylindrical burner devices of stabilizer type with cavities are presented. The main attention in paper is paid to the analysis of the flow pattern in the cavities. The data are given with respect to recommended parameters of the rectangular annular cavities for the burner devices of various capacity.*

Key words: *cylindrical stabilizer burners, numerical simulation, cavities, oxidizer and fuel flow*