

**ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТУРБУЛИЗАТОРОВ ПОТОКА
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧЕНИЯ В МИКРОФАКЕЛЬНЫХ
ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ**

Н. М. Фиалко, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент

НАН Украины

В. Г. Прокопов, доктор технических наук, профессор

Н. О. Меранова, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

С. А. Алешко, кандидат технических наук

Н. П. Полозенко, кандидат технических наук

О. Н. Кутняк, инженер

Институт технической теплофизики НАН Украины

E-mail: nmfialko@ukr.net

Аннотация. *Использование турбулизаторов потока в микрофакельных горелочных устройствах призвано обеспечить интенсификацию тепломассообменных процессов в зоне активного горения и в целом улучшить энергоэкологические показатели горелок данного типа.*

Имеющиеся исследования различных способов интенсификации процессов горения не охватывают множество вопросов, касающихся закономерностей влияния различных факторов на характеристики рабочих процессов микрофакельных горелочных устройств в случае использования того или иного метода интенсификации горения. Важным является установление зависимости данных характеристик от различных конструктивных параметров турбулизаторов потока.

Цель настоящего исследования – установить закономерности влияния на характеристики течения высоты турбулизирующих пластин, расположенных на боковых поверхностях стабилизаторов пламени.

Исследование проводилось на основе компьютерного моделирования с использованием FLUENT кода. Результаты выполненных исследований показали, что с увеличением высоты турбулизирующей пластины от 0,005 до 0,01 м происходит существенное изменение картины течения, проявляющееся в удлинении зон циркуляционных течений за стабилизатором пламени, в повышении максимальных по абсолютной величине значений скорости в данных зонах, увеличении уровня пульсаций скорости и размеров подобластей, в которых данные пульсации значительны и т.д. Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением рассматриваемой ситуации в условиях реагирующих потоков.

Ключевые слова: *микрофакельные горелочные устройства, компьютерное моделирование, турбулизаторы потока, структура течения*

Актуальность. Один из путей существенного повышения эффективности рабочих процессов микрофакельных горелочных устройств стабилизаторного типа заключается в применении всевозможных способов интенсификации тепломассообмена и выгорания топлива. Среди таких способов особо выделяется использование различных турбулизаторов потока, установленных на поверхности стабилизаторов пламени. Это обуславливает актуальность исследований, направленных на установление эффектов влияния турбулизаторов потока на характеристики течения в стабилизаторных горелочных устройствах.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследованию различных способов интенсификации процессов горения посвящено большое количество работ [1-8]. Так, работы [1-3] посвящены исследованию рабочих процессов микрофакельных горелочных устройств малой мощности при установке на торцевых поверхностях стабилизаторов пламени специальных турбулизаторов потока. В [4-6] представлены результаты исследований, касающиеся использования для интенсификации горения нишевых полостей на боковых поверхностях стабилизаторов пламени. В [7, 8] – приведены данные по установлению закономерностей протекания процессов переноса в стабилизаторных горелочных устройствах при применении эшелонирования стабилизаторов пламени в качестве способа интенсификации горения.

Имеющиеся исследования, однако, не охватывают множество вопросов, касающихся закономерностей влияния различных факторов на характеристики рабочих процессов микрофакельных горелочных устройств в случае использования того или иного метода интенсификации горения. В частности, важным является установление зависимости данных характеристик от различных конструктивных параметров турбулизаторов потока.

Цель исследования - изучение эффектов влияния на структуру течения высоты турбулизирующих пластин, установленных на боковых поверхностях плоского стабилизатора пламени микрофакельного горелочного устройства. При этом в задачу исследования входит анализ особенностей вихревой структуры в

закормовой области стабилизатора, изучение картины соответствующих пульсационных характеристик скорости и пр.

Материалы и методы исследования. В работе в качестве метода исследования использовалось математическое моделирование. Задача решалась в трехмерной постановке. Исследования проводились на основе усредненных уравнений Навье-Стокса с использованием двухпараметрической диссипативной $k-\varepsilon$ модели в модификации RNG. Численная реализация решения осуществлялась с помощью программного модуля ANSYS FLUENT.

Выполненные исследования соответствуют таким исходным данным: расход природного газа $G = 200 \text{ м}^3/\text{ч}$; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,1$; температура газа $t_{\text{вх}}^{\text{г}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$; температура воздуха на входе в горелочное устройство $t_{\text{вх}}^{\text{в}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ диаметр газоподающих отверстий $d_{\text{г}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; относительный шаг расположения отверстий $S/d_{\text{г}} = 3,33$. Моделирование выполнялось для горелки без турбулизирующей пластины и с пластиной высотой $h_{\text{т}} = 5,0 \cdot 10^{-3}$; $7,5 \cdot 10^{-3}$ и $10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. На рис. 1 представлена схема горелочного устройства стабилизаторного типа с турбулизирующей пластиной.

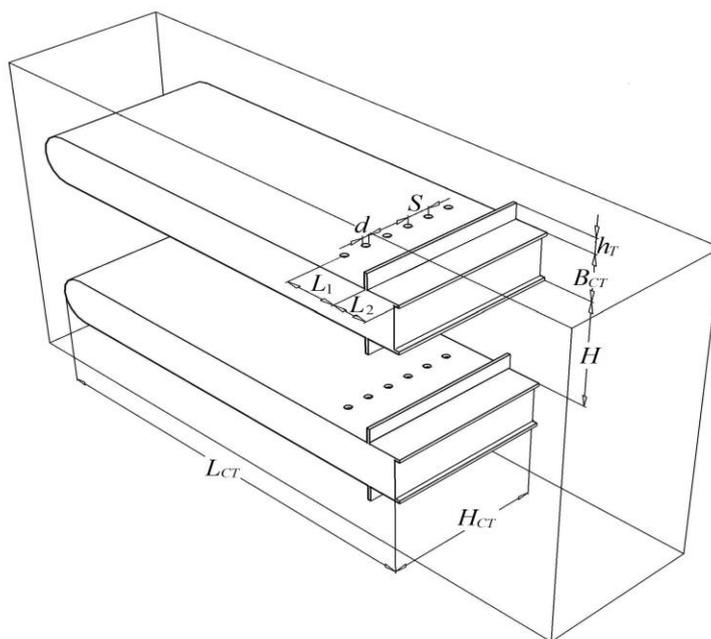


Рис. 1. Схема горелочного устройства стабилизаторного типа с турбулизирующей пластиной

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 2-4 приведены характерные результаты выполненных исследований. Картины линий тока для ситуации, соответствующей отсутствию турбулизирующей пластины, иллюстрирует рис. 2, а. На рис. 2, б; в; г представлены соответствующие данные для решетки стабилизаторов с турбулизирующей пластиной, высота которой составляет соответственно $5,0 \cdot 10^{-3}$; $7,5 \cdot 10^{-3}$ и $10 \cdot 10^{-3}$ м. Как видно, в случае отсутствия турбулизирующей пластины конфигурация зоны обратных токов в ближнем следе за стабилизатором является относительно простой, а ее длина сравнительно небольшой. В ситуации же, когда на боковых поверхностях стабилизаторов установлены указанные пластины, форма зон рециркуляции существенно усложняется. Здесь при $h_T = 7,5 \cdot 10^{-3}$ и $10 \cdot 10^{-3}$ м наблюдается образование общей вихревой структуры за турбулизирующей пластиной и стабилизатором пламени, размеры которой достаточно значительны. В случае $h_T = 5,0 \cdot 10^{-3}$ м имеют место две вихревые структуры, одна из которых генерируется за турбулизирующей пластиной, а вторая – в закормовой зоне стабилизатора (рис. 2).

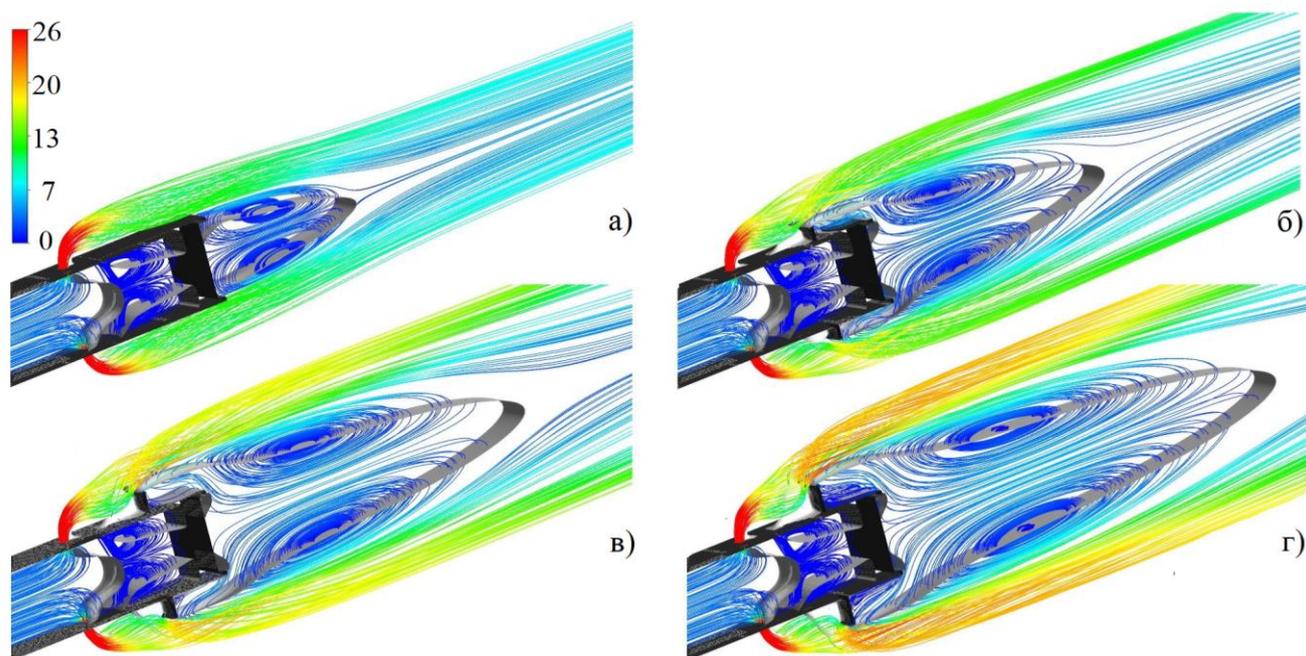


Рис. 2. Картина линий тока в плоском стабилизаторе пламени, без турбулизирующей пластины (а), и с пластиной различной высоты h_T :

$$\text{б} - h_T = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м; в} - h_T = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ м; г} - h_T = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

1. Положение центра вихревой структуры за стабилизатором пламени при различных значениях высоты h_T турбулизирующих пластин

| | | | | |
|--------------------------|------|------|-----|------|
| $h_T, 10^{-3} \text{ м}$ | 0 | 5 | 7,5 | 10 |
| $x, 10^{-3} \text{ м}$ | 27,5 | 32,8 | 45 | 56 |
| $y, 10^{-3} \text{ м}$ | 8,3 | 13,3 | 16 | 17,7 |

С увеличением высоты пластины h_T положение центра вихря за срывной кромкой стабилизатора заметно меняется. А именно, указанный центр смещается, во-первых, вниз по потоку и кроме того – в межстабилизаторное пространство. Соответствующие данные приведены в табл. 1 (здесь координата x отсчитывается вниз по потоку от торца стабилизатора, а координата y – от середины стабилизатора пламени по его высоте).

Как показали выполненные исследования, при наличии турбулизирующих пластин существенно меняется не только картина вихреобразования в системе стабилизаторов, но претерпевает значительные изменения и структура течения за пределами вихревых зон. При этом в системе стабилизаторов с турбулизирующими пластинами наблюдаются такие тенденции относительно указанных изменений. Прежде всего наличие турбулизирующих пластин вызывает увеличение дальнотойности струй топлива за счет воздействия на них ускоренного за данными пластинами потока. Наряду с этим применение турбулизаторов, приводит к росту скорости потока за пределами вихревых зон. Данный рост является тем большим, чем выше турбулизирующие пластины h_T (см. рис. 3). Следует также отметить, что протяженность указанных подобластей с повышенными уровнями скорости возрастает с увеличением высоты турбулизирующих пластин.

Согласно результатам компьютерного моделирования длина зоны обратных токов за стабилизатором пламени L_{30T}^{CT} составляет $89,3 \cdot 10^{-3}$; $123,2 \cdot 10^{-3}$; и $155,4 \cdot 10^{-3}$ м при $h_T = 5,0 \cdot 10^{-3}$; $7,5 \cdot 10^{-3}$ м соответственно. То есть имеет место линейное увеличение величины L_{30T}^{CT} с ростом h_T . При этом максимальные по абсолютной величине скорости в зонах обратных токов заметно увеличиваются. А именно, от 3,6 м/с при $h_T = 5,0 \cdot 10^{-3}$ м до 5,1 м/с при $h_T = 10,0 \cdot 10^{-3}$ м.

Как показали результаты выполненных исследований, наличие турбулизирующих пластин обуславливает некоторое повышение потерь ΔP давления в системе. Для $h_T = 5,0 \cdot 10^{-3}$ м величина ΔP составляет 75,2 Па а для $h_T = 10,0 \cdot 10^{-3}$ м она увеличивается до 164,2 Па.

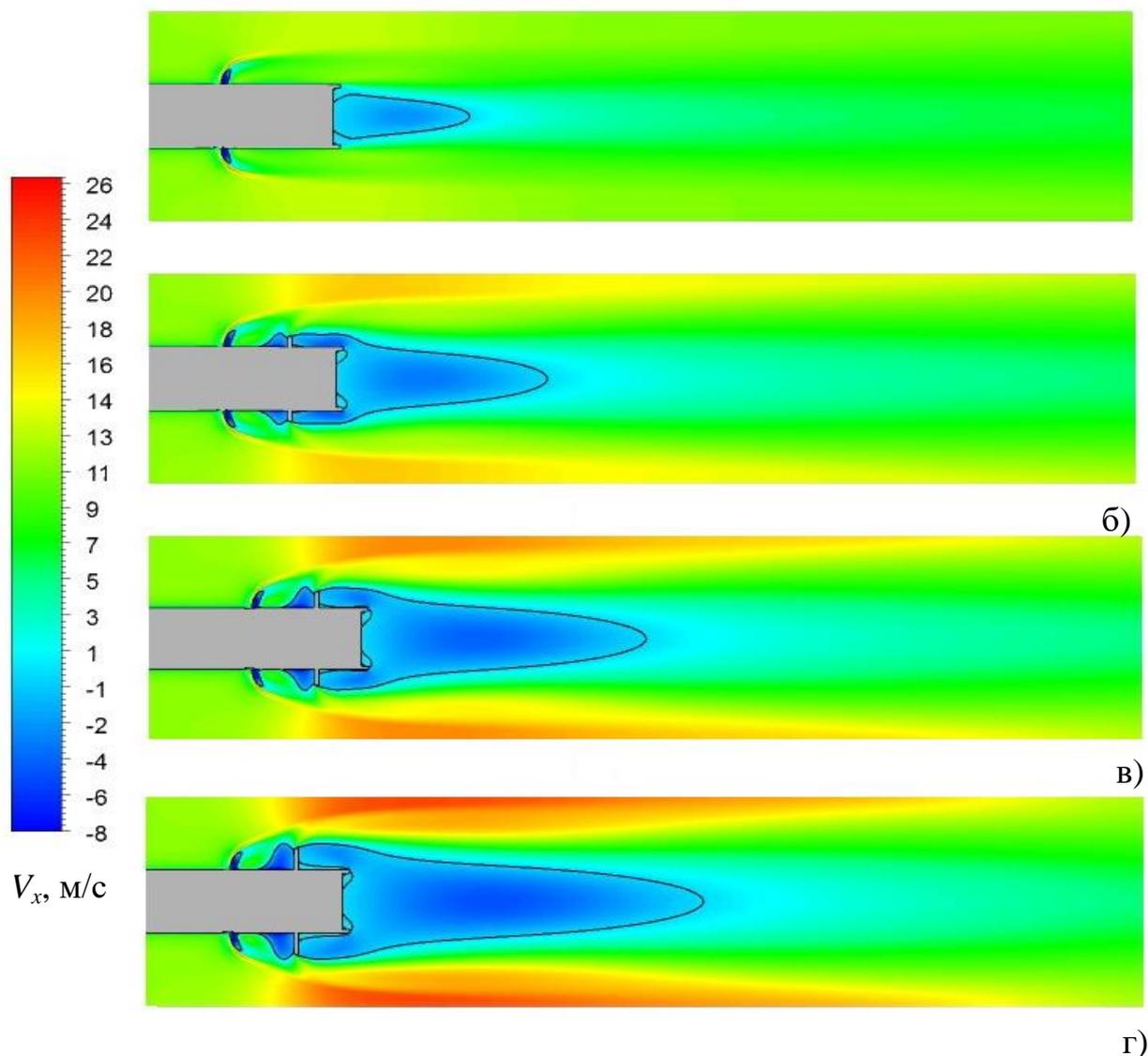


Рис. 3. Поля скорости V_x в продольном сечении канала xOy при $z = 0$, без турбулизирующих пластин (а), и с пластинами различной высоты h_T :

$$б - h_T = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м; в - } h_T = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ м; г - } h_T = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Результаты компьютерного моделирования свидетельствуют также о том, что установление турбулизирующих пластин вызывает существенный рост пульсаций скорости. На рис. 4 приведены поля пульсаций скорости для стабилизаторов пламени без турбулизирующих пластин и с этими пластинами различной высоты h_T .

С увеличением h_T значительно возрастают в целом уровни пульсаций скорости в системе. К тому же увеличиваются размеры под областей, в которых данные пульсации достигают значительных величин. Указанные под области, как видно из рис. 4, располагаются вдоль границ зон обратных токов.

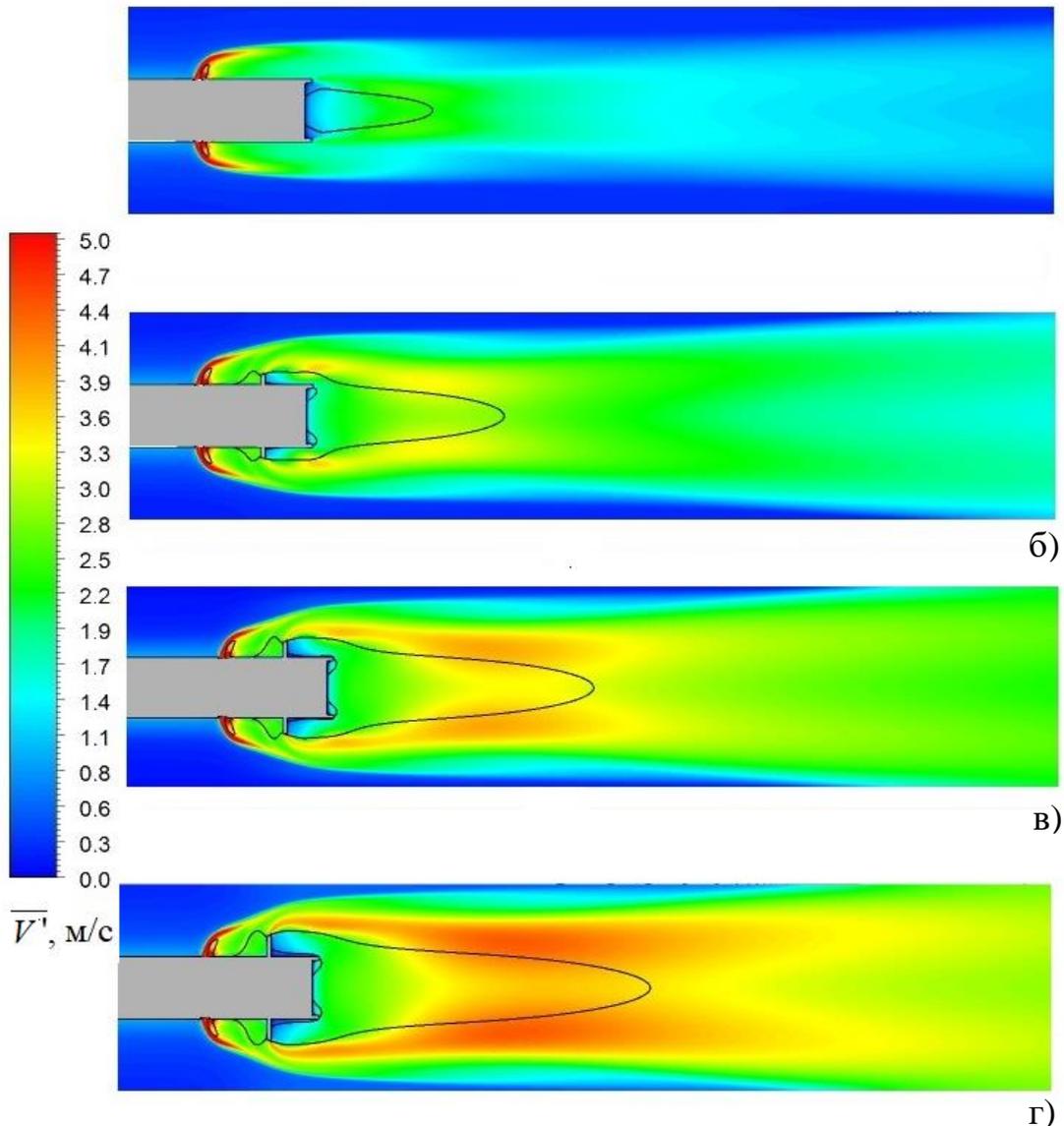


Рис. 4. Поля пульсаций скорости в продольном сечении канала xOy при $z = 0$, без турбулизирующих пластин (а), и с пластинами различной высоты h_T :
 $\delta - h_T = 5,0 \cdot 10^{-3}$ м; $\epsilon - h_T = 7,5 \cdot 10^{-3}$ м; $\zeta - h_T = 10 \cdot 10^{-3}$ м

Выводы и перспективы. На основе компьютерного моделирования выполнены исследования структуры изотермического течения в микрофакельном горелочном устройстве с пластинчатыми турбулизаторами потока на боковых поверхностях стабилизаторов пламени. Установлены закономерности влияния

высоты данных турбулизаторов на различные характеристики течения. В частности, показано, что с ростом высоты турбулизатора:

- формируется общая вихревая структура за турбулизатором и стабилизатором пламени;
- существенно увеличивается длина зон обратных токов за стабилизаторами пламени и максимальные по абсолютной величине значения скорости в этих зонах;
- увеличиваются уровни пульсаций скорости и размеры зон, в которых данные пульсации достигают значительных величин;
- повышаются потери давления на горелочном устройстве, которые при этом остаются относительно небольшими.

Выполненные исследования могут быть продолжены в направлении изучения влияния на структуру течения конструктивных параметров турбулизаторов в условиях реагирующих потоков.

Список использованных источников

1. 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.
2. 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. 246. С. 114-121.
3. Фіалко Н. М., Майсон Н. В., Меранова Н. О., Іваненко Г. В., Юрчук В. Л., Ганжа М. В., Дончак М. І., Абдулін М. З., Тимощенко О. Б. Особливості аеродинаміки пальникових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності турбулізаторів потоку на їхніх зривних кромках. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК»*. 2016. Вип. 252. С.52-61.
4. Абдулін М. З., Фіалко Н. М., Шеренковський Ю. В., Меранова Н. О., Бутовський Л. С., Юрчук В. Л., Іваненко Г. В., Кліщ А. В., Тимощенко О.Б. Структура течії у системі турбулізатор – нішова порожнина. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2017. Т.27, № 3. С. 131-135.
5. Фіалко Н. М., Полозенко Н. П., Кутняк О. М., Дашковська І. Л., Кліщ А. В., Реграгі А., Ганжа М. В., Тимощенко О. Б. Моделювання турбулентних течій в мікрофакельних пальниках з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності

прямокутних нішових порожнин. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2020. № 12 (92). С. 43-46.

6. Фиалко Н. М., Шеренковский Ю. В., Прокопов В. Г., Полозенко Н. П., Меранова Н. О., Алешко С. А., Милко Е. И., Озеров А. А., Кутняк О. Н., Швецова Л. А., Абдулин М. З. Влияние на характеристики течения степени загромождения эшелонированными стабилизаторами каналов горелочных устройств. *Науковий вісник НУБіП України*. 2015. Вип. 209, ч. 2. С.45-53.

7. Фиалко Н. М., Шеренковский Ю. В., Прокопов В. Г., Полозенко Н. П., Меранова Н. О., Алешко С. А., Иваненко Г. В., Юрчук В. Л., Милко Е. И., Ольховская Н. Н. Моделирование структуры течения в эшелонированных решетках стабилизаторов при варьировании шага их смещения. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2015. Т.2, №8 (74). С. 29–34.

8. Фиалко Н. М., Прокопов В. Г., Бутовский Л. С., Шеренковский Ю. В., Алешко С. А., Меранова Н. О., Полозенко Н. П. Особенности течения топлива и окислителя при эшелонированном расположении стабилизаторов пламени. *Промышленная теплотехника*. 2011. №2. С. 59–64.

References

1. Fialko, N. M., Sherenkovskiy, YU. V., Mayson, N. V., Meranova, N. O., Butovskiy, L. S., Abdulin, M. Z., Polozenko, N. P., Klishch, A. V., Strizheus, S. N., Timoshchenko, A. B. (2014), Matematicheskoye modelirovaniye protsessov techeniya i smeseobrazovaniya v tsilindricheskom stabilizatornom gorelochnom ustroystve [Mathematical modeling of the processes of flow and mixture formation in a cylindrical stabilizing burner device]. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, Vol.3, №8(69), 40-44.

2. Fialko, N. M., Sherenkovskiy, YU. V., Mayson, N. V., Meranova, N. O., Abdulin, M. Z., Butovskiy, L. S., Polozenko, N. P., Klishch, A. V., Strizheus, S. N., Timoshchenko, A. B. (2014). Vliyaniye plastinchatykh turbulizatorov potoka na kharakteristiki techeniya i smeseobrazovaniya topliva i okislitelya v tsilindricheskom stabilizatornom gorelochnom ustroystve [Influence of plate flow turbulators on the characteristics of flow and mixture formation of fuel and oxidizer in a cylindrical stabilizing burner device]. *Naukoviy visnik NLTU Ukraïni*, 246, 114-121.

3. Fialko, N. M., Maison, N. V., Meranova, N. O., Ivanenko, H. V., Yurchuk, V. L., Hanzha, M. V., Donchak, M. I., Abdulin, M. Z., Tymoshchenko, O. B. (2016). Osoblyvosti aerodynamiky palnykovykh prystroiv z tsylindrychnymy stabilizatoramy polum'ia za naiavnosti turbulizatoriv potoku na yikhnikh zryvnykh kromkakh [Features of aerodynamics of burner devices with cylindrical flame stabilizers in the presence of flow turbulizers at their breaking edges]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Serii «Tekhnika ta enerhetyka APK»*, 252, 52-61.

4. Abdulin, M. Z., Fialko, N. M., Sherenkovskiy, Yu. V., Meranova, N. O., Butovskiy, L. S., Yurchuk, V. L., Ivanenko, H. V., Klishch, A. V., Tymoshchenko, O.B. (2017). Struktura techiei u systemi turbulizator – nishova porozhnyina [The structure of the flow in the turbulizer system is a niche cavity]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, 27 (3), 131-135.

5. Fialko, N. M., Polozenko, N. P., Kutniak, O. M., Dashkovska, I. L., Klishch, A. V., Rehrah, A., Hanzha, M. V., Tymoshchenko, O. B. (2020). Modeliuvannia turbulentnykh techii v mikrofaKellynykh palnykakh z tsylindrychnymy stabilizatoramy polum'ia za naiavnosti priamokutnykh nishovykh porozhnyh [Modeling of turbulent flows in micro flare burners with cylindrical flame stabilizers in the presence of rectangular niche cavities]. Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal «Internauka», 12 (92), 43-46.

6. Fialko, N. M., Sherenkovskiy, YU. V., Prokopov, V. G., Polozenko, N. P., Meranova, N. O., Aleshko, S. A., Milko, YE. I., Ozerov, A. A., Kutnyak, O. N., Shvetsova, L. A., Abdulin, M. Z. (2015). Vliyaniye na kharakteristiki techeniya stepeni zagromozhdeniya eshelonirovannymi stabilizatorami kanalov gorelochnykh ustroystv [Influence on the flow characteristics of the degree of clutter by echeloned stabilizers of the channels of burner devices]. Naukoviy visnik NUBiP Ukraïni, 209 (2), 45-53.

7. Fialko, N. M., Sherenkovskiy, YU. V., Prokopov, V. G., Polozenko, N. P., Meranova, N. O., Aleshko, S. A., Ivanenko, G. V., Yurchuk, V. L., Milko, YE. I., Ol'khovskaya, N. N. (2015). Modelirovaniye struktury techeniya v eshelonirovannykh reshetkakh stabilizatorov pri var'irovani shaga ikh smeshcheniya [Modeling the flow structure in echeloned grids of stabilizers with varying the step of their displacement]. Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy, Vol. 2, 8 (74), 29–34.

8. Fialko, N. M., Prokopov, V. G., Butovskiy, L. S., Sherenkovskiy, YU. V., Aleshko, S. A., Meranova, N. O., Polozenko, N. P. (2011). Osobennosti techeniya topliva i okislitelya pri eshelonirovannom raspolozhenii stabilizatorov plameni [Features of the flow of fuel and oxidizer with an echeloned arrangement of flame stabilizers]. Promyshlennaya teplotekhnika, 2, 59–64.

ВПЛИВ ВИСОТИ ПЛАСТИНЧАСТИХ ТУРБУЛІЗАТОРІВ ПОТОКУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧІЇ В МІКРОФАКЕЛЬНИХ ПАЛЬНИКАХ

***Н. М. Фіалко, В. Г. Прокопов, Н. О. Меранова,
С. А. Алешко, Н. П. Полозенко, О. Н. Кутняк***

Анотація. Використання турбулізаторів потоку в мікрофакельних пальниках покликане забезпечити інтенсифікацію тепломасообмінних процесів в зоні активного горіння і в цілому поліпшити енергоекологічні показники пальників цього типу.

Наявні дослідження різних способів інтенсифікації процесів горіння не охоплюють безліч питань, що стосуються закономірностей впливу різних чинників на характеристики робочих процесів мікрофакельних пальників у разі використання того чи іншого методу інтенсифікації горіння. Важливим є встановлення залежності цих характеристик від різних конструктивних параметрів турбулізаторів потоку.

Мета цього дослідження - встановити закономірності впливу на характеристики течії висоти турбулізуючих пластин, розташованих на бічних поверхнях стабілізаторів пolum'я.

Дослідження проводилося на основі комп'ютерного моделювання з використанням FLUENT коду. Результати виконаних досліджень показали, що зі збільшенням висоти турбулізуючої пластини від 0,005 до 0,01 м відбувається суттєва зміна картини перебігу, що виявляється в подовженні зон циркуляційних

течії за стабілізатором полум'я, в підвищенні максимальних за абсолютною величиною значень швидкості в цих зонах, збільшення рівня пульсацій швидкості і розмірів підобластей, в яких ці пульсації значні, тощо. Перспективи подальших досліджень пов'язані з вивченням цієї ситуації в умовах реагуючих потоків.

Ключові слова: мікрофакельні пальники, комп'ютерне моделювання, турбулізатори потоку, структура течії

INFLUENCE OF HEIGHT OF PLATE FLOW TURBULIZERS ON FLOW CHARACTERISTICS IN MICROFLOW BURNERS

N. Fialko, V. Prokopov, N. Meranova, S. Aleshko, N. Polozenko, O. Kutnyak

Abstract. *The use of flow turbulators in microflame burners is intended to intensify heat and mass transfer processes in the active combustion zone and, in general, to improve the energy and environmental performance of burners of this type.*

The available studies of various methods of intensifying combustion processes do not cover many issues related to the regularities of the influence of various factors on the characteristics of the working processes of microflame burners in the case of using one or another method of intensifying combustion. It is important to establish the dependence of these characteristics on various design parameters of the flow turbulators.

The purpose of this study is to establish the patterns of influence on the flow characteristics of the height of the turbulizing plates located on the side surfaces of the flame stabilizers.

The research was carried out on the basis of computer simulation using the FLUENT code. The results of the studies performed showed that with an increase in the height of the turbulizing plate from 0.005 to 0.01 m, there is a significant change in the flow pattern, which manifests itself in the lengthening of the circulation flow zones behind the flame stabilizer, in an increase in the maximum absolute value of the velocity in these zones, an increase in the level of velocity pulsations. and the size of the subregions in which these pulsations are significant, etc. Prospects for further research are related to the study of the considered situations in the conditions of reacting flows.

Key words: *microflame burners, computer simulation, flow turbulators, flow structure*