

Технічні науки

УДК 536.24:533

Фиалко Наталья Михайловна

*доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент НАН Украины, заведующая отделом
Институт технической теплофизики НАН Украины*

Fialko Nataliia

*Doctor Technical Sciences, Professor,
Corresponding Member NAS of Ukraine, Head Department
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Прокопов Виктор Григорьевич

*доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник
Институт технической теплофизики НАН Украины*

Prokopov Viktor

*Doctor Technical Sciences, Professor, Leading Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Алёшко Сергей Александрович

*кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
Институт технической теплофизики НАН Украины*

Alioshko Sergiy

*Candidate of Technical Sciences (PhD), Leading Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS 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 NAS 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, Senior Scientist, Leading Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Полозенко Нина Петровна

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт технической теплофизики НАН Украины*

Polozenko Nina

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Юрчук Владимир Леонидович

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт технической теплофизики НАН Украины*

Yurchuk Volodymyr

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Малецкая Ольга Евгеньевна

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт технической теплофизики НАН Украины*

Maletska Olha

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Кутняк Ольга Николаевна

*научный сотрудник
Институт технической теплофизики НАН Украины*

Kyniak Olga

*Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Клищ Андрей Владимирович

*младший научный сотрудник
Институт технической теплофизики НАН Украины*

Klishch Andriy

*Junior Research
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА
В МИКРОФАКЕЛЬНЫХ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ СО
СПЕЦИАЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ ОХЛАЖДЕНИЯ
COMPUTER SIMULATION OF TRANSFER PROCESSES IN
MICROJET BURNER DEVICES WITH SPECIAL COOLING SYSTEMS**

Аннотация. Выполнен анализ эффективности систем охлаждения микрофакельных струйно-стабилизаторных горелочных устройств. Исследованы особенности течения и теплообмена в системах охлаждения с обдувом внутренней поверхности торца стабилизатора пламени плоским и круглыми импактными струями.

Ключевые слова: системы охлаждения, компьютерное моделирование, микрофакельные горелочные устройства.

Summary. *The analysis of efficiency of cooling system of the microjet stabilization burner devices is performed. The features of the flow and heat transfer in cooling systems with air blowing of the inner surface of flame stabilizer and with flat and circular impact jets are studied.*

Key words: *cooling systems, computer simulation, microjet burners.*

Введение. Микрофакельные горелочные устройства находят широкое применение в огнетехнических объектах различного назначения, что связано с целым рядом их известных достоинств [1-7]. Тепловое состояние элементов указанных горелочных устройств, как известно, в большой мере определяет долговечность и надежность их работы. При отсутствии специального охлаждения таких устройств недопустимо высокие уровни температуры имеют место в той части конструкции, которая охватывает торцевую зону стабилизатора пламени, обращенную в топочное пространство. Это обстоятельство определяет необходимость разработки для указанных горелочных устройств специальных систем охлаждения, призванных снизить уровни температур в отмеченных теплонапряженных торцевых зонах стабилизаторов пламени. В качестве способа локального охлаждения торцевых стенок стабилизатора был выбран их струйный обдув, поскольку он занимает одно из первых мест среди высокоэффективных методов интенсификации теплообмена. Данный метод, как известно, обеспечивает в оптимальных условиях увеличение интенсивности теплообмена в 3-5 раз по сравнению с продольным обтеканием поверхности.

В рассматриваемой ситуации в качестве охлаждающего агента применяется природный газ до его поступления в газоподающие

отверстия. Таким образом, предлагаемые схемы охлаждения представляют собой системы «самоохлаждения» горелочных устройств.

Цель статьи. Данная работа посвящена сравнительному анализу эффективности систем охлаждения струйно-стабилизаторных горелочных устройств при использовании для локального охлаждения наиболее теплонапряженных участков стабилизатора пламени струйного обдува плоской и круглыми импактными струями.

Методика проведения исследований. В работе ставится задача об определении эффективности предлагаемых систем охлаждения струйно-стабилизаторных горелочных устройств (рис.1).

При анализе эффективности систем охлаждения горелочных устройств изучению подлежали особенности течения природного газа в собственно системе охлаждения, закономерности его теплообмена со стенками стабилизатора пламени и характеристики его теплового состояния. Определялись также уровни аэродинамических потерь по тракту охладителя, уровни нагрева газа в системе охлаждения и пр.

Поставленная задача решалась методом математического моделирования на основе программного комплекса FLUENT при следующих исходных данных: расход природного газа $G = 200 \text{ м}^3/\text{ч}$; коэффициент избытка воздуха $\bar{\alpha} = 1,1$; температура газа на входе в систему охлаждения $t_{\Gamma}^{\text{BX}} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$; температура воздуха на входе в горелочное устройство $t_{\text{B}}^{\text{BX}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$; материал стенки стабилизатора пламени - сталь 12X18H9T; коэффициент загромождения проходного сечения канала $k_f = 0,3$; диаметр газоподающих отверстий $d_{\Gamma} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; относительный шаг расположения отверстий $S/d_{\Gamma} = 3,33$.

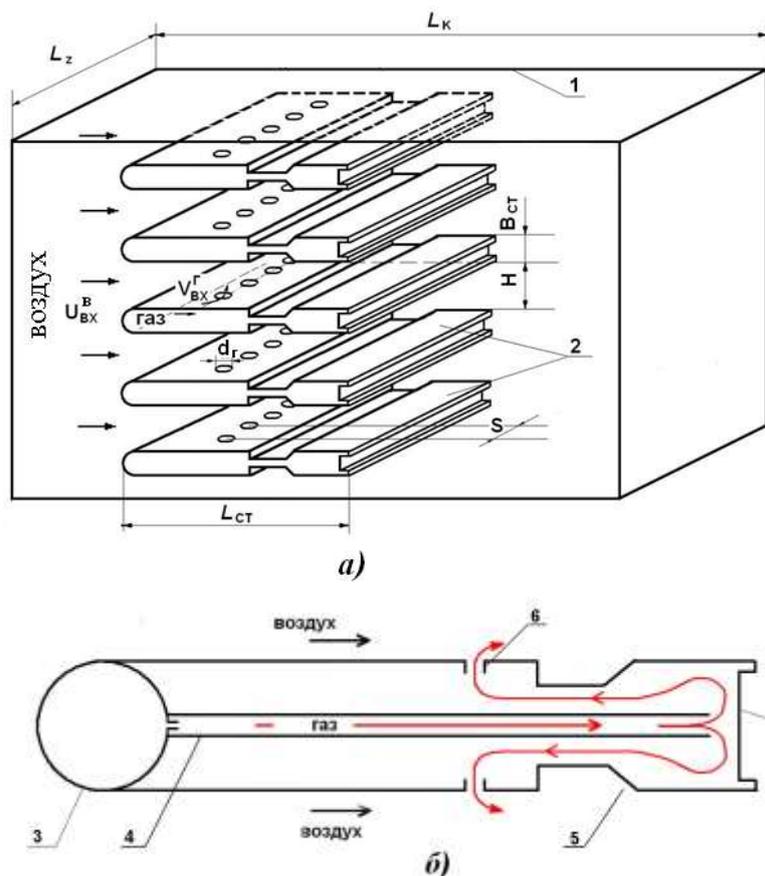


Рис. 1. Схема горелочного устройства струйно-стабилизаторного типа (а) и системы охлаждения стабилизатора пламени (б):

1 – плоский канал; 2 – стабилизаторы пламени; 3 – газоподающий коллектор; 4 – канал для охлаждающего газа; 5 – нишевая полость; 6 – газоподающие отверстия; 7 – торцевая ниша

Согласно результатам проведенных исследований в наиболее неблагоприятных в тепловом отношении условиях оказывается центральный стабилизатор пламени горелочного устройства. Принимая это во внимание и учитывая, что для данного стабилизатора выполняются как условия его геометрической симметрии, так и симметрии всех рассматриваемых процессов переноса, ниже приводятся результаты исследований лишь для половины указанного стабилизатора пламени.

Результаты исследований. Характерные результаты выполненных исследований, касающиеся определения эффективности систем

охлаждения с обдувом внутренней поверхности стабилизатора пламени плоской и круглыми импактными струями, представлены на рис. 2, 3.

Остановимся вначале на рассмотрении данных математического моделирования, связанных с определением основных параметров системы охлаждения со струйным обдувом плоской струей. Типичные результаты полученных численных решений, отвечающие этой схеме охлаждения, приведены на рис. 2, а, 3, а.

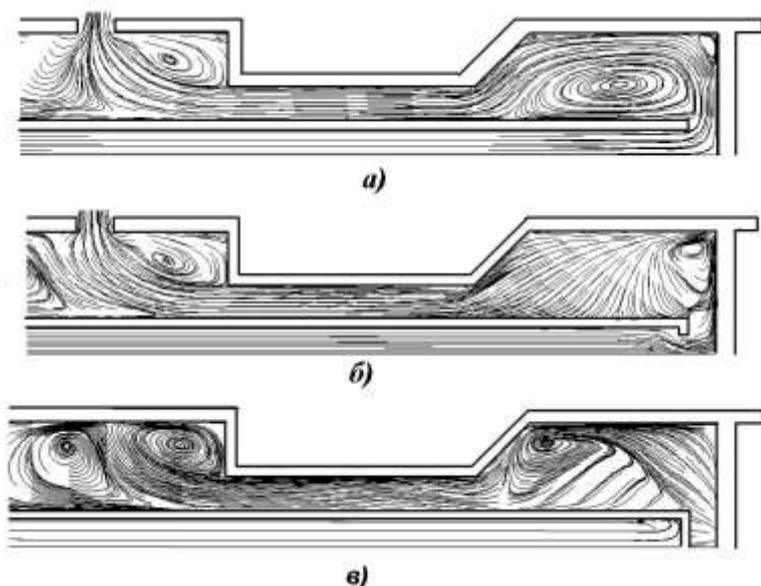


Рис. 2. Картина линий тока охлаждающего агента в продольном сечении, проходящем через ось газоподающего отверстия (а), (б) и через середину межструйного пространства (в) для схемы охлаждения с плоской струей (а) и системой круглых струй (б), (в)

Картину течения охлаждающего газа во внутренней полости стабилизатора пламени иллюстрирует рис. 2, а. Как видно, поток газа из плоского канала, ударяясь о торцевую поверхность стабилизатора, растекается вдоль нее и далее, обтекая нишу, поступает в газоподающие отверстия. При этом в приторцевой зоне стабилизатора пламени образуется крупный вихрь, наружная поверхность которого ограничивает прилегающий к внутренней стенке канала поток, где с достаточно высокой скоростью движется охлаждающий газ. То есть этот вихрь в определенном смысле выполняет функцию ограничителя потока газа, с помощью которого формируется узкий канал для течения охладителя вдоль поверхности стабилизатора пламени. Течение охлаждающего газа

характеризуется также наличием второго крупного вихря вблизи передней стенки ниши и, кроме того, ряда мелких вихрей в угловых зонах стабилизатора пламени.

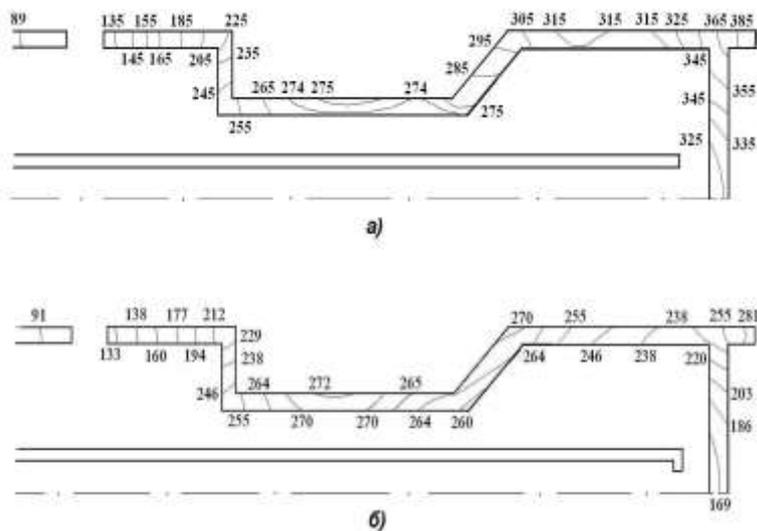


Рис. 3. Поле температур в продольном сечении стабилизатора пламени, проходящем через ось газоподающего отверстия, для схем охлаждения с обдувом торца стабилизатора плоской (а) и системой круглых струй (б)

На рис. 3, а в качестве примера представлено соответствующее поле температур в продольном сечении стабилизатора пламени. Согласно полученным данным минимальное значение температуры торцевой стенки стабилизатора пламени имеет место в области удара струи об ее поверхность и составляет 32°C . По мере удаления от этой области температура возрастает, достигая наибольшего значения, равного 395°C на срывной кромке стабилизатора пламени. Далее с удалением от торца стабилизатора пламени вдоль его боковой стенки усматривается в целом тенденция к снижению температуры, так что на передней стенке нишевой полости она оказывается равной 226°C . Согласно данным компьютерного моделирования температура газа на выходе из системы охлаждения составляет 80°C , т.е. уровень нагрева газа не превышает допустимую величину. Что же касается потерь давления по тракту охладителя, то они равны 1495 Па. Следует отметить, что увеличение потерь давления по сравнению с ситуацией отсутствия специального охлаждения стабилизатора пламени относительно невелико и составляет примерно 27%.

Таким образом, рассматриваемая система охлаждения горелочного устройства стабилизаторного типа с обдувом внутренней торцевой поверхности стабилизатора плоской импактной струей является весьма эффективной в плане обеспечения допустимого уровня как температур стенок стабилизатора пламени, так и нагрева охлаждающего газа при сравнительно небольшом возрастании потерь давления, обусловленном наличием данной системы.

В целях обеспечения высокоэффективного охлаждения торцевой стенки стабилизатора пламени рассматривалась также система охлаждения с применением круглых импактных струй. Соответствующие характерные результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 2, б, в, 3, б. Как видно из рис. 2, б, в, картины течения в приторцевой зоне стабилизатора пламени для продольных сечений, проходящих по оси струи и середине межструйного пространства, существенно отличаются между собой. Это обстоятельство свидетельствует о наличии достаточно ярко выраженной трехмерной структуры течения в данной зоне. Проведенные исследования показали, что максимальные значения скорости газа V_{\max} в приторцевой зоне стабилизатора пламени в случае плоской струи (первая из анализируемых ситуаций) оказываются существенно ниже, чем при наличии круглых импактных струй (вторая ситуация). Соответственно этому может иметь место и существенное различие тепловых состояний стенок стабилизатора пламени для сопоставляемых систем охлаждения (рис. 3, а, б). Например, в центре торцевой зоны стабилизатора пламени температура его наружной поверхности составляет 175 и 328 °С для случая круглых и плоской импактных струй. Как видно из рис. 3, различия температур стенок стабилизатора пламени для сопоставляемых ситуаций падают по мере удаления от его торцевой поверхности, так что уже в области нишевой полости они оказываются сравнительно небольшими. Так, в угловых зонах дна ниши соответствующие температуры равны 277 и

252 °С для первой из рассматриваемых ситуаций и 264 и 251 °С – для второй. Следствием повышения интенсивности теплоотдачи в условиях круглых струй является более высокий уровень нагрева газа в системе охлаждения. Так, согласно полученным данным, температуры газа на выходе из системы охлаждения составляет 91 и 80 °С при использовании обдува торцевой поверхности стабилизатора пламени соответственно круглыми и плоской струями.

Как очевидно, повышение интенсивности теплоотдачи в случае круглых струй связано, в первую очередь, с увеличением скорости собственно струй за счет уменьшения проходного сечения канала в сравнении с плоской струей при неизменном расходе газа. Соответственно этому суммарные потери давлений по тракту охладителя ΔP_{Σ} в условиях круглых струй оказывается существенно выше. Так, здесь ΔP_{Σ} достигает 6000 Па, что примерно в четыре раза превышает эту величину для случая плоской импактной струи.

Таким образом, система охлаждения с круглыми импактными струями является весьма эффективной в плане обеспечения интенсивного охлаждения стенок стабилизатора пламени, однако гидравлические потери в этом случае чрезвычайно велики.

Выводы. Для горелочных устройств струйно-стабилизаторного типа на основе математического моделирования выполнены исследования характеристик их систем охлаждения со струйным обдувом внутренней поверхности стабилизаторов пламени плоской и круглыми импактными струями. По результатам сопоставления данных систем сделан вывод о том, что система с круглыми струями является существенно более эффективной, чем схема с плоской струей, относительно обеспечения требуемого охлаждения стабилизатора пламени, однако она

характеризуется значительно большими потерями давления по тракту охладителя.

Литература

1. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Алешко С.А., Меранова Н.О., Абдулин М.З., Бутовский Л.С., Миргородский А.Н. Компьютерное моделирование процессов переноса в системах охлаждения горелочных устройств стабилизаторного типа // Промышленная теплотехника. 2012. №1. С. 64-71.
2. 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.
3. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Тимощенко А.Б., Абдулин М.З., Малецкая О.Е., Ночовный А.В. Анализ влияния геометрической формы нишевой полости на аэродинамическое сопротивление канала // Промышленная теплотехника. 2012. №1. С. 72-76.
4. 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.
5. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Абдулин М.З., Рокитько К.В., Малецкая О.Е., Милко Е.И., Ольховская Н.Н., Реграги А., Евтушенко А.А. Компьютерное моделирование течения в микрофакельных горелочных устройствах с асимметричной подачей

- топлива // Науковий вісник НЛТУ України. 2018. Т.28, № 8. С. 117-121.
6. 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.
 7. 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 // Технологические системы. 2018. 3(38). С. 37-43.