



Фиалко Н.М.<sup>1,2</sup>, Прокопов В.Г.<sup>1</sup>, Алешко С.А.<sup>1</sup>, Шеренковский Ю.В.<sup>1</sup>, Меранова Н.О.<sup>1</sup>, Тимощенко А.Б.<sup>1</sup>,  
Абдулин М.З.<sup>1,2</sup>, Бутовский Л.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт технической теплофизики НАН Украины, Украина, г. Киев

<sup>2</sup> Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", Украина, г. Киев

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ СТРУЙНО-СТАБИЛИЗАТОРНОГО ТИПА

### Анотація

*Виконано аналіз ефективності систем охолодження мікрофакельних струменево-стабілізаторних пальникових пристроїв. Досліджено особливості течії та теплообміну в системах охолодження з обдувом внутрішньої поверхні торця пілона плоским і круглими імпактними струменями.*

### Abstract

*The analysis of efficiency of cooling system of the micro fuel jet-stabilization burners is performed. The features of the flow and heat transfer in cooling systems with air blowing of the inner surface of pylon end by flat and circular impact jets are studied.*

### Постановка проблемы

Тепловое состояние элементов горелочных устройств, как известно, в большой мере определяет долговечность и надежность их работы. В горелочных устройствах струйно-стабилизаторного типа при отсутствии их специального охлаждения недопустимо высокие уровни температуры имеют место в той части конструкции, которая охватывает торцевую зону пилона, обращенную в топочное пространство [1, 2]. Это обстоятельство определяет необходимость разработки для указанных горелочных устройств специальных систем охлаждения, призванных снизить уровни температур в отмеченных теплонапряженных торцевых зонах пилонов. В качестве способа локального охлаждения торцевых стенок пилон 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 [3].

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.

В зависимости от условий эксплуатации горелочных устройств последние находятся в более или менее жесткой в тепловом отношении обстановке. И, соответственно, используемые системы охлаждения этих устройств должны обеспечивать такой отвод тепла от поверхностей, который отвечал бы условиям их работы. Принимая это во внимание, в рамках данного исследования рассматривается возможность реализации различных схем охлаждения горелочных устройств, а именно, схем со струйным обдувом внутренней поверхности пилон плоской и круглыми импактными струями.

### Формулирование целей статьи

Данная работа посвящена сравнительному анализу эффективности систем охлаждения струйно-стабилизаторных горелочных устройств при использовании для локального охлаждения наиболее теплонапряженных участков пилон 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 этом принимаются во внимание следующие основные требования, предъявляемые к таким системам:

- во-первых, применение систем охлаждения должно обеспечивать такое тепловое состояние стенок пилон, при котором их температура не превышает 550°C;

- во-вторых, температура охлаждающего агента — природного газа — на выходе из системы охлаждения должна быть ниже 350°C;

- в третьих, аэродинамические потери в системе охлаждения не должны превышать более, чем на 40% соответствующие потери в случае отсутствия специального охлаждения горелочных устройств.

При анализе эффективности систем охлаждения горелочных устройств изучению подлежали особенности течения природного газа в собственно

В данной работе приводятся результаты исследований для горелочного устройства струйно-стабилизаторного типа применительно к котлу

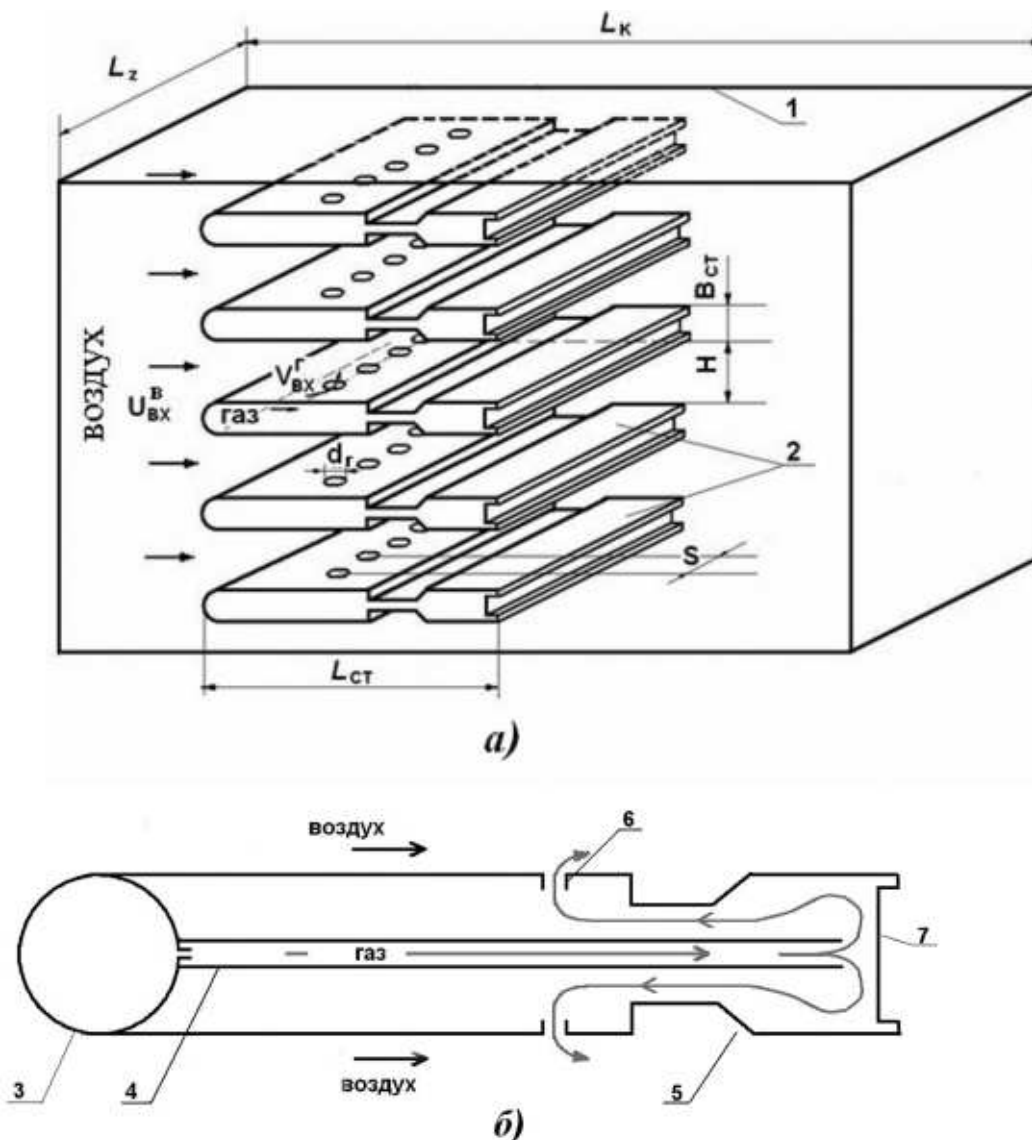


Рис. 1. Схема горелочного устройства струйно-стабилизаторного типа (а) и системы охлаждения пилона (б):

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

системе охлаждения, закономерности его теплообмена со стенками пилона и характеристики теплового состояния пилона. Определялись также уровни аэродинамических потерь по тракту охладителя, уровни нагрева газа в системе охлаждения и пр.

Решение задачи переноса для горелочных устройств, оснащенных предлагаемыми системами охлаждения, осуществлялось методом математического моделирования на основе программного комплекса FLUENT. При этом использовалась методика поэтапного моделирования, применение которой позволило существенно повысить эффективность реализации численного решения задачи [1].

ДКВР-2,5. На рис. 2 представлено продольное сечение пилона для рассматриваемой системы охлаждения с плоской струей. Поставленная задача решалась 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  $t_{\text{г}}^{\text{вх}} = 15^\circ\text{C}$ ; температура воздуха на входе в горелочное устройство  $t_{\text{в}}^{\text{вх}} = 20^\circ\text{C}$ ; материал стенки пилона – сталь 12X18H9T; коэффициент загромождения проходного сечения канала  $k_f = 0,3$ ; диаметр газоподающих отверстий  $d_{\text{г}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; относительный шаг расположения отверстий  $S/d_{\text{г}} = 3,33$ .

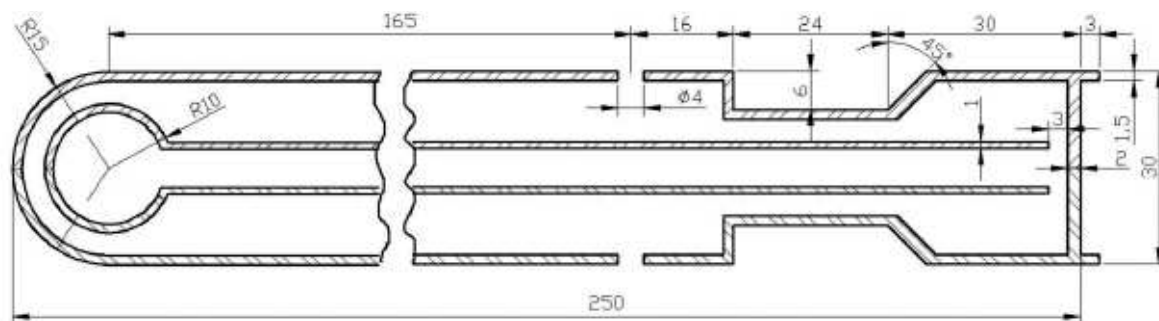


Рис. 2. Продольное сечение пилона для системы охлаждения с обдувом торца пилона плоской импактной струей

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

### Изложение основного материала исследований

Характерные результаты выполненных исследований, касающиеся определения эффективности систем охлаждения с обдувом внутренней поверхности пилона плоской и круглыми импактными струями, представлены на рис. 3–6.

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. 3, а; 4, а; 5, а.

Картину течения охлаждающего газа во внутренней полости пилона иллюстрирует рис. 3, а. Как видно, поток газа из плоского канала, ударяясь о торцевую поверхность пилона, растекается вдоль нее и далее, обтекая нишу, поступает в газоподводящие отверстия. При этом в приторцевой зоне пилона 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 пилона. Течение охлаждающего газа характеризуется также наличием второго крупного вихря вблизи передней стенки ниши и, кроме того, ряда мелких вихрей в угловых зонах пилона.

Рассмотренные особенности течения природного газа в системе охлаждения во многом определя-

ют поведение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\text{вн}}$  на внутренней поверхности пилона (см. рис. 4, а). Как следует из сопоставления данных, приведенных на рис. 3, а и 4, а, экстремумы на кривой  $\alpha_{\text{вн}} = f(\gamma)$  отвечают соответственно зонам отрыва, присоединения потока, угловым вихревым зонам и т.д.

Что касается уровня величины  $\alpha_{\text{вн}}$ , то в зоне удара плоской струи о торцевую поверхность пилона она достигает максимального значения, равного примерно 370 Вт/(м<sup>2</sup>К). По мере же растекания струи вдоль данной поверхности величина  $\alpha_{\text{вн}}$  уменьшается и далее, как уже отмечалось, следует описанным выше особенностям течения охлаждающего газа.

Отмеченные закономерности изменения  $\alpha_{\text{вн}}$  в большой мере обуславливают характер распределения температуры стенок пилона. На рис. 5, а в качестве примера представлено соответствующее поле температур в продольном сечении пилона. Согласно полученным данным минимальное значение температуры торцевой стенки пилона имеет место в области удара струи об ее поверхность и составляет 328°С. По мере удаления от этой области температура возрастает, достигая наибольшего значения, равного 395°С на срывной кромке пилона. Далее с удалением от торца пилона вдоль его боковой стенки усматривается в целом тенденция к снижению температуры, так что на передней стенке нишевой полости она оказывается равной 226°С.

Согласно данным компьютерного моделирования температура газа на выходе из системы охлаждения составляет 80°С, 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 пилона относительно невелико и составляет примерно 27%.

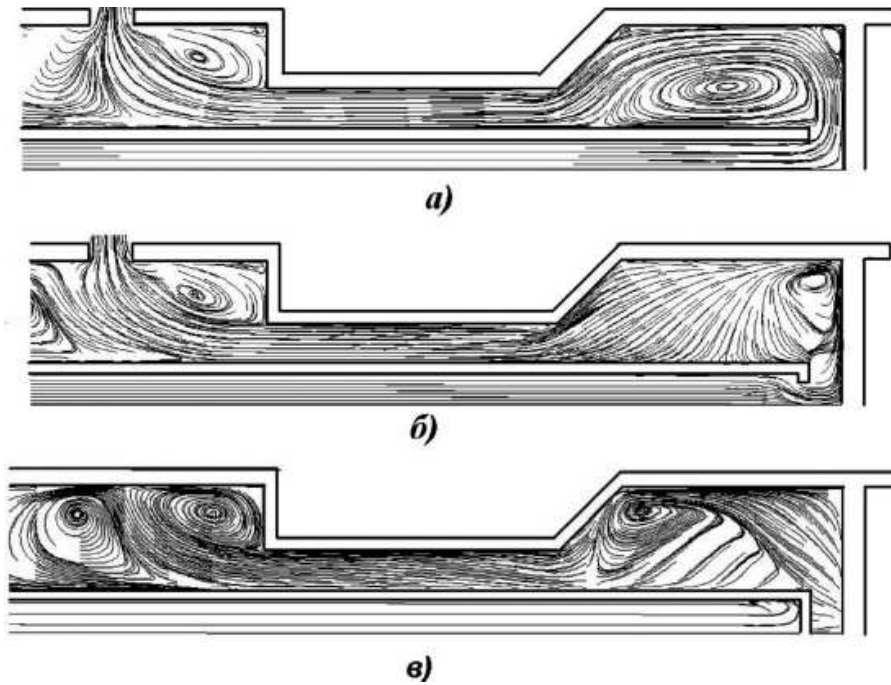


Рис. 3. Картина линий тока охлаждающего агента в продольном сечении, проходящем через ось газоподающего отверстия (а), (б) и через середину межструйного пространства (е) для схемы охлаждения с плоской струей (а) и системой круглых струй (б), (е)

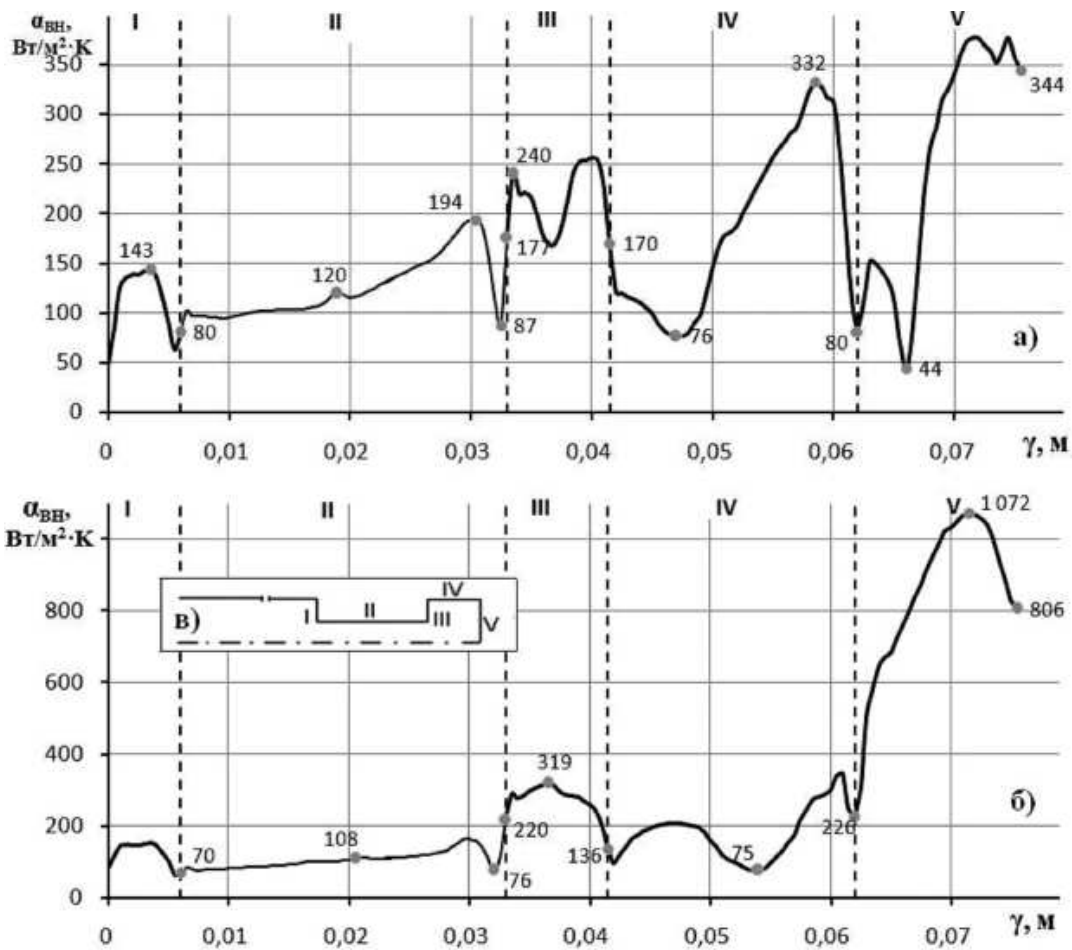


Рис. 4. Коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности пилона в продольном сечении, проходящем через ось газоподающего отверстия, для системы охлаждения с обдувом торца пилона плоской (а) и круглыми импактными струями (б); расположение характерных зон (е)

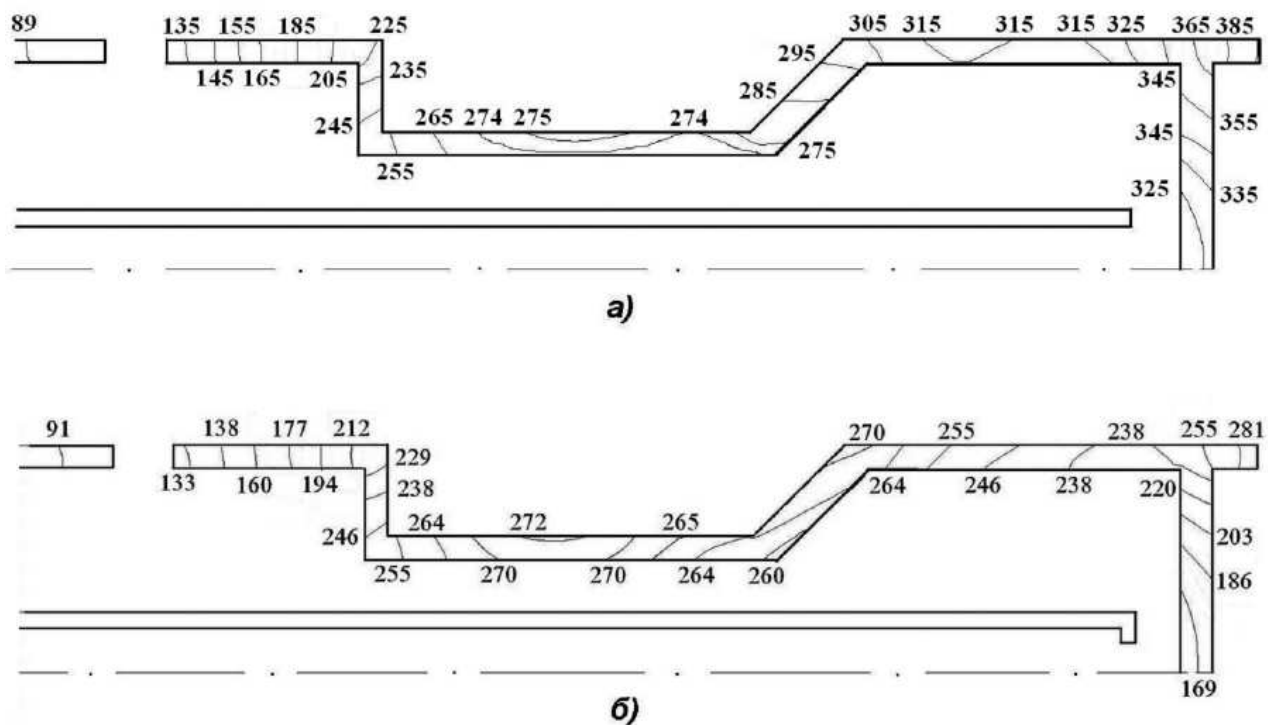


Рис. 5. Поле температур в продольном сечении пилона, проходящем через ось газоподающего отверстия, для схем охлаждения с обдувом торца пилона плоской (а) и системой круглых струй (б)

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 пилонных, так и нагрева охлаждающего газа при сравнительно небольшом возрастании потерь давления, обусловленном наличием данной системы.

В целях обеспечения высокоэффективного охлаждения торцевой стенки пилона рассматривалась также система охлаждения с применением круглых импактных струй. Соответствующие характерные результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 3, б, в; 4, б; 5, б и 6. Как видно из рис. 3, б, в, картины течения в приторцевой зоне пилона 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 пилона в случае плоской струи (первая из анализируемых ситуаций) оказываются существенно ниже, чем при наличии круглых импактных струй (вторая ситуация). Так в рассматриваемых условиях для первой и второй ситуации указанные величины  $V_{\max}$  равны 20,6 и 85 м/с. Соответственно

этому может иметь место и существенное различие тепловых состояний стенок пилона для сопоставляемых систем охлаждения (рис. 5, а, б). Например, согласно полученным данным в центре торцевой зоны пилона температура его наружной поверхности составляет 175 и 328 °С для случая круглых и плоской импактных струй. Следует также отме-

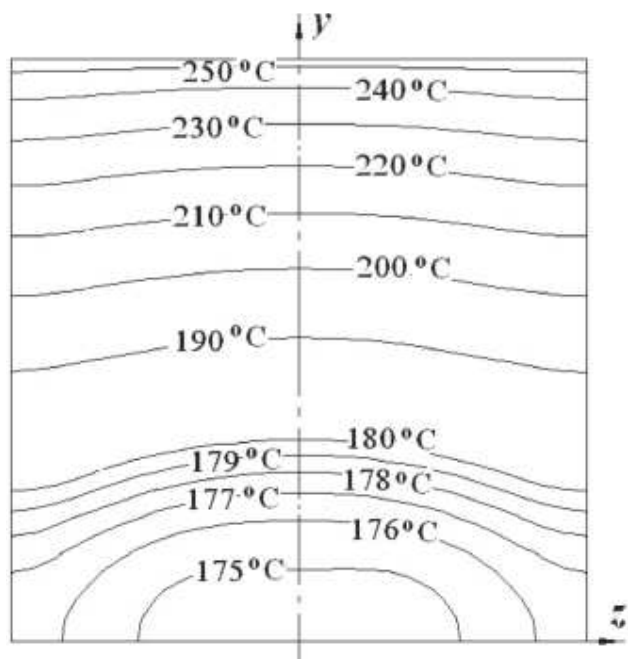


Рис. 6. Поле температур наружной поверхности торца пилона для схемы охлаждения с обдувом системой круглых струй

туть, что, как видно из рис. 5, различия температур стенок пилона 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°C для первой из рассматриваемых ситуаций и 264 и 251°C — для второй. Данное обстоятельство является следствием проявления эффекта пространственной локализации влияния специфики струйной подачи газа в приторцевой зоне пилона.

Рис. 6 иллюстрирует поле температур наружной поверхности торцевой стенки пилона для системы охлаждения с круглыми импактными струями. Как видно, в области удара струи о торцевую стенку температурное поле является существенно двумерным. По мере же удаления от этой области наблюдается вырождение размерности поля температур, так что, начиная с некоторого значения  $y$ , изменение температуры вдоль координаты  $z$  оказывается незначительным.

Описанные выше особенности течения охлаждающего газа в случае круглых струй определяют закономерности изменения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\text{вн}}$  вдоль внутренней поверхности пилона (рис. 4, б). Максимальные значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\text{вн}}^{\text{max}}$  имеют место в области удара струи о торцевую поверхность пилона, причем здесь эти значения весьма велики и достигают 1072 Вт/(м<sup>2</sup>К). С удалением же от места удара струи наблюдается достаточно резкое снижение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\text{вн}}$ . Так, в угловой приторцевой зоне величина  $\alpha_{\text{вн}}$  составляет 220 Вт/(м<sup>2</sup>К), т.е. уменьшается примерно в 5 раз.

Отмеченные закономерности изменения  $\alpha_{\text{вн}}$ , отвечающие круглым импактным струям, существенно отличаются от ситуации применения плоской импактной струи. Эти отличия наиболее ярко выражены для приторцевой зоны пилона (сопоставьте данные на рис. 4, а, б). В области удара струи о торцевую поверхность значения  $\alpha_{\text{вн}}^{\text{max}}$  равны 1072 и 370 Вт/(м<sup>2</sup>К) соответственно для круглых и плоской струй. То есть в случае плоской струи интенсивность теплоотдачи в данной области оказывается меньше в 2,9 раза.

Следствием повышения интенсивности теплоотдачи в условиях круглых струй является более высокий уровень нагрева газа в системе охлажде-

ния. Так, согласно полученным данным, температуры газа на выходе из системы охлаждения составляет 91 и 80°C при использовании обдува торцевой поверхности пилона 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  $\Delta P_{\Sigma}$  в условиях круглых струй оказывается существенно выше. Так, здесь  $\Delta P_{\Sigma}$  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 пилона, 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 пилонов 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 пилона, однако она характеризуется значительно большими потерями давления по тракту охладителя.

### Литература

1. Фялко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В. и др. Компьютерное моделирование процессов переноса в системах охлаждения горелочных устройств стабилизаторного типа // Промышленная теплотехника. — 2012. — №1. — С. 64–71.
2. Фялко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В. та ін. Системи охолодження пальникових пристроїв струменево-нішевого типу // Мат. XX міжнародної конференції "Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики", 8–12 червня 2010 р., Ялта. — Київ: ИПЦ АЛКОН, 2010. — С.192–194.
3. Дыбан Е.П., Мазур А.И. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел. — Киев: Наукова думка, 1982. — 303 с.