

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБЧАТЫХ ПЕЧЕЙ С ВЕЕРНЫМИ И АКУСТИЧЕСКИМИ ГОРЕЛКАМИ НАСТИЛЬНОГО ПЛАМЕНИ

Д.Б. ВАФИН, М.А. БУТЯКОВ, Д.А.САДЫКОВА

Нижекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО  
«Казанский национальный исследовательский технологический университет»

*В данной статье обсуждаются результаты численных исследований тепловых и аэродинамических параметров в топках трубчатых печей с веерными и акустическими газовыми горелками настильного пламени в рамках дифференциального метода теплового расчета топков. Процессы, протекающие в камере радиации, описываются двухмерными уравнениями энергии, переноса лучистой энергии, движения продуктов сгорания,  $k-\epsilon$  модели турбулентности и двухступенчатой модели горения метана. Задача переноса лучистой энергии в объеме топки решается использованием  $S_2$ -приближения метода дискретных ординат. Показаны особенности поля температур, поля течения топочных газов в радиантной камере технологической печи и характеры распределения поверхностных плотностей тепловых потоков к реакционным трубам при использовании горелок разных типов.*

*Ключевые слова: печь трубчатая, горелочные устройства, тепловое излучение, тепломассобмен.*

Выход целевых продуктов требуемого состава, получаемых в технологических печах нефтехимических производств с кратковременным пребыванием исходного сырья в трубчатых реакторах, получается при обеспечении заданного распределения тепловых потоков вдоль труб. Для поддержания необходимой теплонапряженности труб используются беспламенные панельные горелки или горелки настильного пламени, расположенные на боковых стенках радиантной камеры печи. С целью предсказания характера распределения радиационных тепловых потоков (более 90 % теплоты трубчатым реакторам передается за счет излучения), температуры труб и футеровки, а также изучения влияния конструктивных параметров печи и горелок на поля температуры и скоростей продуктов сгорания в объеме топки необходимо проводить натурные испытания в пилотных установках, что очень сложно сделать. Большими возможностями обладает проведение численных исследований с использованием физического и математического моделирования процессов, происходящих в топках. В работах [1-3] описан дифференциальный метод теплового расчета в топках. В работах [3, 4] данный метод использовался для моделирования тепловых режимов печей с газовыми горелками типа ГВН, а в работе [6] – с акустическими горелками.

Горелки типа ГВН и акустические горелки типа АГГ используются при сжигании газообразного топлива в технологических печах на предприятиях нефтехимической, нефтеперерабатывающей и газовой промышленности вместо панельных беспламенных горелочных устройств. Схемы расположения указанных горелок показаны на рис. 1.

В веерных горелках предварительное неполное смешение топливного газа и воздуха происходит за счет инжекции воздуха в центральном смесителе. Образовавшаяся смесь через отверстия в выходной головке распределяется по поверхности боковой стены топки, выложенной из огнеупорного кирпича (левая

половина рис.1). По кольцевому каналу между внутренними и наружными корпусами под действием разрежения в топке и эжектирующего эффекта настильного факела поступает вторичный воздух, обеспечивающий требуемый коэффициент избытка воздуха в области горения. Выходная раздаточная головка сконструирована так, что

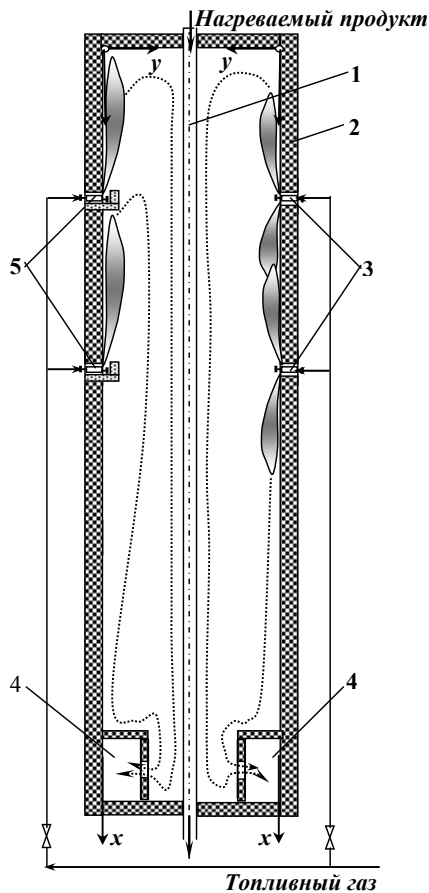


Рис. 1. Схемы расположения горелок: 1 – тручатый реактор; 2 – футеровка; 3 – акустические горелки; 4 – канал для сбора газов; 5 – веерные горелки

обеспечивает разогрев поверхности настила прямоугольной формы площадью 2–2,8 м<sup>2</sup>. Акустический резонатор, имеющийся в корпусе горелки АГГ (правая половина рис. 1), создает закрученное движение топливного газа, что приводит к возникновению двух зон разрежения. Частично дымовые газы из топки и вторичный воздух из периферии корпуса горелки подсасываются к корню факела за счет создаваемого горелками разрежения и тяги в топке. Образовавшаяся смесь газового топлива, воздуха и горячих продуктов сгорания направляется на раскаленные поверхности футеровки топки, равномерно распределяется по их поверхности и сгорает в режиме слабо светящегося пламени.

Решение задачи сложного тепло- и массообмена проводится для одной половины камеры радиации печи в двухмерной постановке. Обоснование такого подхода имеется в работах [1–6]. Тручатый экран, расположенный посередине топки, рассматривается как сплошная поверхность, воспринимающая лучистые потоки от продуктов сгорания и раскаленных стен топки. Эффективная поглощательная  $a_{\text{эф}}$  и отражательная  $r_{\text{эф}}$  способность такого тручатого экрана определяются по формулам [7]:

$$a_{\text{эф}} = \frac{\varphi_{\text{пэ}}(2-\varphi_{\text{пэ}})\varepsilon}{\varepsilon+n\varphi_{\text{пэ}}(2-\varphi_{\text{пэ}})r}; \quad r_{\text{эф}} = 1 - a_{\text{эф}}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$ ,  $r$  – поглощательная и отражательная способности наружной стенки труб;  $\varphi_{\text{пэ}}$  – угловой коэффициент, который зависит от расстояния между трубами экрана  $S_3$  и от их внешнего диаметра  $d$ :

$$\varphi_{\text{пэ}} = 1 + \frac{d}{S_3} \arctg \sqrt{\left(\frac{S_3}{d}\right)^2 - 1} - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{S_3}\right)^2},$$

$$n = \frac{S_3}{\pi d}.$$

Направления осей системы координат для половины радиантной камеры печи и вид изотерм, полученных расчетным путем в ходе решения задачи, когда настилающиеся факелы веерных горелок направлены вверх, показаны на рис. 2, а, а для печи с акустическими горелками – на рис. 2, б. Размер камеры радиации вдоль оси  $x$  на рис. 2, а показан в уменьшенном в 3,5 раза масштабе по сравнению с шириной секции. На рис. 2, б показана только верхняя часть радиантной камеры в области расположения ярусов акустических горелок. (Ось  $x$  на самом деле направлена вниз).

Процессы сопряженного теплообмена и горения смеси газа и воздуха в камере радиации печи моделируются стационарными уравнениями сохранения энергии, переноса лучистой энергии, уравнениями неразрывности, движения топочных газов,  $k-\varepsilon$  модели турбулентности и двухступенчатой модели горения метана в среде

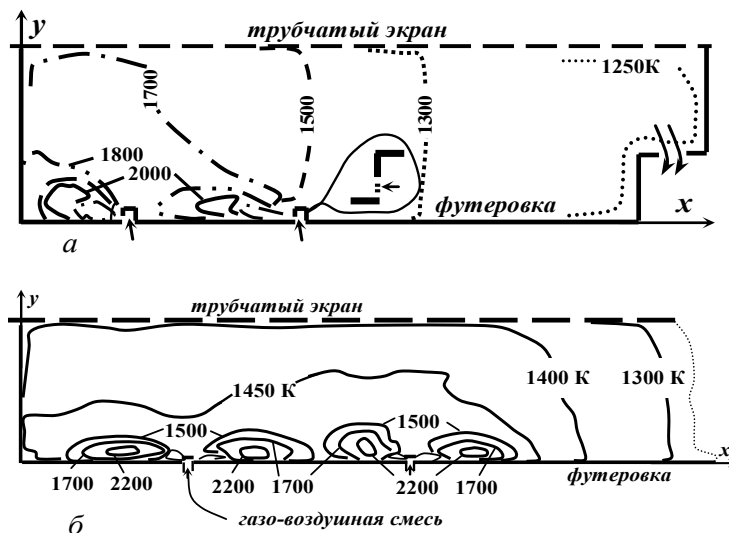


Рис. 2. Формы изотерм в камере радиации при веерных (а) и акустических (б) горелках

атмосферного воздуха в двумерной постановке задачи. Термодинамические параметры связаны уравнением состояния идеального газа.

Более подробные описания математической модели, особенности постановки граничных условий к перечисленным уравнениям, вопросы получения разностных аналогов соответствующих дифференциальных уравнений, которые описывают физические процессы, протекающие в топке, даны в работах [2-6]. Все указанные уравнения, кроме уравнений переноса энергии излучением, записываются в виде обобщенного уравнения:

$$\rho u \frac{\partial \phi}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_{\phi}; \quad S_{\phi} = S_C - S_P \phi. \quad (2)$$

Здесь  $u, v$  – составляющие вектора скорости  $v$  вдоль осей  $0x$  и  $0y$ ;  $\phi \equiv \{T, u, v, k, \varepsilon, m_{\text{CH}_4}, m_{\text{CO}}, m_{\text{ок}}, m_{\text{CO}_2}, m_{\text{H}_2\text{O}}\}$  – переменная, обобщающая соответствующие величины. В обобщенном уравнении (2) для каждой из перечисленных переменных используются свои формулы для коэффициентов переноса  $\Gamma_{\phi}$  и источниковых членов  $S_C, S_P$ .

Температуры в каждом контрольном объеме топочной камере и на узлах границ определяются в результате совместного численного решения уравнения энергии и уравнения переноса лучистой энергии.

Решение интегро-дифференциального уравнения переноса энергии радиацией проводится с использованием  $S_2$ -приближения метода дискретных ординат. Применение этого метода сводится к аппроксимации уравнения переноса излучения четырьмя дифференциальными уравнениями для интенсивности излучения  $I_m^k$  вдоль некоторого количества заранее определенных четырех направлений  $\Lambda_m \{ \Lambda_m; m =$

1,2,3,4}. Эти направления задаются набором пространственных координат  $\{\mu_m, \xi_m; m = 1,2,3,4\}$ , которые определяются как величины проекций единичного вектора  $\Lambda_m$  на направления координатных осей  $Ox$  и  $Oy$  [8]. Эти дифференциальные уравнения для интенсивности излучения  $I_m^k$  в отдельном спектральном диапазоне вдоль каждого из данных направлений  $m$  записываются в виде

$$\mu_m \frac{\partial I_m^k}{\partial x} + \xi_m \frac{\partial I_m^k}{\partial y} = \alpha_k \int_{\lambda_{k-1}}^{\lambda_k} I_{b\lambda} d\lambda - (\alpha_k + \beta_k) I_m^k + \frac{\beta_k}{4\pi} \sum_{m'=1}^{N_0} w_{m'} \phi_{m'm} I_{m'}^k, \quad (3)$$

где  $\alpha_k, \beta_k$  – осредненные линейные коэффициенты поглощения и рассеяния энергии излучением в соответствующем спектральном диапазоне  $k$ ;  $w_m$  – так называемые весовые коэффициенты [8].

Рассеяние пучка излучения, падающего на контрольный объем, частицами сажи представляется в виде упрощенной зависимости от угла рассеяния  $\theta$ :

$$\gamma(\theta) = 1 + g_1 \cos\theta,$$

где  $g_1$  – первый член разложения индикатрисы рассеяния по полиномам Лежандра [9].

Скорости продуктов сгорания в объеме топки определяются в ходе совместного численного решения разностных аналогов уравнений движения, неразрывности и модели турбулентности. Источниковые члены в уравнениях переноса компонентов топлива  $m_{CH_4}, m_{CO}$  (скорости химических реакций) определяются по модели обрыва вихрей [2]. В камере радиации в основном излучают и поглощают лучистую энергию углекислый газ  $CO_2$ , водяной пар  $H_2O$  и частицы сажи. Влияние дисперсных частиц в продуктах сгорания на результаты расчета радиационных потоков в двухфазных средах рассмотрены в работе [9]. В расчетах учитывались зависимости оптических и термодинамических свойств компонентов топочных газов от температуры. Спектральный диапазон был разделен на шесть полос разной ширины. В пределах отдельной полосы оптические свойства считались независимыми от длины волны.

На выходе из щелей для подачи топлива и воздуха, моделирующих работу горелок соответствующего типа, в камеру радиации считаются известными состав, скорость смеси и их температура. Считаются известными соответствующие величины кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации кинетической энергии на срезе горелок. На твердых границах для уравнений движения ставится условие непроницаемости и нулевых значений скорости. Для уравнений переноса компонентов смеси (модели горения) на границах области интегрирования применяется условие отсутствия потока соответствующих компонентов. На наружной стене трубчатого экрана задается распределение температуры. Считается известной температура наружной поверхности футеровки. Решая одномерное уравнение теплопроводности поперек стенки, приходим к граничному условию 3-го рода. Диффузионный поток кинетической энергии турбулентности на твердых границах топки также полагается равным нулю.

Система алгебраических уравнений, аппроксимирующих дифференциальные уравнения переноса, получается использованием метода прямоугольных контрольных объемов в рамках метода конечных разностей. Данный метод обеспечивает выполнение законов сохранения для всей области интегрирования. При аппроксимации уравнений (2) выражениями второго порядка точности узлы разностной сетки шахматного типа для определения продольной  $u$  и поперечной  $v$  составляющих скорости были сдвинуты относительно опорных узлов на полшага в обоих направлениях. Общее количество внутренних узлов разностной сетки вдоль оси  $x$  – 200, а в поперечном

направлении – 40. Около футерованной поверхности боковой стены применен более мелкий шаг сетки. Полученная система алгебраических уравнений решается итерационным способом, который более подробно описан в работе [2]. Сначала при заданном поле температуры решаются уравнения переноса излучения для каждого спектрального диапазона, затем уравнения движения, модели горения и энергии. Уточняется поле температуры и процедура повторяется до достижения заданной невязки. Для уменьшения величины «осцилляций», возникающих в первых итерациях для определения полей температуры и скоростей, использовали нижнюю релаксацию и линеаризацию источниковых членов уравнений.

Изучение особенностей сопряженного тепломассообмена и аэродинамики продуктов сгорания при предполагаемом использовании горелочных устройств настильного пламени двух типов сделано на примере технологической печи водяной конверсии метана в среде водяного пара. Топка печи состоит из двух радиационных камер, симметрично расположенных относительно однорядного трубчатого экрана. Трубы, заполненные катализатором, в количестве 28 штук, в змеевике расположены вертикально, их диаметр 134×12мм, шаг между ними 300 мм. Высота топки 10 м, ширина одной половины камеры радиации 1,5 м. В численных исследованиях были рассмотрены разные возможные варианты направления пламени веерных горелок. Были также сделаны расчеты в предположении, когда вместо горелок настильного пламени, расположенных на боковых стенках камеры, на своде в один ряд по глубине камеры установлены инжекционные горелки такой же общей мощности.

Объемный расход газа (метана), приведенный к нормальным условиям, на половину секции составлял  $V_T=0,198 \text{ м}^3/\text{с}$ , низшая теплота сгорания топлива  $Q_H^P=35,88 \text{ МДж/м}^3$ . Более подробное описание исходных данных имеется в работах [4 – 6].

Приняты следующие упрощения при моделировании работы веерных горелок настильного пламени: считается, что часть смеси метана и первичного воздуха поступает в топку в продольном направлении через узкую щель, параллельную футеровке боковой стенки, со скоростью 16,2 м/с, вторичный воздух со скоростью 2,2 м/с поступает через две щели, расположенные с двух сторон относительно щели для первичной смеси. На рис. 2, а в укрупненном виде показана схема подачи топлива и воздуха в радиантную камеру печи при использовании веерных горелок. Моделирование работы акустических горелок производится таким образом: перемешанный с первичным воздухом газ поступает на горение в топку через две узкие щели параллельно боковым футерованным стенкам в противоположных направлениях, а вторичный воздух поступает по четырем щелям, расположенным с двух сторон от щелей первичной смеси.

На рис. 3 показаны линии тока  $\psi$  в одной половине объема камеры радиации, когда настилающиеся факелы веерных горелок направлены вверх (левая половина) и при работе акустических горелок (правая половина). Область течения разделяется на зоны прямого и обратного течений. Зоны прямого тока расположены в непосредственной близости от футерованной стены, и там наблюдаются относительно большие значения скорости движения и температуры дымовых газов. Определенную часть камеры радиации занимают зоны обратного тока.

Когда факелы веерных горелок направлены вниз, зона обратного тока занимает верхнюю часть топки и входная область труб реактора омывается газами с относительно низкой температурой. Как видно из рис. 4, это приводит к уменьшению тепловых потоков к реакционным трубам на начальном участке. При направлении факелов вверх зоны обратного тока возникают ближе к ярусам горелок, а трубчатые

реакторы омываются высокотемпературными потоками продуктов сгорания. Таким образом, при использовании веерных горелок характер омывания трубчатого экрана продуктами сгорания существенно зависит от направления факелов вдоль футерованной стенки. Кроме того, проведенные нами численные исследования показали, что поля температуры и скоростей в топочном объеме, и соответственно распределения лучистых потоков вдоль труб, сильно зависят и от уровня высоты расположения ярусов веерных горелок [10].

В случае применения акустических горелок поле течения состоит из трех зон прямого течения, разделенных зонами обратного тока. Продукты сгорания первого яруса горелок формируют первую зону прямого течения, направленного к своду печи. Соответствующие линии тока идут вдоль верхней части футеровки боковой стены, свода и, направляясь вдоль трубчатого экрана, доходят до туннеля сбора дымовых газов в нижней части печи. Температура продуктов сгорания этого слоя монотонно изменяется от 1500К у свода до 1220К на перевале. Части продуктов сгорания горелок первого и второго ярусов формируют на уровне второго яруса горелок вторую зону прямого тока, которая затем образует общий поток с дымовыми газами первой зоны. Часть продуктов сгорания горелок второго яруса, направленная вниз, формирует третью зону прямого тока, которая располагается у боковой стенки печи ниже второго яруса, обогревая футеровку.

При использовании акустических горелок зоны обратного тока занимают небольшую часть объема камеры радиации чуть выше места расположения ярусов горелок. Зоны обратного тока имеют более низкую температуру, чем области прямого течения, порядка 1400К. Это объясняется тем, что, с одной стороны, зона обратного тока охлаждается реакционными трубами и, с другой стороны, она значительно удалена от ярусов горелок. К устью горелок из зон обратных токов подсасываются продукты сгорания, способствующие устойчивости горения смеси топливного газа и воздуха.

При использовании инжекционных горелок, расположенных на своде камеры, в графике изменения распределения поверхностных плотностей тепловых потоков вдоль труб экрана имеется заметный максимум в районе горения смеси газа и воздуха (рис.4). Затем теплонапряженность труб достаточно быстро убывает вниз по течению. Когда применяются веерные горелки с настилающимся вверх пламенем, распределение лучистых потоков монотонно уменьшается по всей длине трубчатого экрана. В то же

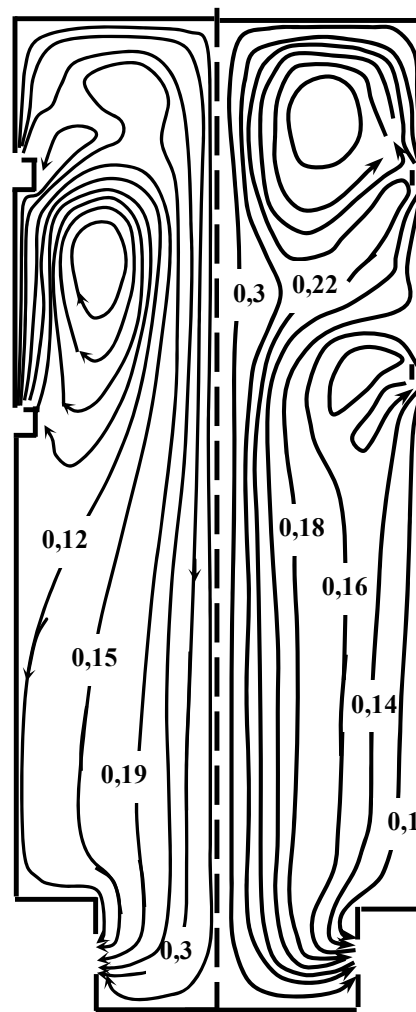


Рис. 3. Вид линий функций тока  $\psi$  в топке с веерными и акустическими горелками

время распределения поверхностных плотностей тепловых потоков вдоль труб для этих двух случаев отя примерно одинаковыми.

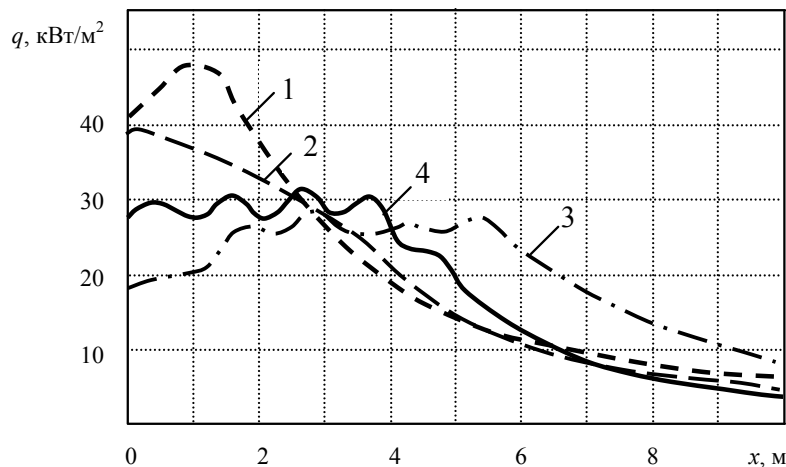


Рис. 4. Распределения поверхностных плотностей тепловых потоков по длине трубчатого экрана: 1— инъекционные горелки, расположенные на своде; 2— верные горелки, поток направлен вверх; 3— верные горелки, поток направлен вниз; 4— акустические горелки

Когда используются верные горелки с направлением факелов вверх, достаточно большая зона обратного тока возникает между двумя ярусами горелок, и небольшая зона образуется под нижним ярусом горелок (рис.3, а). Это приводит к тому, что вдоль всей высоты трубчатого экрана располагается область прямых токов, сформированных высокотемпературными продуктами сгорания факелов горелок обоих. В наших работах [10–15] было показано, что поле температуры в топках технологических печей главным образом формируется за счет влияния переноса энергии излучением. На рис. 2, а видно, что в этом случае верхняя часть камеры печи около свода и вдоль труб омывается топочными газами высокой температуры. Когда инъекционные горелки расположены в один ряд на своде, его поверхность омывается дымовыми газами с более низкой температурой из зоны обратных токов. Возникают определенные отличия в распределениях поверхностных плотностей как лучистых, так и конвективных тепловых потоков между этими режимами организации сжигания топлива. При направлении факелов вверх, из-за более высоких значений температуры и скорости топочных газов вдоль труб экрана, несколько увеличиваются конвективные тепловые потоки к трубам. В результате доля лучистой составляющей в суммарном тепловом балансе экрана уменьшается до 91 %. Когда факелы верных горелок направлены вниз и при использовании акустических горелок, доля конвективных тепловых потоков к экрану не превышает 3 и 5%.

Когда используются горелки настильного сжигания топлива, потоки излучения к экрану идут как от высокотемпературных продуктов сгорания, так и от раскаленных стен топки. Распределения плотностей тепловых потоков вдоль труб экрана при направлении факелов вниз и при использовании акустических горелок значительно отличаются от соответствующих распределений для двух первых вариантов (рис. 4). Получаются более низкие значения плотностей тепловых потоков в верхней части камеры с постепенным увеличением их в середине камеры. В распределениях наблюдаются небольшие колебания, что объясняется двухъярусным расположением горелок и наличием максимумов в поле температуры. При расположении настильных

горелок ближе к своду все три варианта сжигания топлива обеспечивают практически одинаковую суммарную теплоотдачу.

В работе показана возможность расчета внешнего теплообмена в трубчатых печах с газовыми горелками настильного пламени в рамках дифференциального метода расчета топок. Оптимальным, с точки зрения наибольшей теплоотдачи, является направление настилающихся факелов веерных горелок вверх и расположение ярусов горелок вблизи свода камеры радиации. В то же время, при направлении факелов вниз и при использовании акустических горелок получается более равномерное распределение тепловых потоков по длине труб. При использовании горелок с настилающимися факелами потери тепла через боковые стенки труб составляют до 3%, что несколько выше, чем при расположении горелок на своде.

### Summary

*The paper presents the results of thermal and aerodynamic calculations in radiation chamber tubular furnaces with gas fan and acoustic burners grazing flame within the differential method for thermal calculating furnaces. Processes in the radiation chamber are described by two-dimensional energy equation, of radiative transfer, movement of the combustion products,  $k-\epsilon$  of model of turbulence and model of methane combustion in two stages. The problem of radiative transfer in the volume of the furnace is solved using  $S_2$  approximation method of discrete ordinates. The features of the temperature field, flow field of flue gases in the furnace radiant chamber technology and the distribution of surface heat flux density to the reaction tubes using different types of burners.*

**Keywords:** tubular furnace, burners, thermal radiation, heat and mass transfer.

### Литература

1. Абдуллин А.М., Вафин Д.Б. Численное моделирование локального теплообмена в топках трубчатых печей на основе дифференциальных приближений для лучистого переноса тепла // ИФЖ. 1991. Т.60. №2. С.291-297.
2. Вафин Д.Б. Радиационный теплообмен в энергетических установках / Сложный теплообмен. Saarbrücken: LAP. 2011. 252 p.
3. Вафин Д.Б. Тепловой расчет топок с многоярусным расположением настилающих горелок// Известия высших учебных заведений: Известия вузов. Проблемы энергетики. 2009. №1-2. С. 53 – 60.
4. Вафин Д.Б., Садыков А.В., Садыкова Д.А. Моделирование работы веерных горелок настильного пламени в трубчатых печах дифференциальным методом // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т.15, №18. С. 74 – 78.
5. Вафин Д.Б., Садыкова Д.А. Применение дифференциального метода теплового расчета для трубчатых печей с веерными горелками настильного пламени // Фундаментальные исследования. 2013. № 6. С. 13 –18.
6. Вафин Д.Б., Садыков А.В., Садыкова Д.А. Тепловой расчет трубчатых печей с акустическими горелками // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 11-12. С. 27 –32.
7. Гориславец С.П. Пиролиз углеводородного сырья. Киев: Наукова думка, 1977. 305 с.
8. W.A. Fiveland W.A. Discrete – ordinate solutions of the radiation transport equation for rectangular enclosures // Trans. ASME: J. Heat Transfer. 1984. v.106. №4/-P/699 – 706.
9. Вафин Д.Б. Зависимость излучения двухфазных потоков в соплах от неравномерного распределения размеров и концентрации частиц // Вестник Казанского технического университета им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ). 2009. №2. С.5–9.
10. Вафин Д.Б., Садыков А.В., Садыкова Д.А. Влияние расположения веерных горелок на тепловые характеристики трубчатых печей //Вестник Казанского технологического университета. 2013.Т.16. №12. С. 71 – 74.



11. Вафин Д.Б., Абдуллин А.М.. Сложный теплообмен в технологических печах нефтехимической промышленности // Вестник Казанского технологического университета. 2009. №1. С. 90 – 96.

12. Вафин Д.Б., А.В.Садыков А.В., Д.А. Садыкова Д.А.. Трехмерные расчеты аэродинамики и тепловых характеристик цилиндрических трубчатых печей // Научно технический вестник Поволжья. 2012. №1. С. 144 – 149.

13. Вафин Д.Б., Садыков А.В., Емекеев В.И.. Роль излучения в технологических печах нефтехимической промышленности // Вестник Казанского технологического университета. 2011. Т.14. №5. С. 16 – 21.

14. Садыков А.В., Вафин Д.Б.. Неравномерности обогрева реакционных труб и распределений температуры продуктов сгорания по глубине технологической трубчатой печи // Тепловые процессы в технике. 2014. №8. С. 349 – 355.

15. Вафин Д.Б., Садыкова Д.А. Применение дифференциального метода теплового расчета для трубчатых печей с акустическими горелкам // Фундаментальные исследования. 2014. №9. С. 2375 – 2380.

*Поступила в редакцию*

*29 апреля 2015 г.*

**Вафин Данил Биалович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Физика» Нижнекамского химико–технологического института (филиал) «Казанский национальный исследовательский технологический университет» НХТИ (КНИТУ). E-mail: vafdaniil@yandex.ru.

**Бутяков Марат Анатольевич** – аспирант кафедры «Физика» Нижнекамского химико–технологического института (филиал) «Казанский национальный исследовательский технологический университет» НХТИ (КНИТУ). E-mail: butyakov\_marat@mail.ru;

**Садыкова Дильбар Айдаровна** – аспирантка кафедры «Физика» Нижнекамского химико–технологического института (филиал) «Казанский национальный исследовательский технологический университет» НХТИ (КНИТУ). E-mail: dilbar\_sad@mail.ru.