

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 536.3.535.34

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБЧАТЫХ ПЕЧЕЙ С ИНЖЕКЦИОННЫМИ И АКУСТИЧЕСКИМИ ГОРЕЛКАМИ

Д.Б. ВАФИН., А.В. САДЫКОВ., М.А. БУТЯКОВ

Нижнекамский химико–технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО
«Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Показываются сравнительные тепловые и аэродинамические характеристики технологических трубчатых печей с инжекционными горелками, расположенными на своде камеры радиации и с акустическими горелками настильного пламени, расположенными в один ярус на боковой стене. Приведены изотермы в объеме камеры радиации, вид линий функции тока, распределение мольных концентраций излучающих компонентов продуктов сгорания и графики изменения поверхностных плотностей тепловых потоков по длине реакционных труб. Результаты получены численным решением системы двухмерных уравнений переноса излучения в S_2 -приближении метода дискретных ординат, энергии, турбулентного движения продуктов сгорания, $k - \varepsilon$ модели турбулентности и простой модели горения газообразного топлива.

Ключевые слова: трубчатая печь, горелки, горение, теплообмен, излучение, турбулентность.

Трубчатые печи являются основным оборудованием многих установок нефтеперерабатывающей, нефтехимической, коксохимической и других отраслей промышленности. Трубчатая печь предназначена для передачи нагреваемому продукту тепла, выделяющегося при сжигании жидкого или газообразного топлива в камере радиации печи. Существуют различные конструкции трубчатых печей, отличающиеся способом передачи тепла, количеством и формой топочных камер, числом секций в зоне лучистого теплообмена, относительным расположением факелов и реакционных труб, типом облучения труб и т.д.

Для сооружения и ввода в эксплуатацию новых печей и обеспечения надежности работы действующих установок необходимо знать влияние способов организации горения топлива на поле температуры в объеме топки, на температуру футеровки и труб, а также на распределение тепловых потоков вдоль реакционных труб.

В данной работе приводятся некоторые результаты численных исследований по установлению особенностей формирования поля температуры продуктов сгорания газообразного топлива в камере радиации и других характеристик трубчатой печи коробчатого типа с двухсторонним обогревом реакционных труб, расположенных

© Д.Б. Вафин, А.В. Садыков, М.А. Бутяков
Проблемы энергетики, 2015, № 1-2

вертикально посередине топочной камеры, при возможном использовании горелок двух типов. На рис. 1 показано упрощенное вертикальное сечение камеры радиации трубчатой печи. Левая половина представляет схему печи с инжекционными горелками, расположенными на своде печи. Такие горелки обеспечивают сгорание газа, перемешанного с воздухом, в объеме топки с образованием слабо светящегося пламени. Правая половина соответствует схеме печи с акустическими горелками, расположенными в один ярус на боковой стене камеры радиации. Выходящая из горелки смесь газа и воздуха направляется на раскаленные стены камеры радиации в виде кругов, распределяется по их поверхности и сгорает в режиме беспламенного горения, создавая температурное поле на излучающих стенах топки. На самом деле применяются печи только с однотипными горелками.

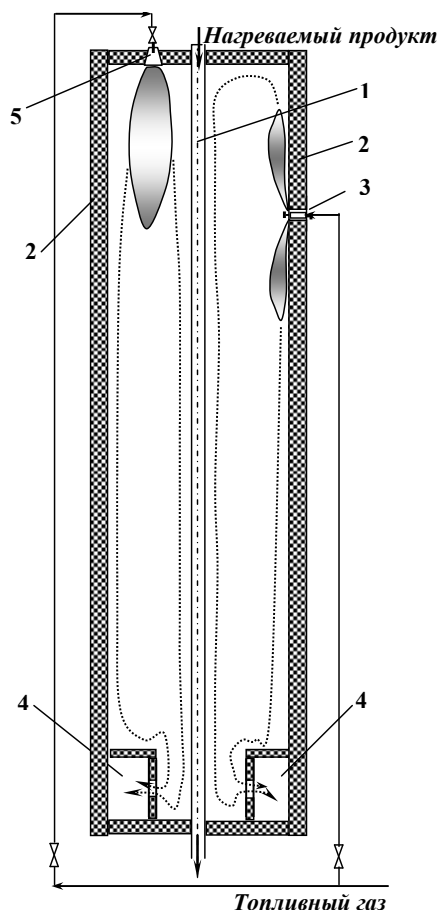


Рис. 1. Камера радиации трубчатой печи:
1) трубчатый экран; 2) футеровка;
3) акустические горелки; 4) переход в конвекционную часть; 5) инжекционные горелки

Рассматриваемые в данной работе трубчатые печи характеризуются малой шириной радиационной камеры, по сравнению с ее длиной и высотой, симметричным расположением трубчатого экрана и ряда горелок. В этом случае изменение параметров потока по длине намного меньше, чем по ее ширине и высоте. Поэтому задачу теплообмена и газовой динамики продуктов сгорания можно рассматривать в двухмерной постановке. Малый диаметр труб реакционного змеевика, по сравнению с размерами камеры радиации, и малый шаг между ними позволяет рассматривать трубчатый экран как твердую стенку, воспринимающую лучистые и конвективные тепловые потоки, что также упрощает решение газодинамической задачи.

Разработанный нами дифференциальный метод расчета внешнего теплообмена в трубчатых печах [1-5] здесь используется для моделирования печей с газовыми инжекционными горелками объемного пламени и акустическими горелками настильного пламени. В работе [5] было показано применение данного метода для теплового расчета топков с веерными горелками, а в работе [6] – с акустическими горелками настильного сжигания топлива.

Поле температуры получается в результате решения двухмерного дифференциального уравнения сохранения энергии:

$$\rho c_{pH} \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c_{pV} \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial y}) + (q_v - \text{div} q_p). \quad (1)$$

Для вычисления дивергенции лучистых потоков $\text{div} q_p$ в разных местах объема топки решается интегро-дифференциальное уравнение переноса лучистой энергии:

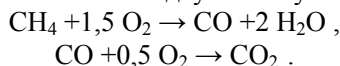
$$\Delta \nabla I_\lambda(M, \Lambda) + k_\lambda(M) I_\lambda(M, \Lambda) = \alpha_\lambda(M) I_{b\lambda}(T) + \frac{\beta_\lambda(M)}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(M, \Lambda') \gamma_\lambda(\Lambda, \Lambda') \Lambda' d\Omega. \quad (2)$$

Компоненты осредненных скоростей продуктов сгорания по высоте u и поперек потока v получаются в результате решения уравнений турбулентного движения, $k - \epsilon$ модели турбулентности, уравнения неразрывности, а объемная плотность тепла в уравнении (1) q_v – путем решения уравнений модели горения. Последние уравнения, а также уравнение (1) можно представить в обобщенном виде:

$$\rho u \frac{\partial \phi}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi; \quad S_\phi = S_c - S_p \phi. \quad (3)$$

В уравнениях (1) – (3): $I_\lambda(M, \Lambda)$ – спектральная интенсивность излучения в точке M в направлении Λ ; $I_{b\lambda}(T)$ – спектральная интенсивность излучения черного тела при температуре T ; $k_\lambda(M) = \alpha_\lambda + \beta_\lambda$ – спектральный коэффициент ослабления; $\alpha_\lambda(M)$, $\beta_\lambda(M)$ – спектральные коэффициенты поглощения и рассеяния; $\gamma_\lambda(\Lambda, \Lambda')$ – индикатриса рассеяния; u, v – компоненты скорости продуктов сгорания вдоль вертикальной оси x и поперечной – y ; c_p – изобарная теплоемкость; $\lambda_{эф} = \lambda + \lambda_r$ – коэффициент эффективной теплопроводности; ρ – плотность; $\mu_{эф} = \mu + \mu_r$ – эффективная вязкость; $\phi \equiv \{T, u, v, k, \epsilon, m_{CH_4}, m_{CO}, m_{ок}\}$; k, ϵ – кинетическая энергии турбулентных пульсаций и скорость ее диссипации; S_ϕ – источниковый член; $\Gamma_\phi = \mu + \mu_r/\sigma_\phi$ – коэффициент переноса; $m_{CH_4}, m_{CO}, m_{ок}$ – массовые концентрации CH_4, CO и окислителя (воздуха). Для каждой из перечисленных переменных в (3) свои соответствующие выражения для коэффициентов переноса Γ_ϕ и источниковых членов S_c, S_p , причем $S_p \geq 0$.

Подробное описание и обоснование дифференциального метода расчета топок приводится в работах [2, 3]. Для вычисления коэффициентов поглощения газов необходимо знать распределение мольных долей H_2O, CO_2 и CO в объеме топочной камеры. Для их определения использовали двухшаговую модель горения метана:



Таким образом, модель горения включает три уравнения типа (3) для $m_{CH_4}, m_{CO}, m_{ок}$. При этом скорости реакций определяются по модели распада вихрей.

Расчеты внешнего теплообмена и аэродинамики топочных газов при использовании инжекционных и акустических горелок выполнены на примере трубчатой печи двухстороннего обогрева реакционных труб. Камера радиации указанной печи состоит из двух секций, расположенных симметрично относительно однорядного трубчатого змеевика с вертикальным расположением труб. Количество труб в змеевике 28, диаметр 134×12 мм, шаг между ними 300 мм, обогреваемая длина труб $L = 10$ м. Ширина одной половины камеры радиации (секции) $H = 1,5$ м. В проведенных расчетах инжекционные горелки были расположены на своде печи, акустические горелки были расположены в один ярус на расстоянии 2 м от свода.

В тестовых расчетах в качестве топливного газа использовался метан. Расход газа на половину камеры радиации составлял $B_T = 0,198 \text{ нм}^3/\text{с}$, низшая теплота сгорания $Q_H^P = 35818 \text{ кДж/нм}^3$. Температура топливной смеси на входе в горелки 323К, температура воздуха, подаваемого в горелки, в проведенных расчетах принята такой же. Коэффициент избытка воздуха $\alpha_T = 1,07$. При двухмерном моделировании работы инжекционных горелок предполагалось, что частично перемешанный с

воздухом метан подается по узкой щели шириной 0,005 м, расположенной посередине свода секции. По двум щелям шириной 0,025 м с обеих сторон центральной щели подается вторичный воздух. При моделировании работы акустических горелок предполагается, что газ на горение, частично перемешанный с воздухом, поступает в камеру радиации через две узкие щели параллельно боковым стенкам в противоположных направлениях. Еще по четырем щелям с двух сторон от газовых щелей поступает вторичный воздух.

Эффективная степень черноты трубчатого экрана принята равной $\varepsilon_{\text{эф}} = 0,79$. Температура наружной поверхности труб менялась от 1100К до 1200К. Предполагается, что твердые поверхности диффузно испускают собственное и отражают падающее излучение. Степень черноты футерованных боковых стенок принята равной $\varepsilon = 0,42$, коэффициент теплопроводности с учетом многослойности стенок $\lambda = 0,35$ Вт/(м·К). Учитывалась потеря теплоты через стенки за счет теплопроводности. Наружная температура стенок печи принята равной 300К. Толщина стенок 0,45 м. Степень черноты свода принята равной 0,67, а пода – 0,69.

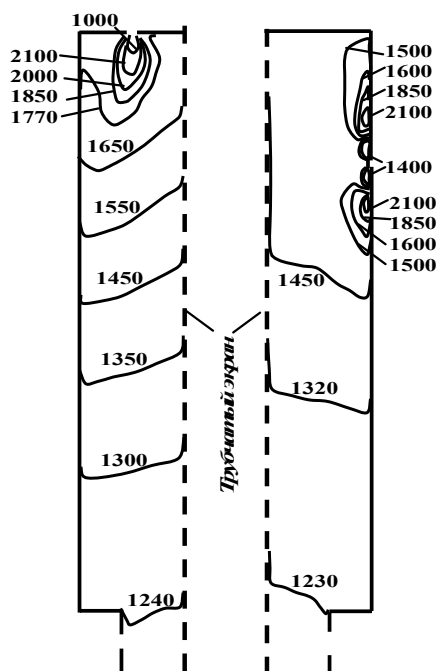


Рис. 2. Вид изотерм в камере радиации для двух типов газовых горелок:
а) инжекционные горелки на своде;
б) акустические горелки на боковой стене

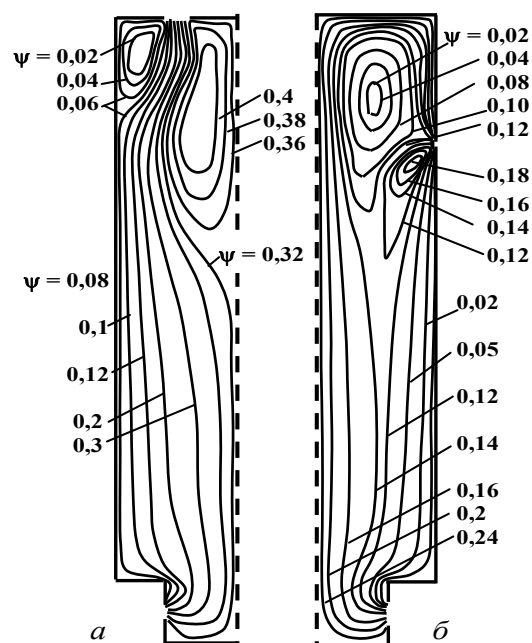


Рис. 3. Вид линий функции тока ψ , кг/с:
а) инжекционные горелки на своде топки;
б) акустические горелки на боковой стене

На рис. 2 показаны изотермы в одной секции камеры радиации для двух типов горелок, а на рис. 3 – вид линий функций тока для этих же случаев.

При сжигании топлива инжекционными горелками, расположенными на своде, реализуется равномерно распределенный режим теплообмена. Данный режим характеризуется тем, что трубчатый экран непосредственному тепловому воздействию факела не подвергается, между факелом и поверхностью нагрева располагается область, имеющая более низкую температуру, чем в ядре факела (рис. 2, а). Это объясняется наличием обширной зоны возвратного течения, расположенной за устьем горелок вблизи трубчатого экрана (рис. 3, а). Длина этой зоны может быть достаточно

велика и, как показывают наши расчеты, зависит также от ширины радиантной секции. Так как коэффициенты поглощения излучающих компонентов газа H_2O и CO_2 обратно пропорциональны температуре, данная область играет роль некоторого теплового экрана, препятствующего лучистому теплообмену между факелом и поверхностью нагрева. Это подтверждается результатами расчета, приведенными на рис. 4. В области факела наблюдаются максимумы поверхностных плотностей лучистых q_p и конвективных q_k потоков тепла к трубчатому экрану.

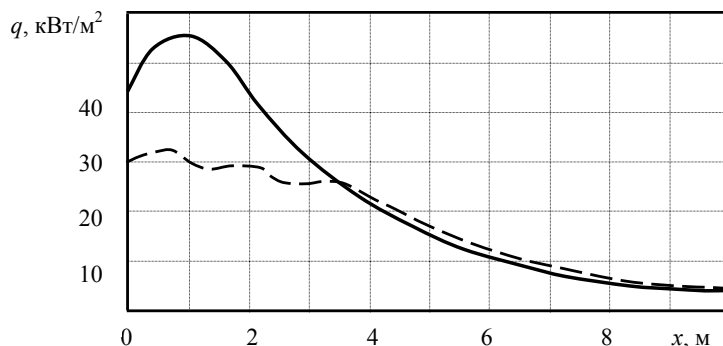


Рис. 4. Изменение теплоснапряженности по длине труб: ——— инжекционные горелки на своде; — — — акустические горелки на боковой стене

При расположении акустических горелок на боковых стенах камеры радиации аэродинамическая картина течения продуктов сгорания и пространственное распределение тепловых характеристик становятся более сложными. Сгорание топлива и, соответственно, области наибольших температур возникают в достаточно узкой области вблизи боковой стены (рис. 2, б). Поле течения можно разделить на две зоны: прямого и обратного токов (рис. 3, б). Одна часть зоны прямого тока идет вдоль настильной стены, свода и трубчатого экрана. Другая часть прямого тока направлена вниз вдоль боковой стены, нагревая футеровку. Зоны прямого тока характеризуются относительно большими значениями скорости движения и постепенным уменьшением температуры продуктов сгорания. Значительную часть топочного объема занимают две зоны обратного тока, расположенные вблизи уровня горелок. Зона обратного тока имеет более низкую температуру, что объясняется, с одной стороны, охлаждающим действием поверхности нагрева и с другой – значительной удаленностью от области тепловыделения.

На рис. 5 показаны изменения расчетных значений температуры внутренней поверхности футеровки боковой стены для двух вариантов горелок и изменение температуры наружной поверхности труб по высоте камеры радиации.

В случае использования акустических горелок лучистые тепловые потоки к трубчатому экрану формируются не только излучением продуктов сгорания, но и излучением внутренней поверхности футеровки боковой стены и свода. Как видно из рис. 5, акустические горелки приводят к достаточно большому разогреву футеровки, чем при расположении инжекционных горелок на своде. Такое поле температур приводит к соответствующему изменению поверхностных плотностей тепловых потоков к трубчатому экрану с тремя небольшими максимумами (рис. 4). Можно предположить, что первый максимум обусловлен излучением первой высокотемпературной области боковой футеровки и свода. Третий максимум объясняется излучением из второй зоны высокотемпературной области боковой футеровки. Этот максимум меньше, чем первый, во-первых, из-за отсутствия влияния

излучения свода, во-вторых, из-за более высокой температуры труб в этой области, чем в первой. Наличие второго максимума на уровне расположения ярусов горелок по-видимому связано излучением высокотемпературных продуктов сгорания из областей интенсивного горения топлива. Можно отметить, что при использовании акустических горелок получается более равномерное распределение тепловых потоков по высоте реакционных труб, чем при расположении горелок на своде.

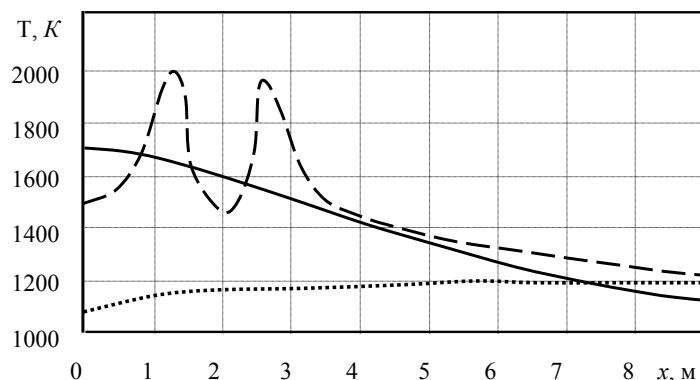


Рис. 5. Изменение температуры по высоте топки: ——— внутренней стенки боковой футеровки при инжекционных горелках; — — — при акустических горелках на боковой стене; температура наружной поверхности труб

На рис. 6 показаны распределения мольных концентраций излучающих компонентов газов в объеме секции камеры радиации при расположении инжекционных горелок на своде.

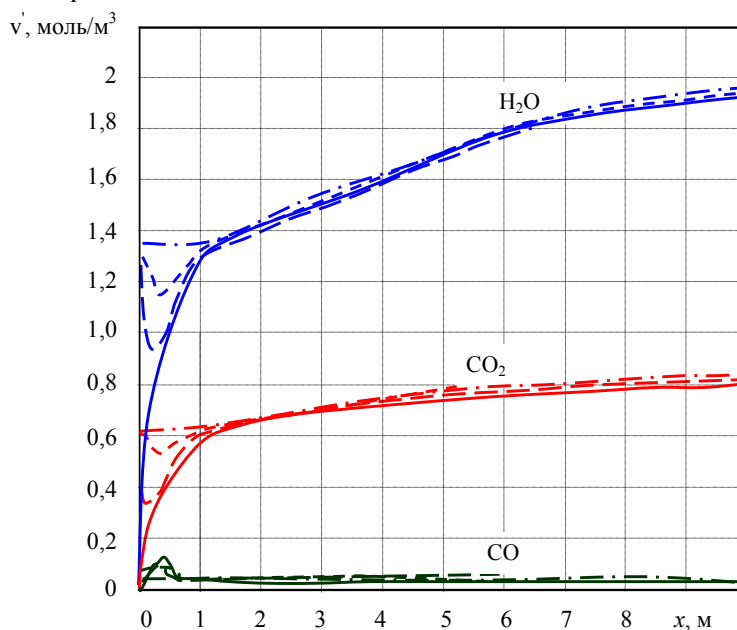


Рис. 6. Изменение мольных концентраций излучающих компонентов продуктов сгорания в объеме камере радиации при расположении горелок на своде: — $y = 0,75$ м; — — $y = 0,85$ м; $y = 0,95$ м; — · — $y = 1,45$ м

Как видно из рис. 6, наибольшее увеличение мольных концентраций H_2O и CO_2 , а также изменение концентрации CO происходит до расстояния $x = 1,5$ м от устья горелок вдоль линии оси горелок ($y = 0,75$ м). Ниже этой высоты массовые доли этих компонентов продуктов сгорания практически не меняются. Увеличение мольных концентраций этих газов ниже области факелов обусловлено постепенным уменьшением температуры продуктов сгорания, что приводит к увеличению их плотности, соответственно к увеличению концентрации отдельных компонент.

На рис. 7 показано изменение мольных концентраций излучающих компонентов продуктов сгорания в объеме секции камеры радиации при использовании акустических горелок, расположенных в один ярус на боковой стене печи.

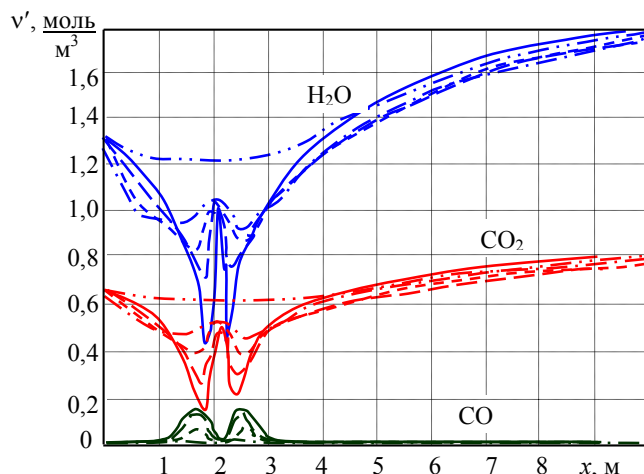


Рис. 7. Изменение мольных концентраций излучающих компонентов продуктов сгорания при расположении акустических горелок в один ряд на боковой стене:

— $y = 0,05$ м; - - - $y = 0,1$ м; - · - · - $y = 0,2$ м;
 · · · · · $y = 0,3$ м; - · - · - $y = 1,45$ м;

Как видно из рис. 7, при использовании акустических горелок образование излучающих компонентов газов происходит в достаточно тонком слое вблизи боковой стены в областях сгорания топлива. В обоих случаях угарный газ CO возникает только в зонах горения, и затем практически полностью сгорает.

Выводы

Таким образом, установлено, что при одинаковой тепловой нагрузке сводовый режим сжигания топлива обеспечивает восприятие тепла поверхностью нагрева примерно на 9% больше по сравнению с настильным режимом с использованием акустических горелок, расположенных в один ярус. Это, в первую очередь, связано большими тепловыми потерями через футеровки боковой стены из-за высоких температур внутренней поверхности. Применение акустических горелок предъявляет более жесткие требования к материалу футеровки. Однако при использовании инжекционных горелок объемного пламени увеличивается коэффициент неравномерности обогрева труб по длине, что при больших тепловых нагрузках топки может привести к локальному перегреву труб. При переходе к настильному режиму сжигания топлива распределение плотности теплового потока к поверхности нагрева по длине труб становится более равномерным. В этом случае равномерность обогрева и

тепловосприятие поверхности нагрева можно повысить увеличением количества ярусов акустических горелок и более тщательной тепловой изоляцией боковых стен.

Summary

Showing comparative thermal and aerodynamic characteristics of technological tubular furnaces with injection burners located on the roof of the chamber and the acoustic radiation burner flame grazing arranged in one layer on the side wall. Isotherm shown in the amount of radiation chamber, view lines of the stream function, the distribution of molar concentrations of radiating components of the combustion products and graphs of the surface heat flux density along the length of the reaction tubes. The results obtained by numerically solving the system of equations of two-dimensional radiative transfer in S_2 – approximation of the discrete ordinate method, the energy of the turbulent motion of the combustion products, $k - \varepsilon$ turbulence model and a simple model of the combustion of gaseous fuels.

Keywords: *tubular furnace, burners, combustion, heat exchange, radiation, turbulence.*

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. Дифференциальный метод теплового расчета топков: научное издание. Казань: «Школа», 2008. 114 с.
3. Вафин Д.Б. Сложный теплообмен / Радиационный теплообмен в энергетических установках. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 251 с.
4. Вафин Д.Б. Тепловой расчет топков с многоярусным расположением настилающих горелок // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2009. № 1-2. С. 53-60.
5. Вафин Д.Б., Садыков А.В., Садыкова Д.А. Моделирование работы веерных горелок настильного пламени в трубчатых печах дифференциальным методом // Вестник КГТУ. 2012. Т. 15. № 18. С. 74-78.
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.

Поступила в редакцию

10 сентября 2014 г.

Вафин Данил Биалович – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Физика» Нижнекамского химико-технологического института (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ». Тел: 8(917)8880228. E-mail: vafdanil@yandex.ru.

Садыков Айдар Вагизович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Математика», декан факультета «Управление и автоматизация» Нижнекамского химико-технологического института (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ». Тел: 8(917)8624162, 8(855)5392314. E-mail: sadykov@land.ru.

Бутяков Марат Анатольевич – аспирант кафедры «Физика» Нижнекамского химико-технологического института (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ». E-mail: butyakov_@mail.ru.