

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЯРУСОВ ГОРЕЛОК НА ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБЧАТОЙ ПЕЧИ*

А. В. Садыков¹, Д. А. Садыкова², Д. Б. Вафин²

*Кафедра математики (1); sadykov@land.ru; кафедра физики (2),
Нижекамский химико-технологический институт (филиал)
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский
технологический университет», г. Нижнекамск*

Ключевые слова: горение; излучение; теплообмен; трубчатая печь; турбулентность.

Аннотация: В рамках двумерной математической модели исследовано влияние расположения ярусов веерных горелок на тепловые характеристики трубчатой печи коробчатого типа. Процессы, протекающие в топочной камере, моделируются двумерными уравнениями энергии, переноса излучения, движения, k - ε модели турбулентности и двухшаговой модели горения природного газа. Перенос излучения рассматривается в рамках S_2 -приближения метода дискретных ординат. Приведены результаты численных исследований.

В нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности находят применение печи с газовыми веерными горелками настильного пламени. Для нормального протекания технологических процессов в реакционных трубах должна быть обеспечена определенная теплонапряженность труб по их длине. На распределения плотностей тепловых потоков к трубчатому экрану и температуры по длине труб оказывает влияние расположение горелок.

В работе [1] показана возможность теплового расчета технологических трубчатых печей с газовыми веерными горелками настильного пламени в рамках дифференциального метода [2] расчета топок.

Исследования проведены для трубчатой печи типа БПК-6К, которая используется для паровой конверсии природного газа. Камера радиации указанной печи коробчатого типа 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 10 м. В численных исследованиях рассмотрены разные возможные варианты расположения ярусов горелок.

Ряд труб заменен сплошной непрозрачной для теплового излучения лучевоспринимающей поверхностью с эффективной степенью черноты.

Наличие осевой симметрии, а также симметричное расположение горелок позволяют рассматривать задачу в двумерной постановке для одной половины печи.

Система координат, область интегрирования и изотермы в камере радиации представлены на рис. 1, где высота камеры радиации вдоль оси x показана уменьшенной в 3,5 раза по сравнению с шириной камеры.

* По материалам доклада на конференции ММТТ-27 (см. Вестник ТГТУ, т. 20, № 4).

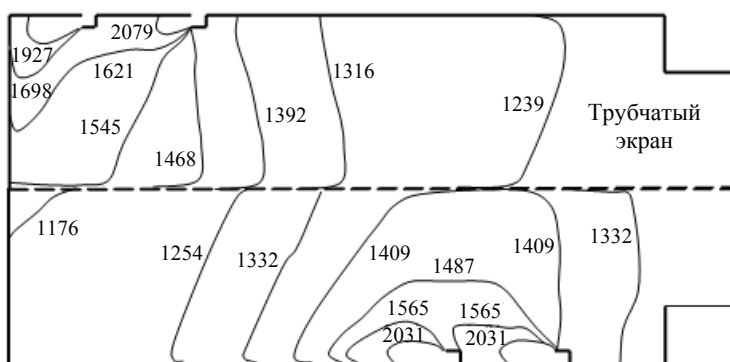


Рис. 1. Изотермы T, K , для первого и шестого вариантов (верхняя и нижняя части рисунка соответственно)

Двумерная математическая модель задачи содержит стационарные уравнения энергии, переноса излучения, движения, неразрывности, k - ϵ модели турбулентности, двухшаговой модели горения.

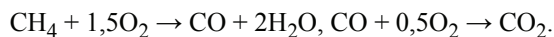
Распределение температур в топочной камере находится в результате решения уравнения энергии

$$c_p \rho u \frac{\partial T}{\partial x} + c_p \rho v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(\lambda + \lambda_T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\lambda + \lambda_T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + Q_V - \text{div} \bar{q}_p,$$

где u, v – компоненты вектора скорости \vec{V} по осям Ox, Oy соответственно; ρ – плотность дымовых газов; c_p – изобарная теплоемкость; λ, λ_T – коэффициенты молекулярной и турбулентной теплопроводности соответственно; $T = T(x, y)$ – температура в точке с координатами x, y ; Q_V – объемная плотность тепловыделения в результате горения топлива; \bar{q}_p – вектор плотности интегрального по спектру лучистого потока тепла. Для нахождения распределения Q_V в объеме топочной камеры решаются дифференциальные уравнения двухшаговой модели горения. Дивергенция лучистых потоков определяется путем решения уравнения переноса излучения.

Лучистый теплообмен рассматривается в рамках S_2 -приближения метода дискретных ординат [3]. Поле скоростей находится решением осредненных по времени уравнений движения и неразрывности. Для замыкания уравнений движения используется k - ϵ модели турбулентности. К этим уравнениям добавляется уравнение состояния газов. Камера радиации рассматриваемой трубчатой печи работает при атмосферном давлении. Поэтому состояние дымовых газов рассматривается в приближении идеального газа.

В данной работе в отличие от [1] использована двухшаговая модель горения



При этом скорости реакций определяются по модели вихревой диссипации. В качестве окислителя используется воздух, в качестве газообразного топлива – природный газ, 95 – 98 % которого составляет метан.

Селективность излучения продуктов сгорания описывалась в рамках шестиполосной модели спектра. Учитывалась зависимость теплофизических и оптических свойств продуктов сгорания от температуры. Для этого использовались специально разработанные подпрограммы.

Система уравнений дополняется условиями однозначности. На входном участке для уравнения энергии, уравнений движения, уравнений модели турбулентности, модели горения ставится граничное условие 1-го рода. Для уравнений движения на твердой границе ставятся условия «прилипания» и «непроницаемости». На жесткой стенке для уравнений модели горения задается условие отсутствия потока. Для уравнения энергии на поверхности нагрева ставится граничное условие 1-го рода. На выходе из топки задается условие нулевого градиента. На твердой границе диффузионный поток кинетической энергии турбулентности полагается равным нулю. Аппроксимация граничных условий в методе дискретных ординат подробно рассмотрена в [1, 3].

Для получения дискретных аналогов уравнений сохранения использован метод контрольных объемов. Для алгебраической аппроксимации уравнений применена разностная сетка «шахматного» типа. Узлы, в которых определяются продольная u и поперечная v составляющие скорости, сдвинуты относительно «основных» узлов на полшага в продольном и поперечном направлениях соответственно. Около футерованной стенки, где расположены в два ряда горелки, использована более мелкая сетка. Вся область интегрирования разделена на 6000 прямоугольных ячеек.

Решение задачи сложного теплообмена проводится по итерационной схеме. В каждой итерации последовательно решаются газодинамическая и тепловая задачи. В ходе итерационного процесса совместного решения уравнений энергии и переноса излучения в первых внешних итерациях поле температуры и скоростей сильно «осциллирует». Для уменьшения величины «осцилляций», так же как в [1], применяются нижняя релаксация и линеаризация источниковых членов.

В параметрических исследованиях рассмотрены шесть вариантов расположения ярусов верхних горелок. В первом варианте верхний и нижний ярусы расположены на расстояниях 1 и 2,5 м от свода соответственно, во втором – 2 и 3,5 м от свода соответственно. В каждом следующем варианте расстояние от свода увеличивается на 1 м.

В проведенных расчетах в качестве топливного газа использовался метан. Расход газа на половину камеры радиации составлял $B = 0,198 \text{ м}^3/\text{с}$, низшая теплота сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 35818 \text{ кДж/м}^3$. Температура топливной смеси на входе в горелки 323 К, температура воздуха, подаваемого в горелки в проведенных расчетах принята такой же. Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,1$. Расчеты выполнены при равномерном распределении топливного газа по ярусам горелок.

Эффективная степень черноты поверхности нагрева, вычисленная по описанной в работе [2] методике, равна 0,79. Температура наружной поверхности труб линейно менялась в пределах 1150...1200 К. Предполагается, что твердые поверхности диффузно испускают собственное и отражают падающее излучение. Степень черноты футерованных боковых стенок $\varepsilon = 0,42$, коэффициент теплопроводности с учетом многослойности стенок $\lambda = 0,35 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Учитывалась потеря теплоты через стенки за счет теплопроводности. Наружная температура стенок печи принята равной 300 К. Толщина стенок 0,45 м. Степень черноты свода принята равной 0,67, а пода – 0,69.

Некоторые из результатов приведены на рис. 1 – 3. На рисунке 1 показаны изотермы при двух вариантах (в верхней части – первый вариант, в нижней – шестой). В первом варианте область высоких температур расположена в верхней части топки. При смещении ярусов горелок к поду область высоких температур смещается к поду и, как следствие, возрастает температура дымовых газов, покидающих топку. Как видно из рисунка, разность температур в зоне, расположенной

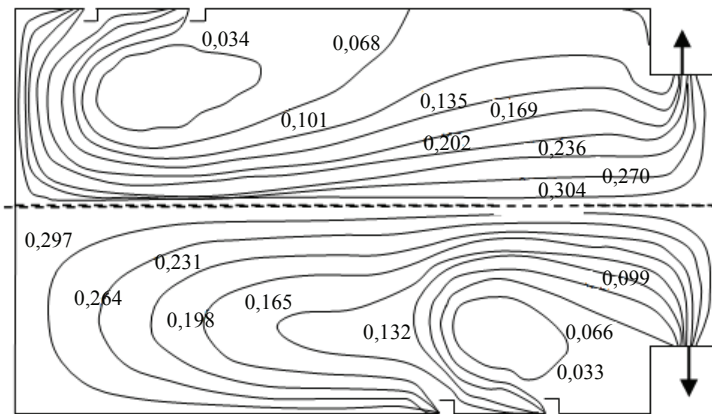


Рис. 2. Изолинии функции тока для первого и шестого вариантов
(верхняя и нижняя части рисунка соответственно)

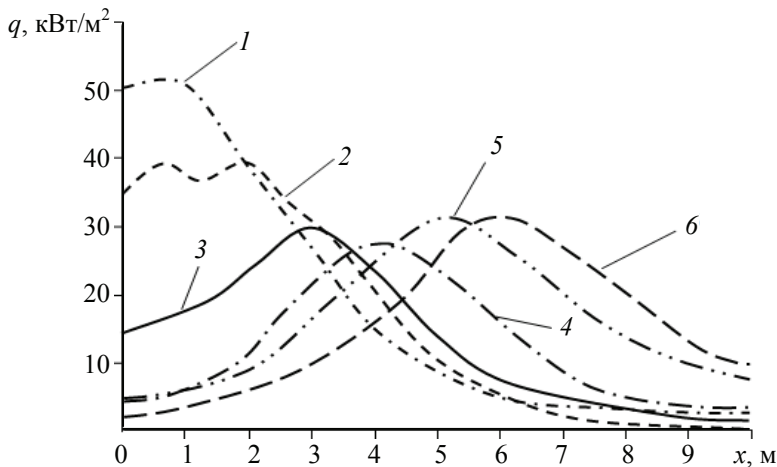


Рис. 3. Поверхностные плотности тепловых потоков к трубчатому экрану по высоте топки
(номер кривой соответствует номеру варианта)

около свода, между первым и шестым вариантами доходит до 370 К. Во всех рассмотренных вариантах факелы расположены в непосредственной близости у боковой футерованной стенки. Поэтому максимальные температуры наблюдаются у боковой стенки и прилегающей к ней области выше горелок.

Изолинии функции тока при двух вариантах расположения горелок (1-й и 6-й варианты) показаны на рис. 2, из которого видно, что картина течения существенно меняется. В первом варианте зона обратного тока расположена в верхней части топки и ближе к поверхности нагрева. В этом случае поверхность нагрева по длине реакционных труб омывается более горячими продуктами сгорания от факелов по ходу прямого тока. При смещении ярусов горелок в сторону пода зона обратных токов соответственно перемещается к выходному сечению.

На рисунке 3 приведены распределения поверхностных плотностей суммарных (лучистых и конвективных) тепловых потоков q при всех 6 вариантах расположения ярусов верных горелок. В первом варианте максимум в распределении q находится на расстоянии 1 м от свода. В каждом следующем варианте максимум в распределении q удаляется от свода примерно на 1 м, при этом распределения q становятся более равномерными.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что расположение ярусов веерных горелок существенно влияет на тепловые характеристики трубчатых печей коробчатого типа. Полученные результаты можно использовать при проектировании и эксплуатации трубчатых печей рассмотренного типа.

Список литературы

1. Вафин, Д. Б. Моделирование работы веерных горелок настильного пламени в трубчатых печах дифференциальным методом / Д. Б. Вафин, А. В. Садыков, Д. А. Садыкова // Вестн. Казан. технол. университета. – 2012. – Т. 15, № 18. – С. 74–78.
2. Вафин, Д. Б. Дифференциальный метод теплового расчета топков / Д. Б. Вафин. – Казань : Школа, 2008. – 114 с.
3. Fiveland W.A. Discrete-Ordinate Solutions of the Radiation Transport Equation for Rectangular Enclosures // Trans. ASME: J. Heat Transfer. – 1984. – Vol. 106, No. 4. – P. 699–706.

The Influence of Burner Tiers Arrangement on Thermal Properties of Tube Furnace

A. V. Sadykov¹, D. A. Sadykova², D. B. Vafin²

*Department of Mathematics (1); sadykov@land.ru; Department of Physics (2),
Nizhnekamsk Institute for Chemical Technology (Affiliate)
Kazan State Technological University, Nizhnekamsk*

Keywords: combustion; heat exchange; radiation; tube furnace; turbulence.

Abstract: As part of a two-dimensional mathematical model the authors investigated the influence of burner tiers' arrangement on thermal characteristics of the tubular furnace of box-shaped type. The processes occurring in the furnace chamber were modeled by two-dimensional equations of energy, radiation transfer, movement, $k-\epsilon$ model of turbulence and two-step model of natural gas burning. The radiation transfer was considered within S_2 approximation of discrete ordinate method. The computational results were reported.

References

1. Vafin D.B., Sadykov A.V., Sadykova D.A. *Bulletin of the Kazan Technological University*, 2012, vol. 15, no. 18, pp. 74-78.
2. Vafin D.B. *Differentsial'nyi metod teplovogo rascheta topkov* (Differential thermal calculation method of furnaces), Kazan': Shkola, 2008, 114 p.
3. Fiveland W.A. *Trans. ASME: J. Heat Transfer*, 1984, vol. 106, no. 4, pp. 699-706.

Einfluss der Anordnung der Ränge der Brenner auf die thermischen Charakteristiken des Rohrofens

Zusammenfassung: Im Rahmen des zweidimensionalen mathematischen Modells ist der Einfluss der Anordnung der Ränge der Fächerbrenner auf die thermischen Charakteristiken des Rohrofens des Korbtyps untersucht. Die Prozesse, die in der Heizkammer verlaufen, werden von den zweidimensionalen Angleichungen der

Energie, der Versetzung der Ausstrahlung, der Bewegung, des k - ε Modells der Turbulenz und des Zweischrittmodells des Brennens des Erdgases modelliert. Die Versetzung der Ausstrahlung wird im Rahmen der S_2 -Annäherung der Methode der diskreten Ordinaten betrachtet. Es sind die Ergebnisse der numerischen Forschungen gebracht.

Influence de la disposition des files des becs sur les caractéristiques du four tubulaire

Résumé: Dans le cadre du modèle mathématique en deux dimensions est étudiée l'influence de la disposition des files des becs en éventail sur les caractéristiques du four tubulaire du type de coquille. Les processus écoulant dans la chambre de combustion sont modélés par les équations de deux dimensions de l'énergie, du transfert de l'émission, du mouvement du modèle k - ε de la turbulence et du modèle de deux pas de la combustion du gaz naturel. Le transfert de l'émission est examiné dans le cadre S_2 - du rapprochement de la méthode des ordonnées discrètes. Sont cités les résultats des calculs.

Авторы: *Садыков Айдар Вагизович* – кандидат технических наук, доцент кафедры математики, декан факультета управления и автоматизации; *Садыкова Дильбар Айдаровна* – аспирант кафедры физики; *Вафин Данил Билалович* – доктор технических наук, профессор кафедры физики, Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Нижнекамск.

Рецензент: *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
