

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ЯРУСОВ ГОРЕЛОК НАСТИЛЬНОГО ПЛАМЕНИ НА ТЕПЛО- И МАССОБМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ В ТОПКАХ ТРУБЧАТЫХ ПЕЧЕЙ

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

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

Используя дифференциальный метод расчета тепломассопереноса, проведены численные исследования тепловых и аэродинамических параметров в топках трубчатых печей с акустическими газовыми горелками настильного пламени при различных количествах расположения ярусов горелок на боковых стенках камеры радиации. Приведены вид изотерм и линий функций тока в объеме камеры радиации технологической печи при одно-, двух- и трехъярусном расположении рядов горелок. Для этих же вариантов показаны характеры изменения температуры боковой стены печи и теплонапряженности вдоль реакционных труб.

Ключевые слова: печь технологическая, горелки акустические, тепловое излучение, тепломассообмен, турбулентность.

При обеспечении определенного изменения тепловых потоков вдоль реакционных труб можно добиться получения требуемого оптимального состава целевых продуктов в трубчатых печах нефтехимических производств. Поддержания требуемой теплонапряженности труб можно добиться применением инжекционных чашеобразных горелок, беспламенных панельных горелок или различных типов горелок настильного сжигания смеси газового топлива и воздуха. Проведение численных исследований на компьютерах с применением физического и математического моделирования сложных процессов, происходящих в топках, позволяет предсказать характер изменения лучистых тепловых потоков, температуры реакционных труб и стенок топки, при внесении различных изменений в конструктивные параметры трубчатой печи и расположения горелок. В работах [1, 2] приводится подробное описание дифференциального метода теплового расчета топков. Данный метод использовали для исследования тепловых и аэродинамических режимов печей с газовыми горелками типа ГВН в работах [3, 4], а для печей с инжекционными и акустическими горелками – в работах [5–8].

В данной работе рассмотрено влияние количества ярусов акустических горелок типа АГГ [9], расположенных на футерованных боковых стенах камеры радиации печи, на тепловые и аэродинамические параметры в топке.

Схема акустической горелки, упрощенная ее схема для моделирования работы в двухмерной постановке задачи сложного теплообмена, а также разрез трубчатой печи с расположением рядов горелок на боковых стенках камеры радиации в три яруса показаны на рис. 1. Смесь углеводородов и водяного пара движется внутри вертикальных однорядных труб и нагревается до необходимой температуры за счет излучения продуктов сгорания и раскаленных стен, расположенных симметрично с двух сторон относительно трубчатого экрана. Часть продуктов сгорания из топки и

вторичный воздух из периферии корпуса акустической горелки присасываются к корню факела за счет разрежения, создаваемого самими горелками и тяги в топке. Пламя от горелок настиляется на кладку в виде кругов и нагревает излучающие стенки топки.

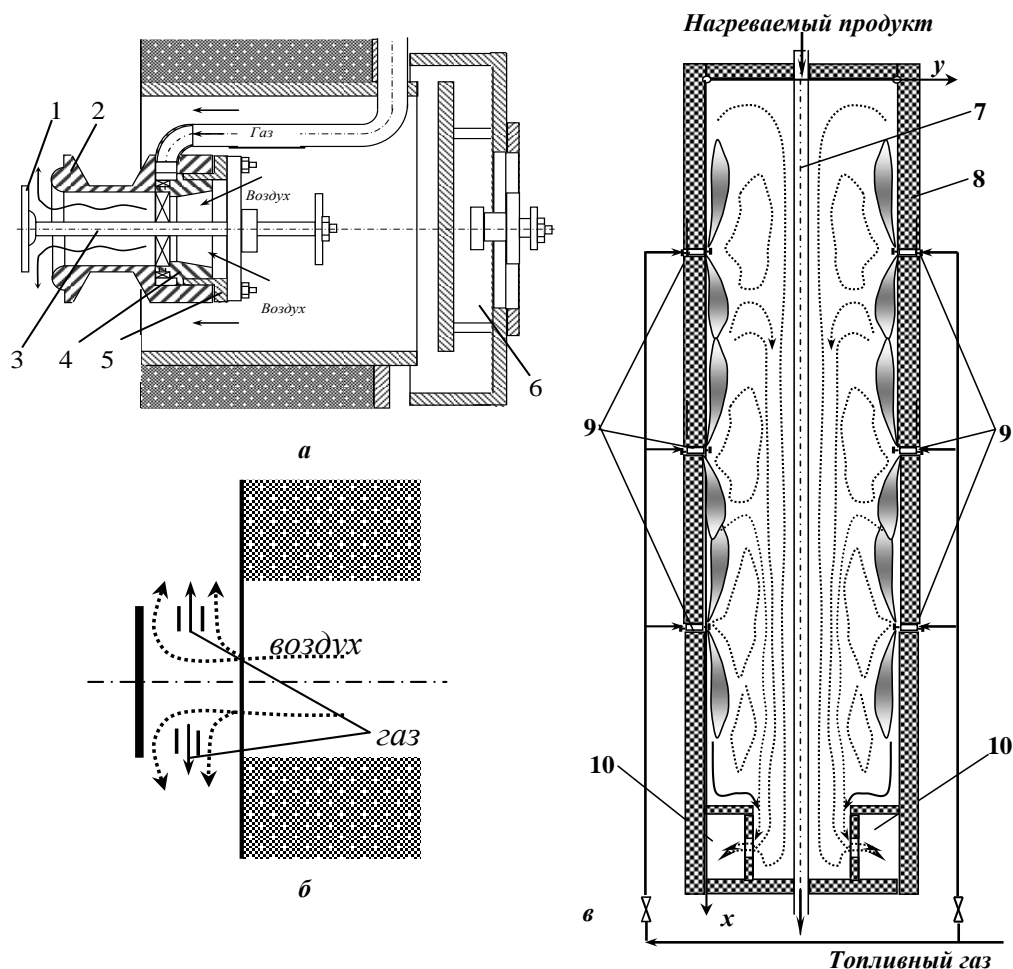


Рис. 1. Схемы элементов трубчатой печи с горелками настильного пламени: а) схема акустической горелки; б) схема двухмерного моделирования работы акустической горелки; в) разрез трубчатой печи с акустическими горелками. 1 – отражающий диск; 2 – корпус; 3 – шток; 4 – резонатор; 5 – прижимной фланец; 6 – регулятор эжекции воздуха и шумоглушитель; 7 – трубчатый реактор; 8 – футерованная боковая стена; 9 – акустические горелки; 10 – туннель для сбора и направления дымовых газов в конвекционную секцию печи

Задача сопряженного теплообмена решается для половины радиантной камеры печи в двухмерной постановке. Правомерность такого упрощения и подробное описание дифференциального метода для теплового расчета печей в двухмерной постановке приводится в работах [1–8].

В теплообмен в камерах радиации вносят вклад все механизмы теплопередачи: конвекция, теплопроводность и излучение. Лучистый перенос энергии оказывает основное влияние на правую часть уравнения энергии:

$$\frac{D}{Dt} \left(U + \frac{\rho \bar{u}^2}{2} \right) = \text{div} q_k + \text{div} q_{\text{к}} + \text{div} q_p + \text{div} q_{\text{хим}}. \quad (1)$$

В этом уравнении q_k , q_k , q_r , $q_{хим}$ – векторы плотности конвективного, кондуктивного и радиационного потоков энергии от связанного с реакциями горения топлива. Работа сил внешнего давления включена в q_k . Основное значение при расчете внешнего теплообмена в камерах радиации имеет дивергенция лучистого потока $\text{div}q_r$, входящая в правую часть уравнения энергии. Значение этой слагаемой увеличивается с ростом температуры и давления, а также с уменьшением скорости движения дымовых газов.

Краевые условия на ограничивающих поверхностях объема секции камеры радиации могут быть первого, второго или третьего рода в зависимости от того, какие тепловые и радиационные характеристики на ней задаются.

Наличие конвективного члена в уравнении (1) показывает, что в движущейся среде продуктов сгорания теплообмен происходит как за счет теплопроводности и излучения, так и из-за переноса тепла элементарными объемами дымовых газов. Поэтому вид поля температур в камере радиации существенным образом зависит от конфигурации поля скоростей.

Уравнение движения турбулентного потока дымовых газов – это второй закон Ньютона, записанный с учетом всех массовых и поверхностных сил, действующих на элементарный объем. Уравнение движения в векторной форме, осредненное по времени, представляется в виде

$$\rho (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = -\nabla p - \left[\nabla \cdot \bar{\tau}^{(l)} \right] - \left[\nabla \cdot \bar{\tau}^{(T)} \right] + \bar{f}, \quad (2)$$

где \bar{u} – вектор осредненной по времени скорости; $\bar{\tau}^{(l)}$ – тензор вязких напряжений; $\bar{\tau}^{(T)}$ – тензор напряжений Рейнольдса; \bar{f} – массовые силы.

Уравнение неразрывности потока выражает закон сохранения вещества для любого элементарного объема:

$$\text{div} (\rho \bar{u}) = 0. \quad (3)$$

При моделировании работы акустических горелок предполагается, что метан на горение, частично перемешанный с воздухом, поступает в камеру радиации через две узкие щели параллельно стенкам в противоположных направлениях (рис. 1, б). Еще по четырем щелям с двух сторон от газовых щелей поступает вторичный воздух. Происходит воспламенение метана в воздушной среде и горение по двухстадийной модели [7] вблизи стенки.

Уравнение переноса энергии излучением в данной работе решается в S_4 приближении метода дискретных ординат. Так как методы решения двумерных дифференциальных уравнений переноса были описаны в работах [1–5], здесь будем обсуждать лишь результаты численных исследований.

Изучение влияния количества рядов акустических горелок на характеристики внешнего теплообмена и аэродинамики топочных газов сделаны на примере трубчатой печи двухстороннего обогрева трубчатого экрана. Камера радиации подобной печи состоит из двух секций, расположенных симметрично относительно однорядного вертикального трубчатого экрана. Количество труб в змеевике 28, диаметр 134×12 мм, шаг между ними 300 мм, длина труб $L = 10$ м. Ширина секции $H = 1,5$ м. В проведенных расчетах акустические горелки были расположены в один, два и три яруса: верхний ярус на расстоянии 1,5 м от свода, расстояние между ярусами горелок 2,5 м.

В качестве топливного газа применялся метан. Расход газа на горение составлял $V_T = 0,396$ м³/с. Температура топливной смеси на входе в горелки и температура вторичного воздуха равнялись 323 К. Принятое значение коэффициента избытка воздуха $\alpha_T = 1,07$. Исследования проведены в предположении равномерного распределения

метана по ярусам горелок и при одинаковом общем расходе при различных количествах ярусов горелок.

Эффективная степень черноты трубчатого экрана принята равной 0,79. Предполагалось, что температура наружной поверхности труб увеличивается от 1000К на входе до 1200К на выходе. Степень черноты кладки боковых стен $\varepsilon = 0,42$, с учетом многослойности боковой стены коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,35$ Вт/(м·К). Учитывались тепловые потери через ограждающие поверхности камеры за счет теплопроводности. Температура наружных стенок печи принята равной 300К. Толщина стенок 0,45 м. Степень черноты свода принята равной 0,67, а пода – 0,69.

Направления осей системы координат и вид изотерм для половины камеры радиации, полученных расчетным путем, для трех вариантов показаны на рис. 2 (ось x на самом деле направлена вниз).

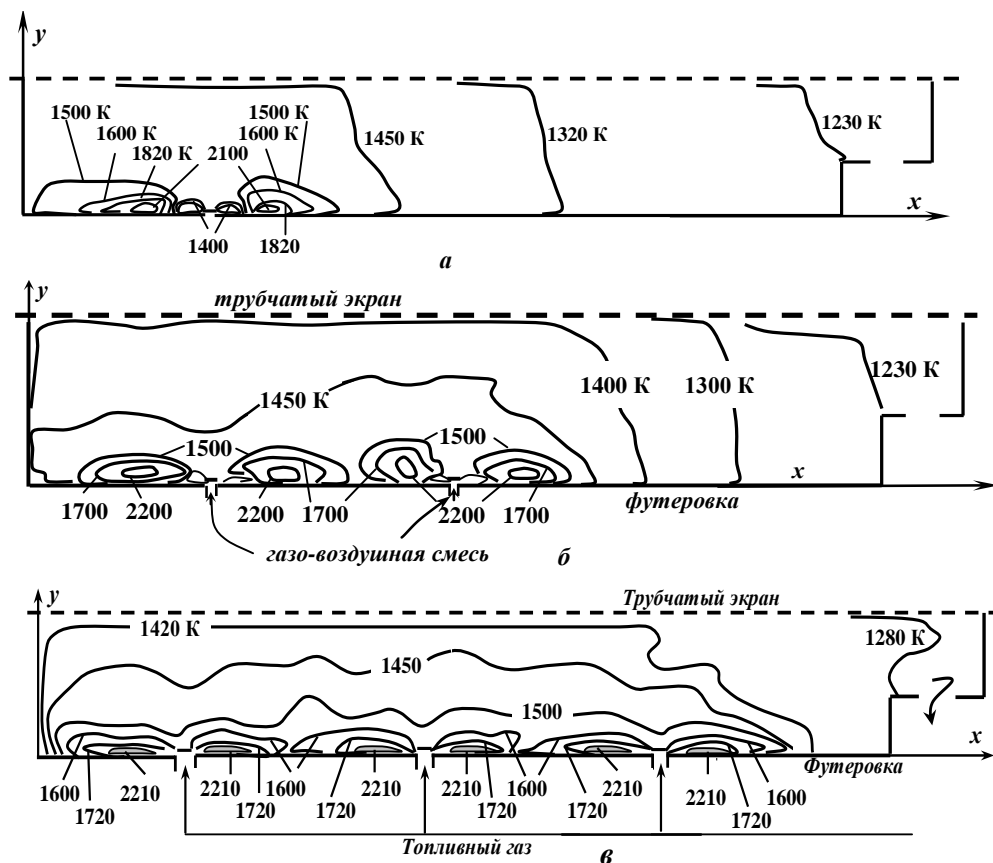


Рис. 2. Вид изотерм в камере радиации при различных количествах ярусов акустических горелок: а) горелки расположены в 1 ярус; б) 2 яруса; в) 3 яруса

Как видно из рис. 2, области с максимальными значениями температуры продуктов сгорания получают вблизи боковой стены в ядрах факелов, соответственно в зависимости от количества рядов горелок. Большая часть объема камеры радиации заполнена дымовыми газами, температура которых плавно уменьшается от 1500 до 1300К вблизи трубчатого экрана. Можно также заметить, что с увеличением количества ярусов горелок большая часть трубчатого экрана оказывается в области с температурой около 1400К. Температура дымовых газов снижается также в направлении перехода в

конвекционную секцию и составляет около 1230К при однорядном и двухрядном расположении горелок, и 1270К – при трех ярусах горелок, что практически совпадает с опытными данными в пределах изменения этой величины $\pm 5\text{K}$ во время нормального режима работы печи.

На рис. 3 показаны виды линий функции тока ψ для одной половины объема радиантной камеры. Поле течения разделяется на зоны прямого и обратного токов, количество которых зависит от числа ярусов горелок. Для каждого яруса горелок можно выделить по две зоны обратных течений. Области прямого токов оказываются поблизости от футерованной стены печи, и там имеют место сравнительно большие значения скорости течения и температуры дымовых газов. Как видно из рис. 4, это приводит к волнообразному изменению температуры боковой стены камеры радиации. На каждый ярус горелок приходится по два ярко выраженных максимума температуры.

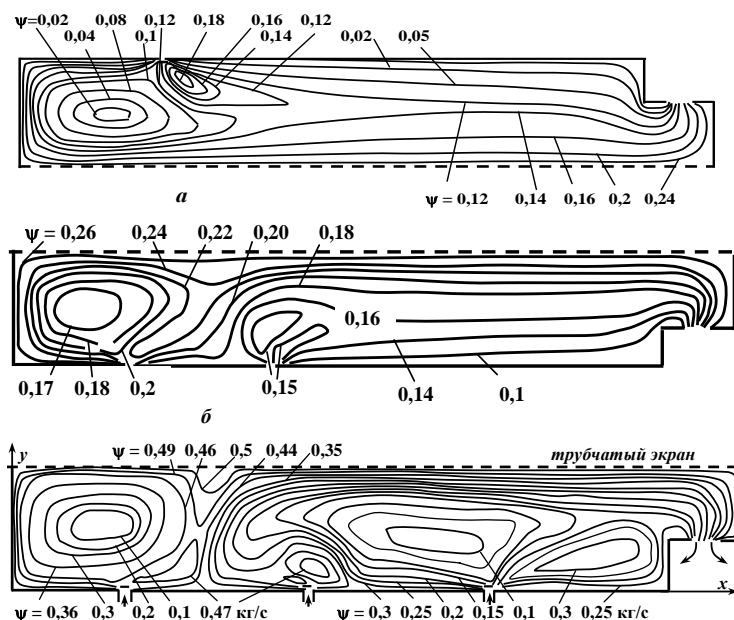


Рис. 3. Вид линий функции тока в камере радиации при разных количествах ярусов акустических горелок: а) 1; б) 2; в) 3

На рис. 4 показан и характер изменения температуры боковой стены топки при расположении ряда инжекционных горелок на своде печи. В этом случае уровень температуры футеровки по всей высоте существенно ниже и плавно уменьшается от значения 1700К у свода до 1300К внизу топки. На этом же рисунке приведен график изменения температуры наружной стенки труб реактора, использованный как исходные данные в проведенных расчетах.

На рис. 5 показаны графики изменения поверхностных плотностей лучистых потоков при различных режимах организации горения газового топлива. Когда применяются инжекционные горелки, имеется характерный максимум температуры продуктов сгорания в области расположения факелов. Вниз по течению тепловые потоки к трубчатому экрану достаточно быстро убывают.

При использовании горелок настильного пламени лучистые потоки к реакционным трубам формируются как от высокотемпературных продуктов сгорания, так и от раскаленных футерованных стен камеры радиации. Распределения плотностей

суммарных тепловых потоков (которые, кстати, практически не отличаются от распределений лучистых потоков) вдоль реакционных труб при использовании акустических горелок существенно отличаются от изменения тепловых потоков для печей с инжекционными горелками. На начальном участке по длине реакционных труб до 4 м при расположении акустических горелок в один и два яруса и до 5 м – при использовании трехъярусного расположения горелок имеют место более низкие значения плотностей тепловых потоков, чем для инжекционных горелок, расположенных на своде. Обращает внимание достаточно равномерное изменение поверхностных плотностей тепловых потоков вдоль реакционных труб в области расположения акустических горелок. Наличие небольших колебаний теплонапряженности труб в этой области можно объяснить соответствующим характером поля температур продуктов сгорания вблизи горелок и футеровки, показанных на рис. 2 и 4.

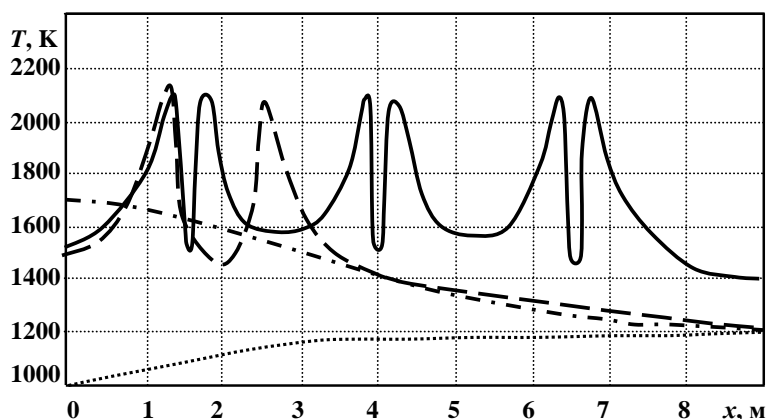


Рис. 4. Изменение температуры внутренней поверхности стенки футеровки и наружной стенки труб по высоте камеры радиации печи: — при трехъярусном расположении акустических горелок; - - - при 1 ярусе акустических горелок; - · - · при инжекционных горелках на своде; ··········· наружная стенка труб

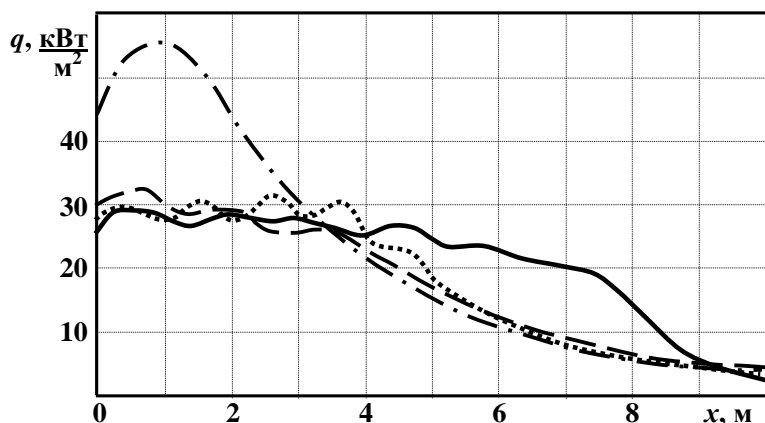


Рис. 5. Изменение тепловых потоков по длине реакционных труб: - · - · инжекционные горелки на своде; - - - акустические горелки на боковой стене, расположенные в один ярус; ········· акустические горелки в два яруса; — акустические горелки в три яруса

При расположении настилающих горелок ближе к своду первые три варианта сжигания топлива обеспечивают практически одинаковую суммарную теплоотдачу.

При использовании трехъярусного расположения акустических горелок обеспечивается более равномерная теплонапряженность реакционных труб по их длине, но суммарная теплоотдача примерно на 4% ниже, чем для первых трех вариантов, что приводит к некоторому увеличению температуры дымовых газов, покидающих камеру радиации печи.

Проведенные численные исследования показали, что дифференциальный метод теплового расчета топок можно использовать для определения локальных значений температур и скоростей продуктов сгорания в объеме камеры радиации трубчатых печей с акустическими горелками, расположенными на боковых стенках. Одновременно определяются поверхностные плотности лучистых, конвективных и суммарных тепловых потоков к реакционным трубам, а также температура футеровки. Использование плоскопламенных горелок акустического типа АГТ позволяет обеспечить более равномерную теплонапряженность реакционных труб по их длине, что указывает на перспективность их применения. При совместном решении задач внутриреакторных процессов и внешнего теплообмена определяются и локальные значения температуры стенок реакционных труб. Оптимальным, с точки зрения наибольшей теплоотдачи, является расположение ярусов горелок вблизи свода камеры радиации. В то же время, при увеличении числа ярусов акустических горелок получается более равномерное распределение тепловых потоков по длине труб. При использовании горелок с настиляющимися факелами потери тепла через боковые стенки труб составляют до 3%, что несколько выше, чем при расположении инжекционных горелок на своде.

Summary

Using the differential method for calculating the heat and mass transfer, numerical studies of thermal and aerodynamic parameters in the firebox tube furnaces with acoustic gas burners flame grazing at different amounts tiered burners on the side wall of the radiation. Is a view of the isotherms and the functions of the current lines in the chamber radiation furnace technology at one, two and three rows of burners long line arrangement. For these options to show the character of temperature change the side wall of the furnace and thermal stress along the reaction tubes.

Keywords: furnace technology, acoustic burners, thermal radiation, heat and mass transfer, turbulence.

Литература

1. Вафин Д.Б. Радиационный теплообмен в энергетических установках / Сложный теплообмен. Saarbrücken: LAP, 2011. 252 p.
2. Вафин Д.Б. Тепловой расчет топок с многоярусным расположением настиляющих горелок // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2009. №1-2. С. 53–60.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Вафин Д.Б., Садыкова Д.А. Применение дифференциального метода теплового расчета для трубчатых печей с акустическими горелками // Фундаментальные исследования. 2014. №9. С. 2375–2380.
7. Вафин Д.Б., Садыков А.В., Бутяков М.А. Сравнительные характеристики трубчатых печей с веерными и акустическими горелками // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 1-2. С. 65–75.

8. Вафин Д.Б., Бутяков М.А., Садыкова Д.А. Характеристики трубчатых печей с веерными и акустическими горелками настольного пламени // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 5-6. С. 84–92.

9. Ентус Н.Р., Шарихин В.И. Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. М.: Химия, 1987. 304с.

Поступила в редакцию

12 января 2016 г.

Вафин Данил Биалович – д-р техн. наук, профессор кафедры ЭТ и ЭОП Нижнекамского химико–технологического института (филиал) «Казанского национального исследовательского технологического университета» (НХТИ КНИТУ), г. Нижнекамск. E-mail: vafdaniel@yandex.ru.

Садыков Айдар Вагизович – канд. техн. наук, доцент кафедры математики Нижнекамского химико–технологического института (филиал) «Казанского национального исследовательского технологического университета» (НХТИ КНИТУ), г. Нижнекамск. E-mail: sadykov@land.ru.

Бутяков Марат Анатольевич – аспирант кафедры ЭТ и ЭОП Нижнекамского химико–технологического института (филиал) «Казанского национального исследовательского технологического университета» (НХТИ КНИТУ), г. Нижнекамск. E-mail: butyakov_marat@mail.ru.