

УДК 66.013.7:665:536.3

**ТЕПЛОВЫЙ РЕЖИМ ПЕЧИ ПЕРВИЧНОГО РИФОРМИНГА ЗАВОДА
ПРОИЗВОДСТВА АММИАЧНОЙ СЕЛИТРЫ****Вафин Д.Б.***Нижекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Казанский
национальный исследовательский технологический университет», Нижнекамск,
e-mail: vafdanil@yandex.ru*

С помощью пакета прикладных программ, реализующих дифференциальный метод теплового расчета топок, впервые рассчитаны поля температуры в камере радиации и распределения тепловых потоков вдоль трубчатых реакторов в печи первичного риформинга для получения водорода завода по производству аммиачной селитры. Показана упрощенная схема камеры радиации печи. Горизонтальные настенные горелки установлены на одинаковых расстояниях друг от друга в шести горизонтальных рядах по обеим стенкам камеры радиации. Дается краткое описание математической модели взаимосвязанных процессов горения, турбулентного течения дымовых газов, лучисто-конвективного теплообмена, происходящих в топочной камере. Затронуты вопросы численного решения системы дифференциальных уравнений. Задача решается в двухмерной постановке. Продукты сгорания природного газа в воздухе, выходящие из сопел 360 горелок, создают сложные поля температуры и скоростей течения в камере радиации печи. Это противоречит предположению о равномерном температурном поле в топке. Тепловые потоки к реакционным трубам формируются за счет излучения дымовых газов, частиц сажи и раскаленных футерованных поверхностей стен топочной камеры. Для вычисления лучистых потоков применена спектральная модель широкой полосы, учитывающая излучение углекислого газа и водяного пара. Приведены графики изменения температуры внутренней поверхности футерованных боковых стен печи и наружных поверхностей реакционных труб. Достоверность расчетных значений температуры дымовых газов на перевале печи, наружной стенки труб реактора у входа и выхода из камеры радиации подтверждены экспериментальными данными. Даются рекомендации по обеспечению нормального теплового режима камеры радиации.

Ключевые слова: трубчатая печь, реакционные трубы, настенные горелки, горение, излучение, турбулентность**THERMAL MODE OF THE PRIMARY REFORMING FUNNEL
OF AMMONIA SELETTER PRODUCTION PLANT****Vafin D.B.***Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch) of «Kazan State Research Technological
University», Nizhnekamsk, e-mail: vafdanil@yandex.ru*

Using the application package that implements the differential method of thermal calculation of the furnaces, the temperature fields in the radiation chamber and the distribution of heat fluxes along the tubular reactors in the primary reforming furnace were first calculated to produce hydrogen for the ammonium nitrate production plant. A simplified diagram of the furnace radiation chamber is shown. Horizontal wall burners are installed at equal distances from each other in six horizontal rows along both walls of the radiation chamber. A brief description of the mathematical model of interconnected combustion processes, turbulent flow of flue gases, and radiative-convective heat exchange occurring in the combustion chamber is given. The issues of the numerical solution of the system of differential equations. The problem is solved in a two-dimensional formulation. The products of natural gas combustion in the air, coming out of the nozzles of the 360 burners, create complex fields of temperature and flow rates in the furnace radiation chamber. This contradicts the assumption of a uniform temperature field in the furnace. Heat flows to the reaction tubes are formed by the radiation of flue gases, soot particles, and hot lined surfaces of the walls of the combustion chamber. The spectral model of a wide band, taking into account the emission of carbon dioxide and water vapor, was used to calculate radiant fluxes. Graphs of changes in the temperature of the inner surface of the lined side walls of the furnace and the outer surfaces of the reaction tubes are given. The reliability of the calculated values of the flue gas temperature at the furnace pass, the outer wall of the reactor tubes at the entrance and exit of the radiation chamber is confirmed by experimental data. Recommendations are made to ensure the normal thermal conditions of the radiation chamber.

Keywords: tube furnace, reaction tubes, wall burners, combustion, radiation, turbulence

Аммиачная селитра производится за счет нейтрализации азотной кислоты аммиаком в газообразной фазе с последующей кристаллизацией продукта. Тепловой эффект реакции нейтрализации $\text{HNO}_3(\text{ж.}) + \text{NH}_3(\text{г.}) \rightarrow \text{NH}_4\text{NO}_3$ составляет 148,47 кДж/г×моль. Для синтеза аммиака используется водород. На заводе «Аммоний» водород получают паровой конверсией природного газа в трубчатых печах.

Смесь природного газа и водяного пара нагревается в реакционных трубах, которые находятся в камере радиации трубчатой печи и воспринимают теплоту от продуктов сгорания углеводородного топлива и раскаленных стен печи. Процесс ведется под давлением 3,2 МПа в зависимости от требуемого состава смеси газов при температуре на выходе не более 832 °С. Затем конвертируемый газ из трубчатой печи по-

стует в шахтный реактор на вторичную паровоздушную конверсию. Процессы внутри трубчатых реакторов проводятся на никелевых катализаторах.

До сих пор при проектировании трубчатых печей используются интегральные методы расчета, когда считается, что продукты сгорания во всем объеме камеры радиации имеют одинаковую температуру и футерованные боковые стены камеры также нагреваются равномерно. Нами разработан дифференциальный метод расчета тепло- и массообмена в топочных устройствах, основанный на совместном численном решении кинетического уравнения переноса энергии излучением и уравнений радиационной газовой динамики, записанных в дифференциальной форме [1]. Программный комплекс, реализующий данный метод, в частности, в [2, 3] использовался для численного анализа теплового и аэродинамического режима в камере радиации трубчатой печи с акустическими горелками, расположенными в три яруса на боковых стенах. Основы дифференциального метода были предложены Патанкармом и Сполдингом [4]. В настоящее время есть коммерческие универсальные вычислительные пакеты, например ANSYS FLUENT, CFX, FlowVision и др. Используются отечественные пакеты программ VP2/3, σ -Flow, FLOREAN [5], которые позволяют рассчитывать пространственные течения с учетом горения разнообразного топлива и сложный теплообмен. В [6] описывается зональный метод теплового расчета трубчатых печей, который требует предварительного задания заранее не известных так называемых коэффициентов турбулентного обмена между отдельными зонами. Анализ современных публикаций, посвященных переносу энергии излучением, имеется в [7]. До сих пор для теплового расчета топочных устройств и котельных агрегатов используются и интегральные методы [8]. В отличие от упомянутых работ наш метод позволяет рассчитать локальные параметры в объеме топки, и для учета спектра излучения продуктов сгорания в нашем пакете прикладных программ применяется метод широких полос.

Конвертированный газ для исследуемой печи должен выходить из реакционных труб печи первичного риформинга с температурой не более 832 °С. При проектировании печи расчеты проведены из предположения, что установленные горелки обеспечат равномерное поле температуры в объеме камеры радиации печи на уровне 1200 °С и равномерное распределение тепловых потоков по поверхности трубчатого экрана.

Целью данной работы является с помощью пакета прикладных программ, реализу-

ющих дифференциальный метод теплового расчета топок, определение действительного поля температуры в камере радиации печи и распределения тепловых потоков, чтобы проверить правомерность предварительных предположений и определить наиболее опасные с точки зрения перегрева участки стенки труб реактора.

Материалы и методы исследования

Печь первичного риформинга является основным аппаратом на стадии подготовки газа и предназначена для получения конвертированного газа методом паровой каталитической конверсии углеводородов природного газа. Печь первичного риформинга состоит из двух футерованных обогреваемых камер радиации с принудительной тягой от дымососа.

В камерах радиации печи первичного риформинга расположено 288 шт. реакционных труб с никельсодержащим катализатором R-67R-7H/R-67-7H (общее количество 47,9 м³). Реакционные трубы установлены на специальных подвесках в радиантную зону печи первичного риформинга. Обе радиантные камеры соединены общим газоходом дымовых газов.

Камеры радиации оборудованы настенными горизонтальными горелками (720 шт. в двух камерах) без принудительной подачи воздуха. Для более мягких условий разогрева печи риформинга при пуске проектом предусмотрена установка двух типов горелок различной мощности. Горелки типа Walard WA4 с мощностью 266 Вт расположены в первом ярусе горелок (120 шт.: 30 шт. на одной боковой стене). Горелки типа Walard WA5 с мощностью 530 Вт расположены в остальных пяти ярусах.

На рис. 1 показано поперечное сечение одной камеры радиации печи.

Как видно из рисунка, камера радиации практически симметрична относительно трубчатых реакторов. Вследствие этого расчеты можно проводить только для половины камеры. Глубина камеры составляет 13 м. Таким образом, ширина секции камеры радиации 1 м намного меньше, чем высота (13,6 м) и глубина камеры радиации, что позволяет рассматривать задачу сложного тепло и массообмена в двухмерной постановке.

Горелки установлены на одинаковых расстояниях друг от друга в шести горизонтальных рядах по обеим стенкам каждой из камер печи первичного риформинга. Предполагается, что такое расположение горелок обеспечит равномерное распределение тепла по высоте реакционных труб. Каждая реакционная труба имеет внутренний диаметр 127,6 мм и длину 13000 мм, материал реакционных труб – 25Cr35NiNbTi.

Сжигание топливного газа, состоящего в основном из метана, в горелках печи первичного риформинга производится при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,1$, который через регистры самой горелки засасывается из атмосферы.

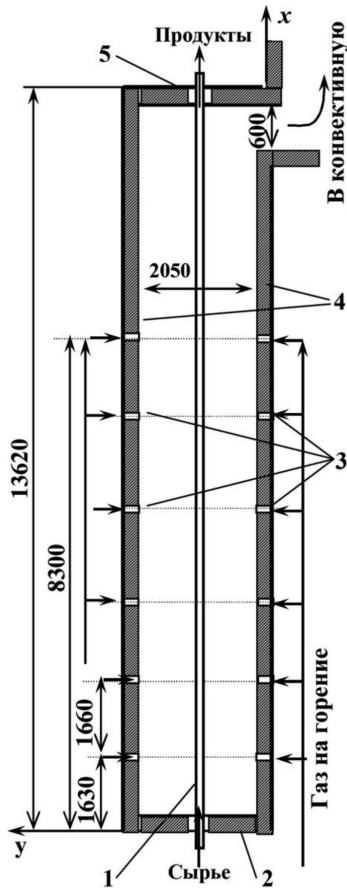


Рис. 1. Сечение камеры радиации:
1 – реакционные трубы; 2 – под;
3 – горелки; 4 – боковые стены; 5 – свод

Перепад давления печи первичного риформинга не более 0,33 МПа контролируется в центральном пункте управления (ЦПУ) по прибору 1-РДАН-12036. Максимальное значение перепада давления печи 0,35 МПа сигнализируется в ЦПУ.

Часть тепла, получаемого при сжигании топливного газа в горелках, передается реакционным трубам печи первичного риформинга. Остальная часть тепла (за исключением потерь тепла через стенки) отводится из камер сжигания с дымовыми газами в конвекционную зону печи первичного риформинга и используется для нагрева технологических потоков. Для этой цели в дымоходе размещены змеевики различного назначения.

Температура дымовых газов на выходе из каждой камеры радиантной зоны печи первичного риформинга (вход в зону конвекции) должна быть не более 1060 °С, измеряется по 1-ТАН-12025А и 1-ТАН-12025В. Предусмотрена сигнализация в ЦПУ высокой температуры 1075 °С дымовых газов.

Разрежение на выходе из каждой камеры радиантной зоны печи первичного риформинга замеряется вакуумметрами 1-РГ-12020А,В по месту и составляет от минус 40 до минус 100 Па (от минус 4,0 до минус 10 мм вод. ст.).

Математическая модель сложного тепло- и массообмена в камере радиации печи включает уравнение энергии (1), двухмерных уравнений переноса излучения в приближении метода дискретных ординат (2), турбулентного движения газовой смеси (представлено в векторной форме) (3), двухпараметрической $k-\epsilon$ модели турбулентности (4), неразрывности и состояния газов (5), конвективно-диффузионного уравнения переноса компонентов топлива и воздуха (6):

$$\frac{D}{Dt} \left(U + \frac{\rho \bar{u}^2}{2} \right) = \text{div} \mathbf{q}_k + \text{div} \mathbf{q}_k + \text{div} \mathbf{q}_p + \text{div} \mathbf{q}_{\text{хим}} \quad (1)$$

$$\mu_m \frac{\partial I_m^k}{\partial x} + \xi_m \frac{\partial I_m^k}{\partial y} = \alpha_k \int_{\lambda_{k-1}}^{\lambda_k} I_{b\lambda} d\lambda - (\alpha_k + \beta_k) I_m^k + \frac{\beta_k}{4\pi} \sum_{m'=1}^{N_o} w_{m'} \Phi_{m'm} I_{m'}^k \quad (2)$$

$$\rho(\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{u}} = -\nabla p - [\nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}^{(l)}] - [\nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}^{(T)}] + \bar{f} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0, p = \frac{\rho}{\mu_{\text{см}}} RT \quad (5)$$

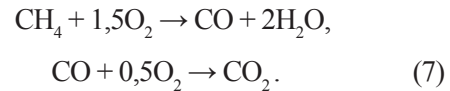
$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho u m_r) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v m_r) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_r \frac{\partial m_r}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_r \frac{\partial m_r}{\partial y} \right) + S_r \quad (6)$$

Здесь $\mathbf{q}_k, \mathbf{q}_r, \mathbf{q}_p, \mathbf{q}_{\text{хим}}$ – векторы плотности конвективного, кондуктивного и радиационного потоков энергии и связанного с реакциями горения топлива (аборта сил внешнего давления включена в \mathbf{q}_k ; I_m^k – спектральная интенсивность излучения вдоль ограниченного числа направлений $S_m \{m = 1, N_o\}$, эти направления задаются набором угловых координат $\{\mu_m, \xi_m\}$; $I_{bk}(T)$ – спектральная интенсивность излучения черного тела при температуре T ; α_k, β_k – осредненные спектральные коэффициенты поглощения и рассеяния; w_m – весовые коэффициенты [1]; u, v – компоненты скорости \mathbf{u} продуктов сгорания вдоль осей x и y ; $\bar{\tau}^{(l)}$ – тензор вязких напряжений; $\bar{\tau}^{(T)}$ – тензор напряжений Рейнольдса; ρ – плотность продуктов сгорания; p – давление; $\mu_{\text{см}}$ – молярная масса смеси газов; R – универсальная газовая постоянная; $\mu_{\text{эф}} = \mu + \mu_t$ – эффективная вязкость (входит в уравнение (3)); коэффициенты турбулентной вязкости и теплопроводности вычисляются по формулам $\mu_t = c_f \rho k^2 / \epsilon$, $\lambda_t = c_p \mu_t / Pr_t$, где Pr_t – турбулентное число Прандтля; $f_1 = -\rho g(1 - \beta(T - T_\infty))$ – массовая сила, где $\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}$ – коэффициент объемного расширения, g – ускорение свободного падения, $T_\infty = 290 \text{ K}$ – температура, принимаемая за начало отсчета при учете архимедовых сил; $\phi = \{k, \epsilon\}$; k, ϵ – кинетическая энергия турбулентных пульсаций и скорость ее диссипации; S_ϕ – источниковый член [9]; $\Gamma_\phi = \mu + \mu_t / \sigma_\phi$ – коэффициент переноса в (4); $m_r, m_{\text{ок}}$ – массовые концентрации горючего и воздуха; $S_r = 0,53 \rho g_r \epsilon / k$ – скорость химической реакции, определяемая по модели «обрыва вихрей» [10], $g_r = 2,27 \frac{\mu_t k}{\rho \epsilon} \left(\frac{\partial m_r}{\partial y} \right)^2$ – среднеквадратичная пульсационная составляющая горючего; $\Gamma_r = \mu / \sigma_r$ – коэффициент переноса в (6), где σ_r – число Шмидта. Значения констант k – ϵ модели и выражения для f_μ взяты согласно рекомендациям [9].

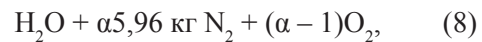
Уравнению вида (6) удовлетворяет также $m_{\text{ок}}$. Источниковый член уравнения для

массовой концентрации окислителя определяется соотношением $S_{\text{ок}} = S_r A$, где A – стехиометрическое количество воздуха для сгорания 1 кг горючего ($\Gamma_r = \Gamma_{\text{ок}}$).

Определение спектральных коэффициентов поглощения газов рассчитывается исходя из распределения мольных долей H_2O , CO_2 и CO в объеме камеры радиации. Для их определения использовали модель горения метана в две стадии:



В данной работе предполагается полное сгорание метана с образованием в конечных продуктах CO_2 и H_2O , N_2 , O_2 :



где α – коэффициент избытка воздуха.

Вычисление излучения продуктов сгорания проводилось с использованием спектральной модели широкой полосы, которая учитывает полосы 1,5; 2,7; 6,3; 10 мкм спектра излучения водяного пара и 2,7; 4,3; 15 мкм у двуокиси углерода. Уравнение переноса излучения (2) решается для каждой полосы отдельно, и лучистые потоки определяются суммированием по спектральным полосам.

Уравнениям задаются граничные условия, которые подробно рассмотрены в [1, 2]. Методы получения дискретных аналогов уравнений математической модели и методы их численного решения приведены в [1].

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 показаны изотермы продуктов сгорания в поперечном сечении половины одной камеры радиации печи, проходящей через оси горелок в средней части камеры, полученные расчетным путем, и система координат. Для удобства расположения изображение представлено повернутым на 90° .

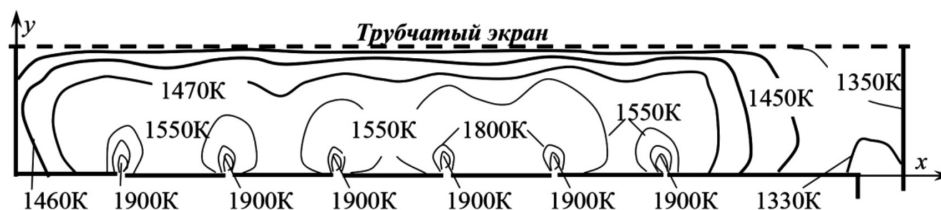


Рис. 2. Поле температуры на половине камеры радиации печи и система координат

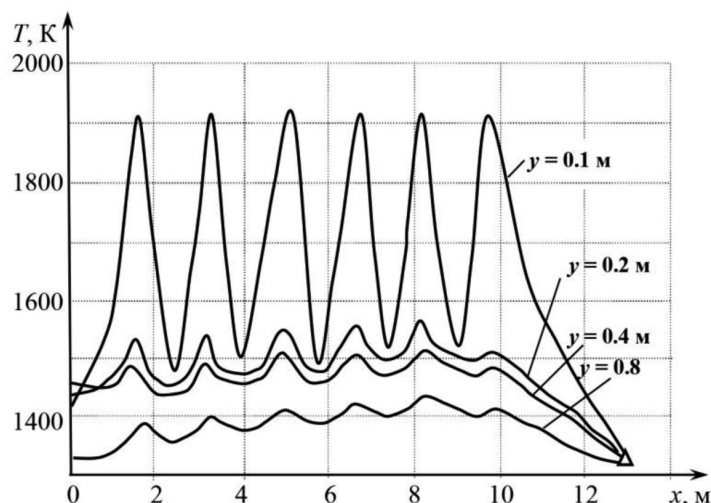


Рис. 3. Изменение температуры продуктов сгорания по высоте камеры радиации на разных расстояниях y от боковой стенки: \blacktriangle опытное значение на перевале

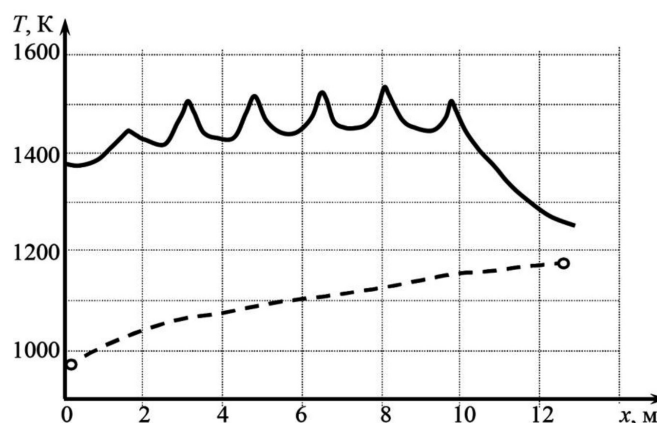


Рис. 4. Изменение внутренней поверхности боковой поверхности футеровки (сплошная линия) и наружной поверхности реакционных труб \circ (– опытные данные)

На рис. 3 представлен график изменения температуры продуктов сгорания по высоте камеры радиации x на разных расстояниях y от боковой футерованной стены, где расположены ярусы горелок (рис. 1 и 2). Там же показано и опытное значение температуры дымовых газов на перевале.

На рис. 4 показано изменение температуры внутренней поверхности футеровки боковой стенки камеры радиации и наружной стенки реакционной трубы по высоте камеры, полученные расчетом по нашей программе, а также опытные значения температуры наружной стенки труб на входе и выходе из камеры радиации, которые удовлетворительно согласуются с опытными данными.

Как было отмечено выше, проектные тепловые расчеты выполнены из предположения одинаковой температуры дымовых газов во всей камере радиации $1200\text{ }^\circ\text{C}$ (1473 K) по интегральному методу. Как видно из рис. 3 и 4, действительное поле температуры получается весьма неоднородным. Предполагаемый уровень температуры получается только ближе к трубчатому экрану. В то же время на перевале (переход в конвекционную секцию) температура газов соответствует проектному значению.

На рис. 5 показаны графики изменения поверхностных плотностей суммарных тепловых потоков по высоте камере радиации печи.

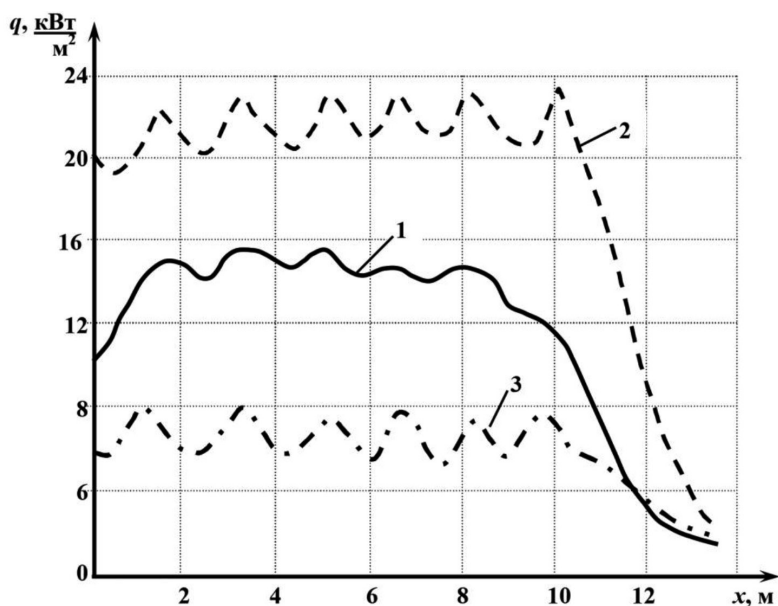


Рис. 5. Поверхностные плотности тепловых потоков по высоте камеры радиации: 1) плотности тепловых потоков вдоль реакционных труб; 2) плотности лучистых потоков, падающих к боковой стенке; 3) плотности тепловых потоков, исходящих от боковой стенки к реакционным трубам

Температура дымовых газов не более 1060 °С в общем дымоходе печи первичного риформинга (выход из камеры радиации) контролируется в центральном пульте управления (ЦПУ) по прибору 1-ТІАН-12026 с сигнализацией максимальной температуры 1075 °С. При достижении минимальной температуры дымовых газов по 1-TNLL-12026 равной 1015 °С в ЦПУ срабатывает аварийная сигнализация. Как видно из рис. 3, расчетные и опытные значения температуры дымовых газов хорошо согласуются в пределах изменения температуры при нормальном режиме эксплуатации печи.

Конвертированный газ выходит из реакционных труб печи первичного риформинга с температурой не более 832 °С и поступает в горячие выходные коллекторы печи первичного риформинга в количестве 6 шт. Температура на выходе из каждого горячего выходного коллектора замеряется по приборам 1-ТІАН-12033А,В,С,Д,Е,Ф с сигнализацией максимальной температуры выходящего конвертированного газа равной 843 °С.

Конвертированный газ после горячих выходных коллекторов печи первичного риформинга поступает в футерованный передаточный коллектор и далее направляется для окончательной конверсии метана в реакторе вторичного риформинга.

Как показывают наши расчеты, равномерного распределения теплоты по высоте

реакционных труб не получается. Основная часть реакционным трубам передается за счет излучения продуктов сгорания, а часть от нагретых футерованных поверхностей стен (в основном боковых). Но лучистые потоки от боковых стен полностью достигают реакционных труб только в окнах спектральной прозрачности газов, а в других спектральных диапазонах они вновь поглощаются и переизлучаются продуктами сгорания.

Выводы

1. Программный комплекс, реализующий дифференциальный метод теплового расчета топок, позволяет рассчитать локальные значения температур и скоростей продуктов сгорания, а также ограничивающих поверхностей при расположении настенных горелок в 6 ярусов на боковых стенах камеры радиации трубчатой печи первичного риформинга.

2. Расчетные значения температуры дымовых газов на перевале печи, наружной стенки трубчатых труб у входа и выхода из камеры радиации хорошо согласуются с опытными данными. При получении конвертированного газа для синтеза аммиака, метанола рабочая температура стенок материала реакционных труб должна составить не более 901 °С. Температура замеряется переносным пирометром. Как видно из наших расчетов, максимальная температура

получается на выходе из камеры радиации и при нормальном режиме эксплуатации печи не превышает допустимого значения. Превышение допустимой температуры стенок труб ведет к сокращению их срока службы.

3. Даже при использовании большого количества настенных горелок обеспечить равномерное поле температуры в топочной камере и равномерное распределение тепловых потоков вдоль реакционных труб не удастся. Однако даже в этом случае обеспечивается передача необходимого количества теплоты к реакционным трубам для проведения паровой конверсии углеводородов и получения необходимой температуры реакционной смеси на выходе из реакционных труб.

4. Как показывают расчеты, максимумы температуры и тепловых потоков располагаются на уровне расположения ярусов горелок. Поэтому, чтобы не допустить местного перегрева труб, необходимо контролировать равномерный расход топливного газа на отдельные ярусы горелок и следить за режимом горения. Правильное пламя горелки должно иметь синий цвет с желтым (солomonным) кончиком. В случае если пламя желтое, горение происходит не полностью и требуется подавать больше воздуха через регистры для сгорания. Избыток воздуха придаст пламени горелки ясный синий цвет без желтого кончика.

Список литературы

1. Вафин Д.Б. Сложный теплообмен: радиационный теплообмен в энергетических установках. Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 251 с.
2. Vafin D.B., Sadykov A.V. Thermal calculation for a furnace with three-tiered near-wall burners. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2016. Vol. 23. No. 2. P. 281–288. DOI: 10.1134/S0869864316020153.
3. Вафин Д.Б., Садыкова Д.А. Применение дифференциального метода теплового расчета для трубчатых печей с акустическими горелками // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 9–11. С. 2375–2380.
4. Pai B.R., Michelfelder S., Spalding D.B. Prediction of furnace heat transfer with a three-dimensional mathematical model. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1978. V. 21. № 5. P. 571–580.
5. Аскарлова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Бекмухамет А., Бекетаева М.Т., Габитова З.Х. Вычислительный метод исследования горения твердого топлива в камерах сгорания ТЭЦ // *Теплофизика высоких температур*. 2015. Т. 53. № 5. С. 792–802. DOI: 10.7868/S004036441504002X.
6. Кулешов О.Ю., Седелкин В.М. Методика численного расчета сопряженного теплообмена в технологических трубчатых печах в рамках зонального подхода // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2011. № 5–6. С. 47–54.
7. Tencer J.T. Error Analysis for Radiation Transport / Dissertation doctor of Philosophy. The University of Texas at Austin, 2013. 142 p.
8. Сабитов М.А., Ведерникова Ю.А., Спасибов В.М. Анализ тепловых процессов в котлоагрегате путем имитационного моделирования // *Современные наукоемкие технологии*. 2018. № 10. С. 109–112.
9. Волков К.Н. Сравнение низкорейнольдсовых моделей турбулентности с данными прямого численного моделирования течения в канале // *Теплофизика и аэромеханика*. 2005. Т. 12. №3. С. 365–378.
10. Spalding D.B. Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames / 13 th International Symposium of combustion: The Combustion Institute, Pittsburgh, 1970. P. 649–657.