

подтвердил работоспособность предлагаемого алгоритма.

Заключение

Предлагаемый в работе подход позволяет синтезировать систему управления, близкую к термодинамически совершенной. Такая система обеспечивает минимизацию диссипации энергии в среднем за время процесса при гарантированной и заданной интенсивности теплового потока. Практическое применение таких систем особенно актуально для объектов с распределенными параметрами, отличающихся большой энергоемкостью.

Литература

1. Кунце В. Технология солода и пива. - СПб: Издательство Профессия, 2008. - 1200 с.
2. Математические методы термодинамики при конечном времени/ В.А. Миронова, С.А. Амелькин, А.М. Цирлин. – М.: Химия, 2000. 384 с.
3. Цирлин А.М. Методы оптимизации в необратимой термодинамике и макроэкономике. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 416 с.
4. Техническая термодинамика. Учебник для вузов / под ред. В.И.Крутова. М.: Высшая школа. 1981. - 438 с.
5. В.К. Андреев, Ю.А. Гапоненко, О.Н.Гончарова, В.В. Пухначев. Современные математические модели конвекции. - М.: Физматлит, 2008. - 368 с.
6. Гетлинг А.В. Конвекция Рэлея-Бенара. Структуры и динамика. - М.: Эдиториал. УРСС, 1999. - 248 с.
7. Кротов В.Ф., Гурман В.И. Методы и задачи оптимального управления. – М.: Наука, 1973. – 448 с.
8. Энергосберегающий алгоритм оптимального управления температурой брожения пива (термодинамический подход). / А.Ю. Артющкин, В.И. Карпов, А.В. Татаринцов // Известия вузов. Пищевая технология. - 2010. - № 4. - с. 103-106.

Исследование влияния состава топлива на радиационный теплоперенос в радиантной камере трубчатых печей

Веткин А.В., д.т.н. проф. Сурис А.Л.
Университет машиностроения
8(499) 267-12-10, avetkin@mail.ru

Аннотация. Выполнены численные исследования, на основании которых предложены зависимости, позволяющие оценить влияние состава газообразного топлива, характеристик горелочных устройств, наружной температуры труб и размеров радиантной камеры трубчатых печей нефтеперерабатывающих заводов на радиационный теплоперенос в камере сгорания при переводе печи с природного газа на газообразное топливо другого состава.

Ключевые слова: трубчатая печь, состав топлива, коэффициент ослабления луча, степень черноты, радиационный теплоперенос.

В последнее время в трубчатых печах нефтеперерабатывающих заводов во многих случаях используется газообразное топливо, состав которого существенно отличается от состава природного газа. Это связано с необходимостью использования отходящих горючих газов от различных установок. Эти газы могут содержать большое количество тяжёлых алканов, непредельные углеводороды, азот. Кроме того, в некоторых случаях топливный газ трубчатых печей может содержать очень высокую концентрацию водорода (иногда – выше 90 %). В этой связи представляет интерес исследовать влияние изменения состава топлива на характеристики печей, спроектированных для работы на природном газе.

В настоящей работе представлены результаты исследований воздействия состава топ-

лива, метода его сжигания, наружной температуры труб и размеров радиантной камеры на свойства продуктов горения и радиационный теплообмен в печах разного размера.

Численное исследование проводилось как для сжигания топлив, состоящих лишь из одного компонента (CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , H_2), так и для их смесей, а также смесей, включающих непредельные углеводороды (C_2H_4 , C_3H_6) и азот. На некоторых заводах концентрация непредельных углеводородов может достигать до 40%, а концентрация азота – до 10%.

Изменение состава топлива влияет на его теплотворную способность, температуру горения, на концентрацию излучающих газов в продуктах горения (водяного пара, диоксида углерода, оксидов серы), а также на излучательные характеристики факела, который может содержать также сажевые частицы.

В настоящее время всё большее применение находят горелки, позволяющие осуществлять ступенчатое сжигание топлива, включающее зоны диффузионного горения с высокой концентрацией сажевых частиц, оказывающих существенное влияние на теплообмен излучением в радиантной камере трубчатых печей. Использование таких горелок позволяет снизить концентрацию оксидов азота в продуктах горения. Влияние факела, содержащего сажевые частицы, на радиационный теплообмен в камере сгорания определяется размером факела и концентрацией этих частиц. При численном исследовании теплопереноса в камерах сгорания это влияние учитывается специальным коэффициентом m .

Представляет также интерес оценить влияние различных составов топлива, имеющих одно и то же соотношение $CH = NC/NH$ чисел атомов углерода (NC) и водорода (NH). При одинаковых CH для одних и тех же коэффициентов избытка воздуха состав продуктов горения один и тот же, но теплотворная способность топлива разного состава и, соответственно, теоретическая температура горения различны, что, в свою очередь, влияет как на степень черноты продуктов, так и на теплоперенос в целом.

При исследовании соотношение CH в топливе варьировалось в диапазоне от 0,25 до 0,4, что отвечает составам топлив, используемых в настоящее время на нефтеперерабатывающих заводах.

Численное исследование проводилось для коэффициента избытка воздуха α , равного 1,15, что соответствует требованиям стандартов, регламентирующих работу трубчатых печей нефтеперерабатывающих заводов.

Температура продуктов горения в радиантной части печи неравномерна. Наибольшее возможное значение этой температуры соответствует адиабатической температуре (T_m), рассчитываемой в предположении отсутствия теплообмена и диссоциации продуктов горения. Эта величина обычно используется при определении некоторой эффективной температуры (T_Σ), рассчитываемой с учётом температуры на выходе камеры сгорания (T_p).

Температура T_p является функцией различных параметров и должна определяться с учётом теплообмена в печи, т.е. зависит от величины тепловоспринимающей поверхности. Нами выполнены численные исследования для различных величин T_Σ с использованием разных значений T_p , а также с учётом процессов диссоциации продуктов горения.

В настоящей работе приведены результаты исследований, полученные при использовании в качестве эффективной температуры продуктов горения адиабатической температуры T_m , что позволяет быстро оценить влияние состава газообразного топлива, характеристик горелочных устройств и размеров радиантной камеры трубчатых печей нефтеперерабатывающих заводов на радиационный теплоперенос в камере сгорания при переводе печи с природного газа на газообразное топливо другого состава.

Оценка влияния состава топлива на теплопередачу в радиантной части печи проводилась с использованием следующего критерия:

$$Kr(CH, S, T_\Sigma, m, T_{CT}) = \frac{q_r(CH, S, T_\Sigma, m, T_{CT})}{q_{rCH_4}(0.25, S, T_\Sigma, m, T_{CT})},$$

где $q_r(CH, S, T_3, m, T_{CT})$ – удельный (на единицу поверхности) радиационный теплоперенос при сжигании топлива с соотношением чисел атомов углерода и водорода в горючих компонентах, равным CH ;

$q_{rCH_4}(0.25, S, T_3, m, T_{CT})$ – удельный (на единицу поверхности) радиационный теплоперенос при сжигании метана ($CH=0.25$);

S – средняя длина пути луча в радиантной камере печи;

T_{CT} – температура наружных стенок труб печи;

m – коэффициент, учитывающий относительное заполнение топочного объёма светящимся сажистым пламенем.

Средняя длина пути луча в камере сгорания печи S варьировалась в процессе исследований в диапазоне 2 – 5 м. Температура наружных стенок труб печи варьировалась в диапазоне 250 – 500 °С.

Коэффициент m изменялся от 0 до 0,3. При $m=0$ предполагается беспламенное сжигание топлива, когда отсутствуют сажевые частицы. Значения m , отличные от 0, учитывают частичное заполнение топочного объёма светящимся сажистым пламенем, что характерно для горелок с частично диффузионным горением, позволяющим снизить концентрацию оксидов азота.

Радиантная камера печи предполагается полностью экранированной тепловоспринимающими трубами. Удельный радиационный теплоперенос от продуктов горения к стенкам камеры сгорания может быть определён следующим образом [1]:

$$q_r(CH, S, T_3, m, T_{CT}) = \sigma \frac{1+a_c}{2} [\varepsilon_g(CH, S, T_3, m)T_3^4 - a_g(CH, S, T_3, m)T_{CT}^4],$$

где a_c – степень черноты поверхности труб, σ – постоянная Стефана – Больцмана, $\varepsilon_g(CH, S, T_3, m)$ и $a_g(CH, S, T_3, m)$ – интегральные значения степени черноты и поглощательной способности газа при соответствующих абсолютных температурах газа и поверхности.

Следует отметить, что адиабатическая температура Tm является функцией CH .

Для определения интегральных значений степени черноты продуктов горения с учётом излучения сажевых частиц использовалась нижеследующая методика, рекомендованная в нормативном методе теплового расчёта котельных агрегатов [2].

Степень черноты дымовых газов:

$$a = ma_{sv} + (1-m)a_g,$$

где:

– степень черноты светящейся части пламени: $a_{sv} = 1 - e^{-k_{cb}pS}$,

– коэффициент ослабления лучей светящейся части пламени $(м \cdot МПа)^{-1}$: $k_{cb} = k_g + k_c$,

– степень черноты несветящейся части пламени: $a_g = 1 - e^{-k_g pS}$,

– коэффициент ослабления лучей трехатомными газами:

$$k_g = \left(\frac{7,8 + 16r_{H_2O}}{\sqrt{\sum r_i V S}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{T_3}{1000} \right) \sum r_i$$

– коэффициент ослабления лучей сажистыми частицами:

$$k_c = 0,3(2 - \alpha) \left[\frac{1,6T_3}{1000} - 0,5 \right] CH,$$

где α – коэффициент избытка воздуха, r_{H_2O} и $\sum r_i$ – доля водяных паров и суммарная доля

трёхатомных газов в продуктах сгорания, p – давление в радиантной части печи, которое принималось равным 0,1 МПа.

На основании численных исследований для величины $Kr(CH, S, T_{\text{г}}, m, t_{\text{ст}})$ получены следующие зависимости:

– для беспламенного сжигания топлива ($m=0$; отсутствуют сажевые частицы):

$$Kr = [(1,139 + 2,034 \cdot 10^{-6} \cdot t_{\text{ст}}) - (7,847 \cdot 10^{-4} - 1,186 \cdot 10^{-6} \cdot t_{\text{ст}}) \cdot S] - [(0,522 + 1,356 \cdot 10^{-6} \cdot t_{\text{ст}}) - (9,658 \cdot 10^{-3} - 4,407 \cdot 10^{-6} \cdot t_{\text{ст}}) \cdot S] \cdot CH$$

– для сжигания топлива, учитывающего частичное заполнение топочного объёма светящимся сажистым пламенем ($m \neq 0$):

$$Kr = [(1,004 - 2,255 \cdot m) - (3,322 \cdot 10^{-5} + 1,118 \cdot 10^{-4} \cdot m) \cdot t_{\text{ст}}] + [(3,333 \cdot 10^{-4} + 0,155 \cdot m) + (6,78 \cdot 10^{-6} - 1,017 \cdot 10^{-5} \cdot m) \cdot t_{\text{ст}}] \cdot S + [((-0,033 + 8,11 \cdot m) + (1,209 \cdot 10^{-4} + 4,135 \cdot 10^{-4} \cdot m) \cdot t_{\text{ст}}) - (0,47 \cdot m + (1,164 \cdot 10^{-5} + 1,015 \cdot 10^{-5} \cdot m) \cdot t_{\text{ст}}) \cdot S] \cdot CH$$

Эти зависимости позволяют оценить влияние состава газообразного топлива ($CH = 0,25 \div 0,4$), характеристик горелочных устройств ($m = 0 \div 0,3$), наружной температуры труб ($t_{\text{ст}} = 250 \div 500$ °C) и размеров радиантной камеры трубчатых печей ($S = 2 \div 5$ м) нефтеперерабатывающих заводов на радиационный теплоперенос в камере сгорания при переводе печи с природного газа на газообразное топливо другого состава. Они могут также использоваться и для других камер сгорания, работающих в том же диапазоне исследованных параметров ($CH, m, S, t_{\text{ст}}$).

Литература

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. - М-Л: «Энергия», 1965.
2. Тепловой расчёт котельных агрегатов (Нормативный метод). Под ред. Н.В. Кузнецова и др., -М.: «Энергия», 1973.

Исследование процесса очистки ливневых сточных вод от нефтепродуктов

Галиева Ю.Р., д.т.н. проф. Сурис А.Л.

Университет машиностроения

8(499) 267-12-10, galieva.julia89@gmail.com

Аннотация. Выполнено исследование установки для очистки ливневых сточных вод от нефтепродуктов. Определены степени очистки при различных исходных концентрациях нефтепродуктов. Получены эмпирические зависимости для степеней очистки на отдельных ступенях установки и проведён статистический анализ.

Ключевые слова: ливневые сточные воды, ультрафильтрация, степень очистки, регрессионный анализ.

Процесс очистки сточных вод является важным элементом защиты окружающей среды. На многих предприятиях существенной проблемой является наличие нефтепродуктов в ливневых сточных водах. Предельно допустимая концентрация по нефтепродуктам на сброс очищенных сточных вод жестко регулируется и составляет для ПДК в воде водных объектов рыбохозяйственного назначения (ПДК РХ) 0,05 мг/л.

Концентрация нефтепродуктов и других загрязняющих веществ на выходе из соответствующей ступени очистки (C) и степень очистки ($y = 1 - C/C_0$) зависят от используемого обо-