

также возрастает, поскольку растет значение коэффициента теплоотдачи, что прямо пропорционально зависит от местных аэродинамических сопротивлений рекуператора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ляндзберг А.Р. Вихревые теплообменники и конденсация в закрученном потоке / Ляндзберг А.Р., Латкин А.С. – Патропавловск-Камчатский: Камчатка ГТУ, 2004. – 149с.
2. Newton P.K. The N-Vortex problem // *Analytical Techniques*, Springer. – 2001. – 145p. Doi: 10.1007/978-1-4684-9290-3.
3. Aref H., Newton P.K., Stremmer M., Tokieda T., Vainchtein D.L. Vortex Crystals. TAM Reports 2002. [Online Resource]. – Asseces mode: http://www.tam.uiuc.edu/publications/tam_reports/2002/1008.pdf.
4. Агеев К.В. Современные тенденции конструирования металлических рекуператоров со вставками для повышения энергоэффективности печных агрегатов / Агеев К.В. // *Науковий вісник НЛТУ України*. – 2014. – Вип. 24.5. – С.155.
5. Агеев К.В. Холодный стенд для исследования работы металлических рекуператоров с активными вставками для повышения энергоэффективности печных агрегатов / Агеев К.В. // *Междисциплинарность как тенденция современной науки: Международный конф.*, 14 июня 2014 г.: тезисы. докл. – Донецк, 2014. – С.25-26.
6. Леухин Ю.Л. Исследование аэродинамики и теплоотдачи в кольцевых каналах циклонных рекуператоров / Леухин Ю.Л., Сабуров Э.Н. // *Современная наука. Исследования, идеи, результаты, технологии*. – 2013. – № 1 (12). – С.123-129.
7. Анохина Е.С. Экспериментальное и численное моделирование стационарных вихревых структур / Анохина Е.С., Шторк С.И., Алексеенко С.В. // *Современная наука: сб. науч. статей*. – 2012. – № 2 (10). – С.68-72.
8. Пат. 104396 Украина, МПК9 F 28 D 1/04, F 23 L 15/04. Рекуператор/ К.В.Агеев; заявник та патентовласник Ін-т газу НАН України. – Опубл. 27.01.14, Бюл. № 2.
9. Агеев К.В. Технология импактных струй в активных вставках рекуператоров для повышения энергоэффективности печных агрегатов (Обзор) / Агеев К.В. // *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. – 2010. – № 4. – С.21-27.
10. Справочник по теплообменникам: в 2-х т. Т. 2 / пер. с англ. под. ред. Мартыненко О.Г. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352с.

Поступила в редколлегию 29.06.2015.

УДК 621.3.011:621.1.016:513.83

ДОЛГОПОЛОВ И.С., к.т.н., доцент
ТУЧИН В.Т., инженер

Днепродзержинский государственный технический университет

ПРИМЕНЕНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЕ СУШИЛКИ

Введение. В настоящее время в мире наблюдается тенденция дефицита ресурсов топлива, в частности, газообразного. Современные масштабы промышленного производства требуют детального исследования режимов процессов горения в каждом конкретном виде энергетического или энерготехнологического агрегата для решения проблем экономии топлива и снижения вредных выбросов. Этим проблемам посвящено большое количество работ, например, [1-4]. При этом решение указанных проблем в приведенных литературных источниках рассматривается в основном в стационарных режимах или фрагментарно. Сжигание газообразного топлива – один из самых распространенных процессов в технологиях, особенностями которого является совместное

протекание в динамике явлений различной физико-химической природы: гидравлической, тепловой, химической, диффузионной. Определяющее значение в этом процессе имеют химические и тепловые явления в условиях рассматриваемого агрегата.

Одним из эффективных методов решения указанных задач – системный подход с использованием математического моделирования термохимических процессов в динамике. Результаты исследований в этом направлении, которые можно применить для практического моделирования процессов горения в промышленных агрегатах, в литературных источниках представлены ограниченно [5].

В предлагаемой работе предпринята попытка системно отразить эти процессы в динамике.

Постановка задачи. Задача работы состоит в применении топологического подхода для моделирования термохимических процессов при сжигании газообразного топлива (природного газа) в теплогенераторе сушилки.

Использование этого подхода при моделировании значительно расширяет возможности математического моделирования, позволяя включить в модель факторы, которые не учитывались ранее. Модели, полученные этим путем, позволяют рассматривать во взаимосвязи химические и тепловые процессы. При этом их можно применить для комплексного решения задач повышения эффективности рассматриваемой технической системы, для обоснованного выбора энергоэффективных конструктивных и режимных параметров теплогенераторов установок и управления процессом в динамике.

Результаты работы. Методика исследований. Определяющими процессами в рассматриваемой ФТС являются термохимические процессы сжигания природного газа, основным компонентом которого является метан. С целью рассмотрения принципиальной стороны картины процессов, происходящих в ФТС, проведем качественный анализ этой системы.

Качественный анализ ФТС подразумевает смысловой и математический аспекты решения задачи.

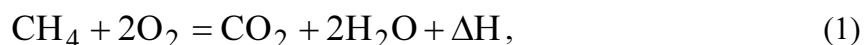
Смысловой аспект предполагает выбор следующих переменных рассматриваемой системы:

а) для описания химических процессов – обобщенная переменная усилия – объемная концентрация вещества C , моль/м³; обобщенная переменная потока – мольный поток (для исходных веществ S_f , для продуктов реакции F), моль/с;

б) для описания тепловых процессов – обобщенная переменная усилия – температура смеси, T , К; обобщенная переменная потока – теплоемкость вещества $m \cdot c$, Дж/с.

Математический аспект решения задачи состоит в получении математических зависимостей, описывающих физико-химические особенности протекания процесса сгорания топлива. Учитывая сложность процессов, происходящих в рассматриваемой системе, выполнен анализ современных представлений о механизме и кинетике горения метана.

В литературных источниках представлена реакция горения метана в атмосфере кислорода в интегральном виде:



где ΔH – тепловой эффект реакции сгорания метана, Дж/моль.

Это уравнение отражает полное преобразование углеводородного соединения при горении его в атмосфере кислорода при атмосферном давлении и температурах 750-2200⁰С.

Основой современных представлений о горении метана в атмосфере кислорода являются результаты работ Н.Н.Семенова, С.Х.Хиншельвуда, В.Н.Кондратьева, Е.Е.Никитина и др. [6-8].

Детальное рассмотрение реакции горения метана в атмосфере кислорода (воздуха)

показывает, что эта реакция идет поэтапно, при этом выделяют три периода [9]: период индукции, период постоянной скорости реакции (период интенсивного образования цепных связей между исходными компонентами и продуктами реакции) и период обрыва цепей в реакции.

Механизм и кинетика горения метана изучались для различных соотношений метана и окислителя.

Основные уравнения, характеризующие химический механизм горения метана, представлены в работах Н.Н.Семенова, Н.В.Лаврова и др. [6-9]. При этом следует отметить, что, в целом, несмотря на значительные успехи в аналитическом представлении горения метана, в литературе отмечается, что от универсальности описания картина еще далека. Значительную помощь в получении уравнений оказывают экспериментальные результаты, современные способы и средства измерений параметров сложного комплекса газодинамических, тепловых, диффузионных, химических процессов, протекающих одновременно.

В производственных технологиях в качестве окислителя используется кислород воздуха, поэтому процесс сгорания метана в атмосфере воздуха сопровождается реакциями образования окислов азота NO_x (NO и NO_2). Рассмотрение этого аспекта процесса представляет отдельную задачу комплекса использования этого вида топлива в производственной деятельности. Однако включение этой задачи в комплекс рассматриваемой проблемы усложняет задачу. Поэтому далее представлены ограничения и упрощения, принятые для получения математической модели этого термохимического процесса в данной работе.

Моделирование процесса сжигания метана осуществлялось в соответствии со стратегией системного подхода к энергоресурсосбережению физико-технологических систем (ФТС) с использованием топологических методов [11-19].

Моделирование термохимических процессов является сложным, так как требует включения в моделирование полных кинетических механизмов горения. В дальнейшем рассматривается метод моделирования, который позволяет получить более доступную для практического использования модель динамики горения. При этом математическим аппаратом системного анализа, наиболее подходящим для решения данной задачи, является топологический подход [11]. С помощью этого подхода могут быть получены топологические и аналитические модели процессов, протекающих в теплогенераторе сушильного агрегата, отражающие динамику этих процессов в параметрическом и энергетическом представлении во взаимосвязи с конструктивно-технологическими характеристиками теплогенератора. В этой работе представлено получение параметрической картины процесса горения.

При этом введены следующие ограничения:

1) природный газ содержит только метан; 2) окислителем является воздух ($\text{N}_2=76,7\%$, $\text{O}_2=23\%$ по массе); 3) сжигание метана идет до образования CO_2 и H_2O ; 4) на первой стадии моделирования не учитываются эффекты химического окисления азота в процессе горения (это обусловлено незначительным по массе количеством продуктов окисления азота в процессе сжигания при высоких коэффициентах расхода воздуха в теплогенераторе и тем, что в этой части исследований не рассматривается экологический аспект проблемы).

В [10] отмечено, что для смесей метан – окислитель, богатых метаном, при описании кинетики реакций следует учитывать изменение концентрации метана и кислорода во времени. И, хотя в соответствии с законом действующих масс интегральное уравнение сгорания метана (1) является уравнением третьего порядка, детальное рассмотрение хода цепной реакции показывает, что в динамике идет процесс непрерывного контакта двух молекул в образующихся цепях. Поэтому для этого случая целесообразно использовать дифференциальные уравнения реакций второго порядка [10]. При этом ограничиваются такими химическими механизмами, в которых элементарная ре-

акция – это группа реакций. Для описания таких реакций на основании опытных данных подбирают параметры закона Аррениуса.

На основании качественного анализа процесса горения разработана топологическая модель процесса горения метана в атмосфере воздуха (рис.1).

При моделировании использованы псевдографы связи. С их помощью модель отражает в динамике материальные и тепловые балансы термохимических реакций горения метана в атмосфере воздуха. Материальные балансы исходных компонентов и продуктов реакции представляют 0 - узлы:

а) природного газа (метана) – узел 0_{1,2,3}; б) кислорода – узел 0_{5,6,7}; в) двуокиси углерода – узел 0_{10,11,12}; г) водяных паров – узел 0_{14,15,16}.

Энергетический баланс реакции представляет узел 0_{18,19,20,21,22,23,24,25,26,27}, связанный с химической частью модели через RS-элемент. Этот элемент, с одной стороны, (поток f₁₇) используется для моделирования кинетики реакции через скорость реакции, т.е.

$$f_{17} = k_0 \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}} \cdot C_A \cdot C_B \cdot V, \quad (2)$$

где k₀ – предэкспоненциальный множитель, E – энергия активации, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К; T – абсолютная температура, К; C_A, C_B – объемные концентрации метана и кислорода соответственно, моль/м³; V – объем реактора, м³.

С другой стороны, этот элемент моделирует второй связью тепловой поток f₁₈, представляемый на базе связи экзотермического эффекта сгорания метана и реакционной кинетики. Аналитическое выражение этого потока представлено зависимостью (3):

$$f_{18} = \Delta H \cdot k_0 \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}} \cdot C_A \cdot C_B \cdot V. \quad (3)$$

На основании приведенной структуры связи получена система уравнений (4), отражающая параметрический функциональный оператор рассматриваемой ФТС. После подстановки конкретных значений параметров и задания начальных условий для расчета на базе функционального оператора сформирован параметрический модуль рассматриваемой системы.

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC_A}{dt} &= \frac{S_{fA} - k_0 \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}} \cdot C_A \cdot C_B \cdot V \cdot k_{3,4}}{V} \\ \frac{dC_B}{dt} &= \frac{S_{fB} - k_0 \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}} \cdot C_A \cdot C_B \cdot V \cdot k_{7,8}}{V} \\ \frac{dC_D}{dt} &= \frac{k_0 \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}} \cdot C_A \cdot C_B \cdot V \cdot k_{9,10} - F_D}{V} \\ \frac{dC_E}{dt} &= \frac{k_0 \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}} \cdot C_A \cdot C_B \cdot V \cdot k_{13,14} - F_E}{V} \\ \frac{dT_{19}}{dt} &= \frac{\Delta H \cdot k_0 \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}} \cdot C_A \cdot C_B \cdot V + m_A \cdot c_{pA} \cdot (T_1 - T_{BAS})}{m_D \cdot c_{pD} + m_E \cdot c_{pE}} + \\ &+ \frac{m_B \cdot c_{pB} \cdot (T_1 - T_{BAS}) - m_D \cdot c_D \cdot (T_{19} - T_1) - m_E \cdot c_E \cdot (T_{19} - T_1)}{m_D \cdot c_{pD} + m_E \cdot c_{pE}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В уравнении (4) приняты обозначения: C_D , C_E – объемные концентрации диоксида углерода и водяных паров соответственно, моль/м³; S_{fA} – мольный поток метана на входе в горелку, моль/с; S_{fB} – мольный поток кислорода на входе в горелку, моль/с; $k_{3,4}, k_{7,8}, k_{9,10}, k_{13,14}$ – стехиометрические коэффициенты уравнения (1), F_D , F_E – мольные потоки продуктов реакции двуоксида углерода и водяного пара соответственно, моль/с; m_A, m_B, m_D, m_E – массы исходных веществ и продуктов реакции, кг; $c_{pA}, c_{pB}, c_{pD}, c_{pE}$ – удельные массовые теплоемкости исходных веществ и продуктов реакции соответственно, Дж/(кг·К); T_1 – начальная температура исходных веществ, К; T_{BAS} – базовая температура отсчета, К; T_{19} – температура продуктов сгорания, К.

Анализ результатов. Результаты расчета изменения концентраций исходных веществ и продуктов реакции во времени, температуры продуктов реакции, полученные по параметрическому модулю, представлены на рис.2 и 3.

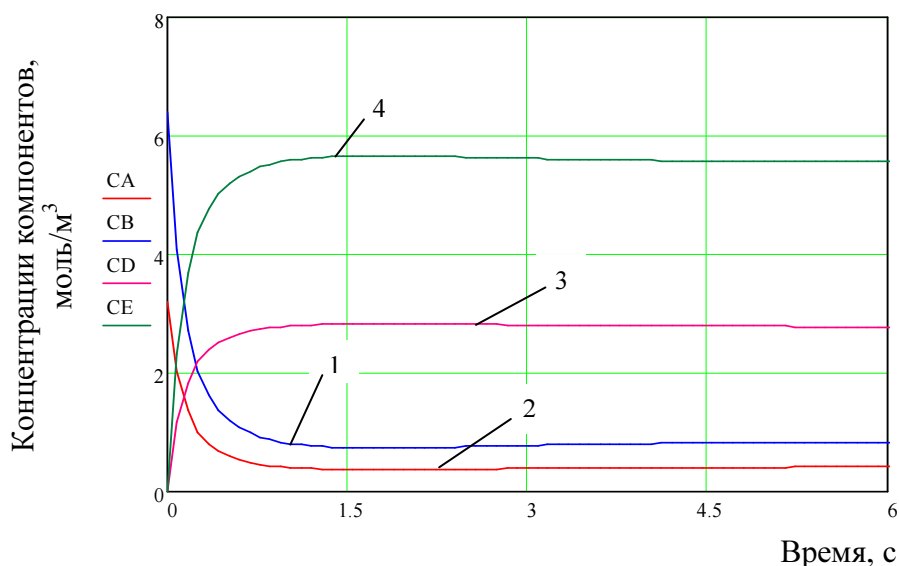


Рисунок 2 – Изменение концентрации метана CA (1), кислорода CB (2), диоксида углерода CD (3) и водяного пара CE (4) во времени в теплогенераторе

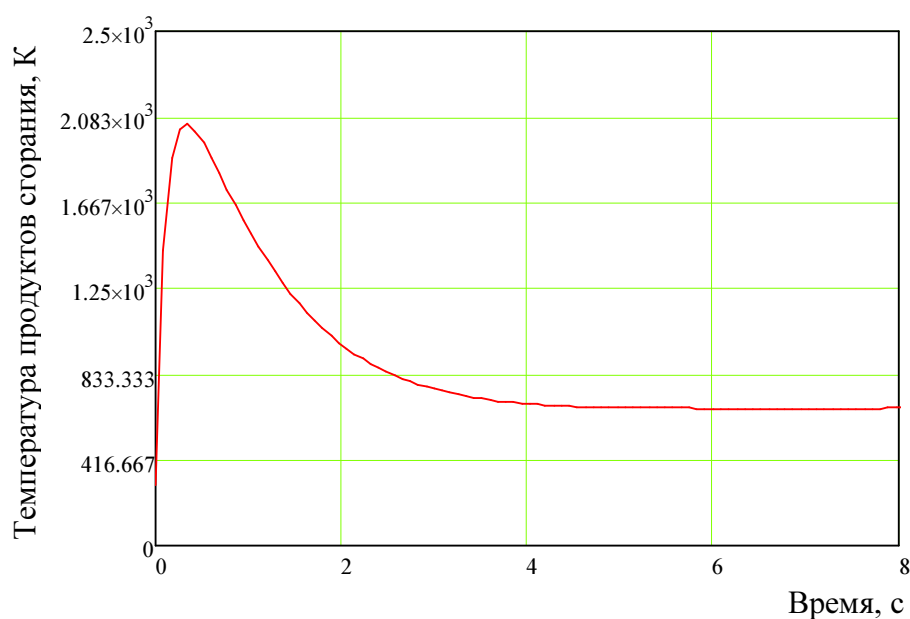


Рисунок 3 – Изменение температуры продуктов сгорания в теплогенераторе во времени

Полученные данные показывают, что изменение концентрации исходных веществ и продуктов реакции происходит в течение 1,5 секунд от начала поступления исходной смеси в теплогенератор, после чего устанавливается стационарный режим, при котором продукты сгорания поступают для дальнейшего использования в технологии (рис.2). Температура продуктов реакции изменяется с большой скоростью в первые две секунды от начала реакции (рис.3), затем наблюдается максимум температуры, после которого к 6-ой секунде устанавливается стационарная температура продуктов реакции, при которой они выходят из теплогенератора. На рисунках показаны зависимости, которые отражают процессы сжигания природного газа в теплогенераторе с коэффициентом расхода воздуха $\alpha=7$, при котором обеспечивается заданная температура на выходе из теплогенератора.

Данные экспериментов, проведенных на действующем теплогенераторе, подтверждают результаты, полученные по рассмотренной модели.

На основе результатов исследований предложены энергоресурсосберегающие конструкции теплогенераторов промышленной барабанной сушилки.

Выводы.

1. Рассмотрена методика топологического моделирования теплогенератора сушильной установки, работающей на газообразном топливе.
2. Представлена математическая модель динамики термохимических процессов, происходящих в теплогенераторе.
3. Результаты работы используются для разработки энергоресурсосберегающих технологий и оборудования сушильного агрегата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Померанцев В. В. Основы практической теории горения / [Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. и др.]; под ред. В.В.Померанцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312с.
2. Горелочные устройства промышленных печей и топок (конструкции и технические характеристики): справочник /А.А.Винтовкин, М.Г.Ладыгичев, В.Л.Гусовский, Т.В.Калинова. – М.: Интермет Инжиниринг, 1999. – 560с.
3. Равич М.Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов / Равич М.Б. – 5-е изд. – М.: Наука, 1966. –415с.
4. Носач В.Г. Энергия топлива / Носач В.Г. – К.: Наукова думка, 1990. – 148с.
5. On bond graph modelling of thermal-chemical processes / Monica Roman, Eugen Bobasu, Eugen Iancu. Dorin Sendresku // Acta Montanistica Slovaca; Rochnic 15 (2010), cislo 1. – P.31-37.
6. Семенов Н.Н. Цепные реакции / Семенов Н.Н. – Л.: Госхимтехиздат, 1934. – 555с.
7. Семенов Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности / Семенов Н.Н. – М.: Изд. АН СССР, 1958. – 686с.
8. Кондратьев В.Н. Химические процессы в газах / Кондратьев В.Н., Никитин Е.Е. – М.: Наука, 1986. – 264с.
9. Лавров В.Н. Физико-химические основы горения топлива / Лавров В.Н. – М.: Наука. 1971. – 275с.
10. Долгополов И.С., Научные основы энергоресурсосбережения с позиций эксерго - и энергоэффективного анализа физико-технологических систем / Долгополов И.С., Тучин В.Т., Садовой А.В. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2013. – 379с.
11. Galiullin T.R. Hydrogas-dynamic processing slag-coating application to the oxygen-converter lining: A topological approach to simulation / T.R.Galiullin, V.T.Tuchin,

- A.G.Chernyatevichetc // Journal Steel in Translation. – 2008. – №10, v. 38. – P.800-806.
12. Тучин В.Т. Основы формализма топологоэксергетического метода моделирования физико-технологических систем / В.Т.Тучин, И.С. Долгополов // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета (технические науки) / Днепродзержинск: ДДТУ. – 2006. – С.202-213.
 13. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип формализации / Кафаров В.В., Дорохов И.Н. – М.: Наука, 1979. – 394с.
 14. Rosenberg R.C. Introduction to Physical System Dynamic / Rosenberg R.C., Karnopp D.C. – New York: McGraw-Hill Inc., 1983. – 420p.
 15. Развитие научных основ энергоресурсосбережения физико-технологических систем (стратегия и тактика системного подхода к проблеме энергоресурсосбережения) Часть 1, 2 / Тучин В.Т., Долгополов И.С., Садовой А.В., Тищенко Н.Т. // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: IX Міжнар. наук.-практ. конф., 2013 р.: зб. наук. статей. – Х.: Райдер – УкрНДІЕП, 2013. – Том 2. – С.265-275.
 16. Тучин В.Т. Топологический подход к определению эффективности совмещенных процессов химической реакции и диффузии / Тучин В.Т., Долгополов И.С., Тучин С.В. // *Металлургическая теплотехника: сб. науч. трудов.* – Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины. – 2001. – Том 4. – С.20-26.
 17. Системный подход к моделированию массообменных процессов разложения карбоната свинца в аппарате фонтанирующего слоя / Тучин В.Т., Дорохов И.Н., Горбачевич Л.Л., Пинскер Е.А. // *Современные машины и аппараты химических производств: Вторая Всесоюзн. науч. конф., 1980: материалы.* – Чимкент, 1980. – Т. 1. – С.149-152.
 18. Тучин В.Т. Топологоэксергетический подход к анализу физико-технологических систем (ФТС) осложнённых химическими реакциями / учин В.Т., Долгополов И.С., Роменская Н.А. // *Математичне моделювання.* – 2005. – №2 (14). – С.18-24.

Поступила в редколлегию 03.06.2015.