

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»**

На правах рукописи

Санаева Галина Николаевна



**Разработка системы управления технологической безопасностью
процесса производства ацетилен-окислительным пиролизом
природного газа**

05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (химическая технология, нефтехимия и нефтепереработка, биотехнология)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре автоматизации производственных процессов Новомосковского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Научный руководитель: доцент, кандидат технических наук Пророков Анатолий Евгеньевич, доцент кафедры «Вычислительная техника и информационные технологии» Новомосковского института (филиала) ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор,

Матвеев Юрий Николаевич

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет (ТвГТУ)», кафедра «Электронные вычислительные машины», профессор

кандидат технических наук, доцент
Тарасов Валерий Борисович

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кафедра «Компьютерные системы автоматизации производства», доцент

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»)

Защита состоится «24» июня 2021 г. в 11.00 на заседании диссертационного совета РХТУ.05.06 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, г. Москва, Миусская пл., д.9, ауд. 443, конференц-зал)

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

https://muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/

Автореферат разослан « » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета РХТУ.05.06
к.т.н., доцент



Женса А.В.

Актуальность работы. Эффективность современных химических производств в значительной степени зависит от соблюдения требований к обеспечению безопасности и эффективности функционирования химико-технологических процессов (ХТП), в связи с чем возникает необходимость разработки новых подходов к диагностике состояний и управлению безопасностью химико-технологических систем (ХТС) на основе использования современных информационных технологий и интеллектуальных средств поддержки принятия решений. Для большинства потенциально опасных производств, к которым относятся, в том числе и производства органического синтеза, задачи определения состояний для целей обеспечения безопасности в различных ситуациях, возникающих в технологическом цикле, являются особенно актуальными. В данной работе рассматривается процесс производства ацетиленом окислительным пиролизом природного газа (ПАОППГ), характеризующийся повышенной взрыво- и пожароопасностью, для которого повышение эффективности его функционирования неразрывно связано с обязательным обеспечением его технологической безопасности.

Степень разработанности темы. Теоретические основы создания систем технической диагностики и управления технологической безопасностью химических производств разработаны в трудах академика АН ССР В.В. Кафарова, академика РАН В.П. Мешалкина, профессоров А.Ф. Егорова, Т.В. Савицкой, Б.В. Палуха, В.Н. Богатикова, Н.А. Северцева, В.И. Тихонова, В.И. Мищенко, А.В. Мозголевского, Е.И. Сычева, Н.А. Скляревича, В.К. Дедкова и др. Решение проблемы обеспечения технологической безопасности промышленных процессов сопровождается поиском новых и усовершенствованием зарекомендовавших себя на практике подходов и методов. При этом необходимо решать ряд теоретических и практических задач, специфичных для данной области деятельности – области обеспечения технологической безопасности промышленных предприятий.

Цель работы заключается в исследовании и развитии основных теоретических и прикладных подходов к созданию системы управления технологической безопасностью процесса ПАОППГ в условиях неопределенности.

Задачи, решаемые в диссертационной работе:

- На основании проведенного анализа современных подходов в принятии решений при управлении сложным динамическим объектом в условиях неопределенности

разработать функциональную структуру и алгоритмы принятия решений системы на основе определения центра безопасности и области безопасности.

- Обосновать применение математических моделей непрерывных ХТП для оценки состояний объекта управления в условиях неопределенности и неполноты информации. Разработать систему оценки параметров модели с использованием аппарата нечеткой логики. Проверить адекватность разработанной модели.
- Разработать алгоритм для диагностики и управления технологической безопасностью процесса ПАОППГ и провести апробацию разработанной системы управления на примере адаптивной системы ситуационного управления ХТП с применением аппарата нечёткой логики.

Научная новизна:

- Разработан алгоритм анализа состояния ХТС на основе применения математических моделей непрерывных ХТП.
- Разработана методика построения структуры ситуационной модели управления безопасностью ХТП на примере процесса ПАОППГ.
- Предложена и исследована система управления процессом окислительного пиролиза на основании определения области безопасности и центра безопасности.
- Предложен и теоретически обоснован метод построения диагностических моделей развития опасностей на основе метода разделения состояний.

Практическая значимость:

- Разработана методика расчета центра технологической безопасности процесса ПАОППГ с помощью нелинейного программирования.
- Разработано алгоритмическое и программное обеспечение системы оценки состояний и принятия решений по управлению технологической безопасностью процесса окислительного пиролиза.
- Предложен алгоритм динамической коррекции заданий регуляторов при функционировании ХТП ПАОППГ с использованием аппарата нечёткой логики.

Основная теоретическая значимость работы заключается в разработке системы управления процессом ПАОППГ, обеспечивающей его безопасное функционирование, что позволяет снизить себестоимость производства ацетилена (требуемого товарного продукта) за счёт уменьшения расхода сырья, энергии, времени и других ресурсов, используемых в процессе.

Достоверность результатов исследования основана на использовании экспериментальных исходных данных; применении аппарата нечеткой логики;

согласовании полученных результатов с известными теоретическими положениями и имеющимися статистическими данными; результатами имитационного моделирования.

Личный вклад автора заключается в проведении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая обработку и обобщение экспериментальных данных и исследований, анализ и оформление результатов в виде научных публикаций и докладов на научных конференциях.

Объект исследования представлен в работе процессом окислительного пиролиза природного газа цеха ацетиленов на предприятиях НХК «Еврохим».

Предмет исследования: система управления реактором окислительного пиролиза.

Методы исследования: методы нечетких множеств, методы исследования операций и системного анализа, методы проектирования информационных систем, методы математического моделирования и оптимизации ХТП.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель реактора окислительного пиролиза, построенная на основе математических моделей непрерывных ХТП.

2. Двухуровневая система управления процессом окислительного пиролиза на базе использования аппарата нечеткой логики.

3. Программный комплекс, позволяющий рассчитывать наилучшие технологические режимы ведения ХТП.

4. Структура и алгоритм эксплуатации верхнего уровня системы автоматизированного управления процессом.

Апробация работы: V Международная научно-техническая конференция «Энергетика, информатика, инновации». Смоленск, 2015; Международная научно-практическая конференция «Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности (МНПК ЛЭРЭП-9-2015)», Смоленск, 2015; V Международная конференция-школа по химической технологии ХТ'16, Волгоград, 2016; XII Международная научно-практическая конференция «Современные сложные системы управления: HTCS'2017». Липецк, 2017; Первая Всероссийская научно-практическая конференция «Нечеткие системы и мягкие вычисления. Промышленные применения. Fuzzy Technologies in the Industry (FTI-2017)», Ульяновск, 2017; International Conference of Artificial Intelligence, Medical

Engineering, Education (AIMEE2017). Москва, 2017; The Second International Conference of Artificial Intelligence, Medical Engineering, Education (AIMEE2018), Москва, 2018; II International Scientific and Practical Conference “Fuzzy Technologies in the Industry – FTI 2018”, Ульяновск, 2018; XXXII - Международная научная конференция «Математические Методы в Технике и Технологиях ММТТ-32», Санкт-Петербург, 2019; XXXIII Международная научная конференция "Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-33", Казань, 2020, «Инжиниринг предприятий и управление знаниями» (ИП&УЗ-2020), Москва, 2020.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, отражающих её основные результаты, в том числе: 1 монография, 6 статей в журналах из перечня ВАК, 5 статей в журналах, включенных в международную реферативную базу данных Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы, включающего 154 источника. Работа изложена на 143 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунка и 12 таблиц.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ «Исследование рисков при управлении динамическими процессами в слабоструктурированных и плохо формализуемых средах», проект № 17-07-01368.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, положения, выносимые на защиту, сформулированы основные цели, задачи исследования и представлены методы их решения.

В первой главе выполнен обзор научно-технической литературы различных способов получения ацетилена в промышленности. Окислительный пиролиз природного газа является одним из наиболее энергоэффективных способов, применение которого особенно целесообразно в тех случаях, когда можно использовать побочно образующийся синтез-газ (в данном случае – для производства метанола).

Окислительный пиролиз природного газа представляет собой сложную ХТС, для которой решение задачи повышения безопасности функционирования требует разработки качественно нового подхода. При этом под технологической

безопасностью понимается свойство ХТС выполнять свои функции без нанесения ущерба окружающей среде, здоровью людей работающих в сфере производства, оборудованию и системе управления; вызывать какие-либо нарушения регламента ведения ХТП по технологическим причинам, способные повлечь за собой составляющие ущерба.

Проанализированы характерные особенности моделей диагностики состояния ХТП, в большинстве из которых число различных состояний определяется путем перебора внештатных производственных ситуаций, что связано со значительными трудовыми и временными затратами. Также зачастую невозможно описание всех возможных состояний, поскольку различные состояния описываются различными наборами переменных, что приводит к размытости формального описания состояний и невозможности однозначного определения их границ.

В данной работе предлагается при принятии решений по управлению ХТП применение методов искусственного интеллекта с использованием аппарата нечёткой логики, позволяющего за счет заложенных в них алгоритмов обучения и адаптации уменьшить погрешность модели, связанную с отсутствием и неполнотой информации.

Во второй главе представлена общая характеристика задачи регулирования процесса ПАОППГ, а также представлено математическое описание этапов процесса окислительного пиролиза: подогрев исходного сырья, перемешивание исходного сырья, окислительный пиролиз, «закалка» продуктов окислительного пиролиза. В качестве объекта моделирования рассматривались последовательно соединённые подогреватель исходных компонентов и реактор окислительного пиролиза. При построении математической модели процесса окислительного пиролиза применялся блочный принцип.

С точки зрения обеспечения технологической безопасности процесса окислительного пиролиза и в соответствии с технологическими особенностями протекания его этапов их математическое описание представлено уравнениями тепловых балансов для подогревателя исходных компонентов для реакции пиролиза:

$$G_{CH_4} \cdot c_{pCH_4} \cdot \rho_{CH_4} \cdot \frac{dT_{CH_4}}{dl} = \frac{K_{TCH_4} \cdot F_{CH_4}}{l_{FCH_4}} (T_{CH_4}^{ex} - T_{CH_4})$$

$$G_{O_2} \cdot c_{pO_2} \cdot \rho_{O_2} \cdot \frac{dT_{O_2}}{dl} = \frac{K_{TO_2} \cdot F_{O_2}}{l_{FO_2}} (T_{O_2}^{ex} - T_{O_2})$$

при начальных условиях $T_{CH_4}|_{l=0} = T_{CH_4}^{ex}$, $T_{O_2}|_{l=0} = T_{O_2}^{ex}$, уравнением материального баланса для смесителя реактора:

$$V_{cm} \cdot \frac{d\rho_{cm}}{dt} = G_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4} + G_{O_2} \cdot \rho_{O_2} - G_{cm} \cdot \rho_{cm},$$

уравнениями кинетики, материального и теплового балансов для зоны реакции:

$$\begin{aligned} \frac{dC_{CH_4}}{dt} = & -3 \cdot k_1 \cdot C_{CH_4} \cdot C_{O_2} + 3 \cdot k_2 \cdot C_{CO} \cdot C_{H_2O} \cdot C_{H_2} - 3 \cdot k_3 \cdot C_{CH_4} \cdot C_{O_2}^2 + \\ & 2 \cdot k_4 \cdot C_{CO_2} \cdot C_{H_2O}^2 - 4 \cdot k_5 \cdot C_{CH_4}^2 + 2 \cdot k_6 \cdot C_{C_2H_2} \cdot C_{H_2}^3 \\ V_p \cdot \rho_{cm} \cdot \frac{m_{CH_4}}{m_{cm}} \cdot \frac{dC_{CH_4}}{dt} = & G_{cm} \cdot \rho_{cm} \cdot \frac{m_{CH_4}}{m_{cm}} \cdot (C_{CH_4}^{BX} - C_{CH_4}) - \omega_{CH_4}^{(1)} \cdot V_p \cdot m_{CH_4}, \\ c \cdot \rho \cdot V_p \cdot \frac{dT^{BYX}}{dt} = & G_{CH_4} \cdot r_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4} + c \cdot \rho \cdot G_{ГП} \cdot (T^{BYX} - T^{BX}) - Q_3 - Q_5 \end{aligned}$$

и уравнениями тепловых балансов для зоны «закалки» (для воды на «закалку» и газа пиролиза):

$$\begin{aligned} \rho_{ГП} \cdot c_{ГП} \cdot V_3 \cdot \frac{dT_{ГП}}{dt} = & G_{ГП} \cdot c_{ГП} \cdot \rho_{ГП} \cdot (T_{ГП}^{BX} - T_{ГП}) \\ \rho_{B3} \cdot c_{B3} \cdot V_3 \cdot \frac{dT_{B3}}{dt} = & G_{B3} \cdot c_{B3} \cdot \rho_{B3} \cdot (1 - \varphi) \cdot (T_{B3}^{BX} - T_{B3}^{КИП}) + G_{B3} \cdot \rho_{B3} \cdot \varphi \cdot r_{B3} \end{aligned}$$

где G – расход, м³/с; c_{pCH_4} , c_{pO_2} – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К); T_{CH_4} , T_{O_2} – температура метана и кислорода на выходе из подогревателя, К; $T_{CH_4}^{ex}$, $T_{O_2}^{ex}$ – температура метана и кислорода на входе подогревателя, К; K_T – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); F – поверхность теплопередачи метана и кислорода, м²; l_F – длина змеевиковых зон; ρ – плотность, кг/м³; m_i – молекулярный вес компонента i , кг/моль; $\omega_i^{(k)}$ – скорость k -й химической реакции по компоненту i , моль/(м³·с); V_p , V_3 – объём зоны реакции и зоны «закалки», м³; k – константа скорости химической реакции, с⁻¹; c – теплоемкость, Дж/(кг·К); r_{CH_4} – удельная

теплота сгорания метана, Дж/кг; $T^{\text{вх}}$, $T^{\text{вых}}$ – температура газа пиролиза на входе и выходе реакционной зоны, К; Q_3 – количество теплоты, расходуемое на пиролиз, Дж; Q_5 – потери тепла, Дж; φ – часть расхода воды, идущая на образование пара; $r_{\text{ВЗ}}$ – удельная теплота парообразования воды, Дж/кг; $T_{\text{ГП}}^{\text{вх}}$, $T_{\text{ГП}}$ – температура газа пиролиза на входе в зону «закалки» и выходе из реактора соответственно, К; $T_{\text{ВЗ}}^{\text{вх}}$, $T_{\text{ВЗ}}$ – температура воды на «закалку» на входе и выходе из реактора, соответственно, К; СМ – метано-кислородная смесь, ГП – газ пиролиза; ВЗ – вода на «закалку».

Проверка адекватности полученной математической модели проводилась по статистическим данным действующего производства по критерию Фишера с уровнем значимости 5%.

В результате моделирования выявлены основные факторы, определяющие содержание ацетилена в газе пиролиза на выходе из реактора ($T_{\text{СН}_4}$, T_{O_2} – температуры предварительного подогрева исходного сырья, $\beta = G_{\text{O}_2}/G_{\text{СН}_4}$ – соотношение расходов природного газа и кислорода перед ректором), а также его технологическую безопасность ($T_{\text{реш}}$ – температура сырья на входе в реакционную зону, $C_{\text{СН}_4}$ и C_{O_2} – содержание метана и кислорода в газе пиролиза, $T_{\text{ГП}}$ – температура газа пиролиза, $G_{\text{ВЗ}}$ – расход воды на «закалку» газа пиролиза).

Третья глава посвящена вопросам определения центра и области безопасности ХТП. На основании полученной во второй главе математической модели с использованием метода разделения состояний получена система ограничений, позволяющая определить область безопасного протекания процесса окислительного пиролиза вида:

$$G_{\text{см}} \cdot \frac{\rho_{\text{СН}_4}}{m_{\text{см}}} \cdot C_{\text{СН}_4}^{\text{вх}} - k \cdot V_p \cdot (C_{\text{СН}_4}^0)^2 - \left(G_{\text{см}} \cdot \frac{\rho_{\text{СН}_4}}{m_{\text{см}}} - 2 \cdot k \cdot V_p \cdot C_{\text{СН}_4}^0 \right) \cdot C_{\text{СН}_4}^{\text{мин}} > \Delta C_{\text{СН}_4}$$

$$G_{\text{см}} \cdot \frac{\rho_{\text{СН}_4}}{m_{\text{см}}} \cdot C_{\text{СН}_4}^{\text{вх}} - k \cdot V_p \cdot (C_{\text{СН}_4}^0)^2 - \left(G_{\text{см}} \cdot \frac{\rho_{\text{СН}_4}}{m_{\text{см}}} - 2 \cdot k \cdot V_p \cdot C_{\text{СН}_4}^0 \right) \cdot C_{\text{СН}_4}^{\text{макс}} < \Delta C_{\text{СН}_4}$$

При этом определение центра безопасности как точки обеспечения максимально безопасного состояния процесса сводится к решению задачи нелинейного программирования:

$$\sum_{i=1}^N d_i^2 \rightarrow \max$$

где d_i – расстояние от рабочей процесса точки до границ области его безопасного

протекания.

В случае несоответствия точки центра безопасности регламентным условиям, обеспечивающим заданный состав газа пиролиза по необходимому содержанию в нем ацетилена целесообразно ввести понятие области безопасности, как области, в которой при некотором приемлемом снижении индекса безопасности обеспечивается требуемый состав газа пиролиза.

В четвертой главе рассматривается система управления процессом окислительного пиролиза. Поскольку непосредственное регулирование концентрации ацетилена как результирующего продукта реакции окислительного пиролиза затруднительно, целесообразным является обеспечение условий протекания рассматриваемого процесса с целью поддержания максимально возможного содержания ацетилена в газе пиролиза путем стабилизации основных технологических переменных в области технологической безопасности. Предложена двухуровневая система управления (рисунок 1), в которой верхний уровень является основным с точки зрения обеспечения технологической безопасности, осуществляя расчет заданий для регуляторов P1-P4 локальных контуров управления нижнего уровня.

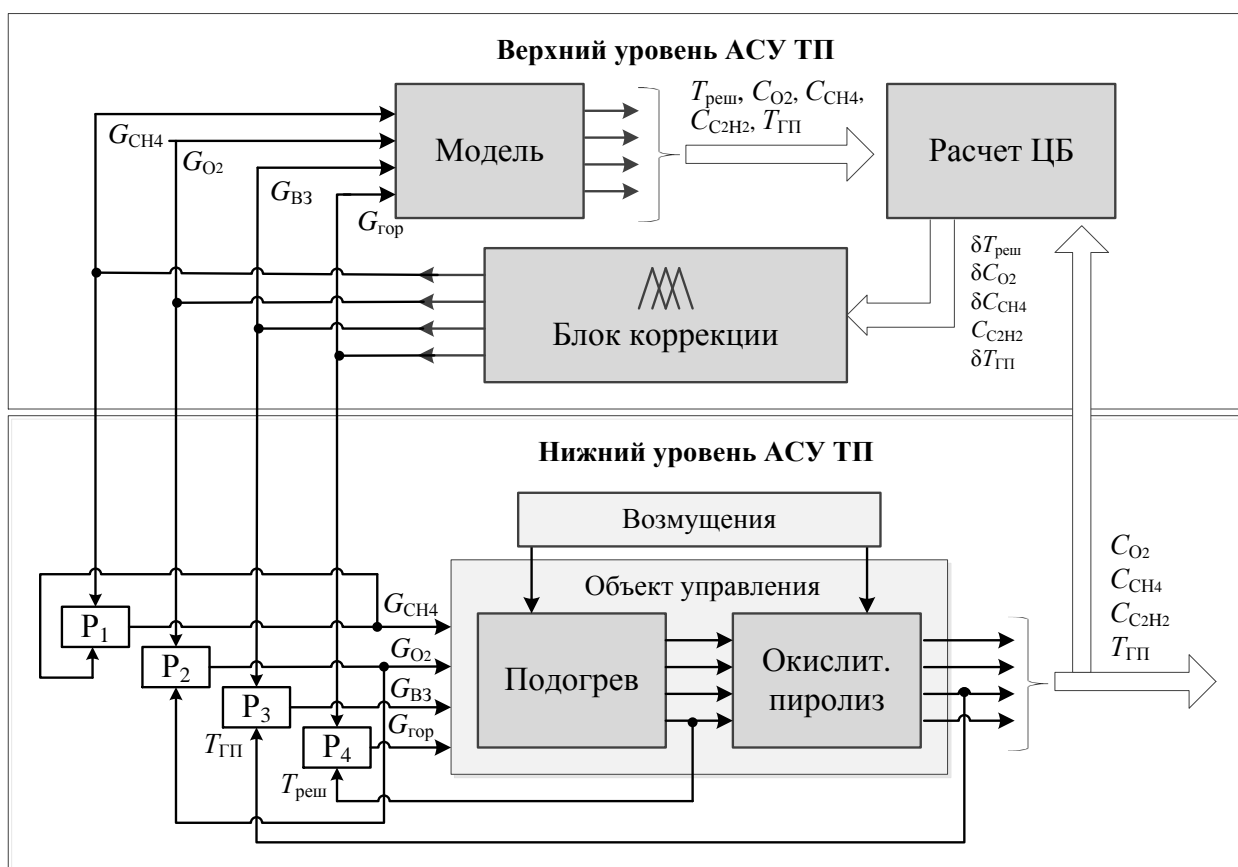


Рисунок 1 – Обобщённая функциональная структура системы управления технологическим процессом окислительного пиролиза (ЦБ – центр безопасности)

Задача управления процессом окислительного пиролиза заключается в минимизации суммы квадратов расстояний от текущей точки процесса до точки, соответствующей центру безопасности γ_i

$$\sum_{i=1}^N k_i \cdot \gamma_i^2 \rightarrow \min$$

при соблюдении ограничений, не допускающих выход технологического процесса в область недопустимого приближения к границам области безопасности (рисунок 2):

$$\bar{\delta} > \bar{\delta}^{кр}$$

где δ_i и $\delta_i^{кр}$ – отклонение реальных измеренных значений от границы области безопасности и критическое значение этого отклонения по данной переменной i , k_i – нормирующий коэффициент.

При описании термов входных переменных использовались гауссовы функции принадлежности, неравномерно расположенные в диапазоне изменения, в количестве трёх термов («high», «middle» «low»), а при описании термов выходных переменных – треугольные функции принадлежности; метод дефаззификации «centroid». Порядок работы нечеткого регулятора верхнего уровня системы управления представлен 22 правилами:

П1: Если (δC_{CH_4} есть «low») и (δC_{O_2} есть «middle») и ($C_{C_2H_2}$ есть «low») то (G_{O_2} есть «high»);

П2: Если (δC_{CH_4} есть «middle») и (δC_{CH_4} есть «low») и ($C_{C_2H_2}$ есть «low») то (G_{CH_4} есть «low»);

...

П22: Если ($C_{C_2H_2}$ есть «low») и ($\delta T_{гр}$ есть «middle») то (G_{CH_4} есть «middle»).

При нахождении рабочей точки процесса в безопасной области, определяемой значениями «middle» или «high» для переменных, определяющих отклонение значений содержания кислорода и метана в газе пиролиза на выходе из реактора (δC_{O_2} и δC_{CH_4}), «middle» для переменных, определяющих отклонение температуры газа пиролиза и газораспределительной решетки (δC_{CH_4} и $\delta T_{реш}$), от

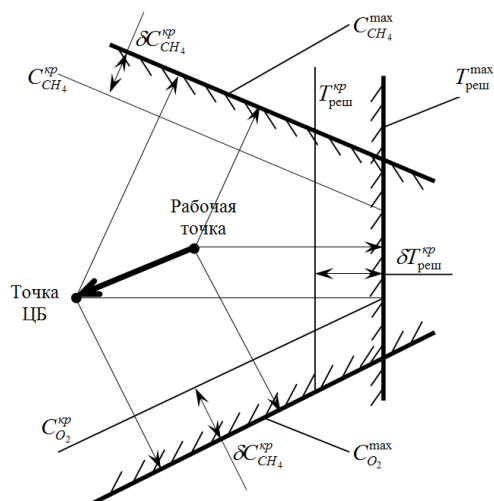


Рисунок 2 – Определение центра безопасности

соответствующих предельных значений (рисунок 3а), «*high*» для переменной, определяющей содержание ацетилена в газе пиролиза ($C_{C_2H_2}$), достаточно стабилизировать имеющиеся значения заданий регуляторов локальных контуров управления нижнего уровня. При переходе рабочей точки процесса в область недопустимого приближения к границам области безопасности, определяемую значениями «*low*» для любой из перечисленных переменных (рисунок 3б), необходимо осуществить его переход в более безопасную область протекания («*middle*» или «*high*» для соответствующих переменных) с помощью нечеткого определения заданий для управляющих воздействий в соответствии с предлагаемыми правилами нечеткого вывода.

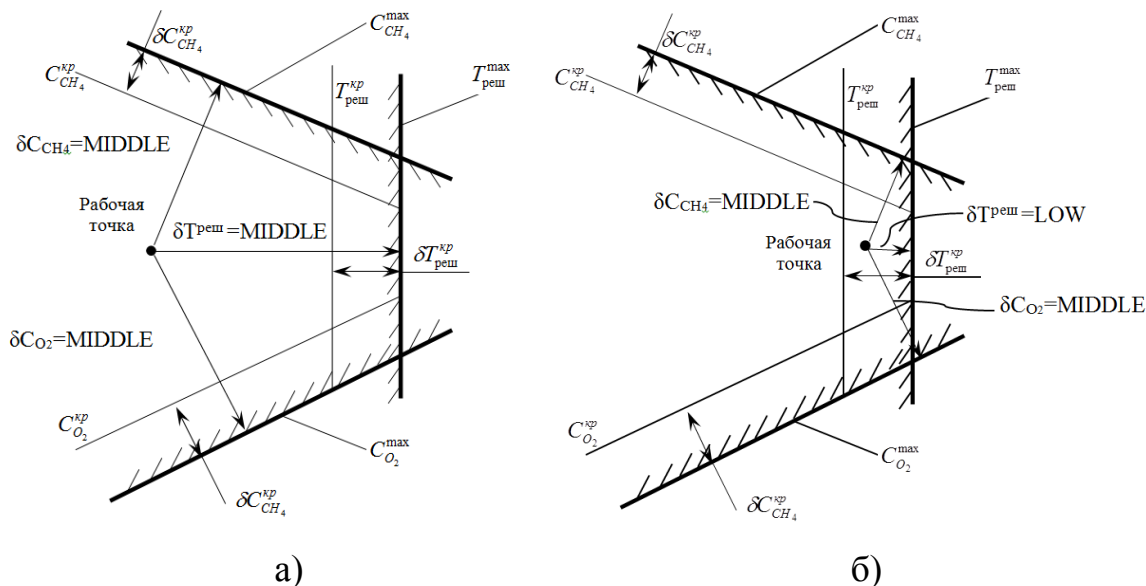


Рисунок 3 – Возможное положение рабочей точки процесса внутри области безопасности:
а) в безопасном и б) менее безопасном режимах

Обобщённый алгоритм оптимизации

1. Определение положения рабочей точки процесса: в случае ее нахождения в опасной близости к предельным значениям переменных, определяющих технологическую безопасность процесса, управление осуществляется с целью скорейшего ухода в более безопасную область.
2. В случае нахождения рабочей точки процесса за пределами области критических значений переменных определяется область его безопасности на основании сведений, полученных с объекта, и формирование вектора отклонений параметров, определяющих безопасность протекания процесса, от границ области

безопасности Y .

3. Определение вектора $\alpha=Y/Y^M$, где Y – значения параметров, полученных с объекта, а Y^M – значения, рассчитанные по модели.
4. Присваивание значениям модели значений, полученных с объекта управления.
5. Задание начальных значений для промежуточных расчетов по модели при отсутствии данных с объекта управления.
6. Расчёт заданий для регуляторов нижнего уровня в соответствии с правилами нечеткого вывода.
7. Расчёт параметров объекта по модели.
8. Корректировка значений выходных переменных Y , полученных по модели, в зависимости от значения вектора α .

Из анализа полученных в результате моделирования системы управления данных можно сделать вывод о том, что при использовании предлагаемого варианта системы управления снижается вероятность перехода процесса окислительного пиролиза в аварийную ситуацию, а также увеличивается вероятность попадания в интервалы, в которых содержание метана в газе пиролиза ниже, чем при использовании существующей системы управления, что благоприятно с точки зрения обеспечения технологической безопасности процесса.

В заключении приведены основные результаты исследования и выводы и по работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. С учётом экспериментальных данных составлено математическое описание процесса получения ацетилена окислительным пиролизом природного газа в виде дифференциальных уравнений кинетики, материальных и тепловых балансов в соответствии физико-химическими особенностями конкретного этапа процесса.
2. В результате анализа динамических свойств процесса получения ацетилена окислительным пиролизом природного газа выявлены факторы, определяющие содержание ацетилена в газе пиролиза на выходе из реактора, а также параметры, определяющих безопасность протекания процесса.
3. Выявлены ограничения математической модели непрерывного технологического процесса получения ацетилена окислительным пиролизом природного газа, определяющие условия безопасного функционирования процесса.
4. Предложен и теоретически обоснован метод построения диагностических моделей развития опасностей на основе метода разделения состояний

5. Представлена методика определения центра безопасности для процесса получения ацетилена окислительным пиролизом природного газа решением задачи нелинейного программирования.
6. Разработан вариант двухуровневой структуры системы управления с учетом специфических особенностей процесса окислительного пиролиза, верхний уровень которой на основе определения области безопасности определяет задания для регуляторов локальных контуров управления нижнего уровня.
7. Имитационное моделирование предлагаемого варианта структуры системы управления показало, что при его использовании снижается вероятность перехода процесса окислительного пиролиза в аварийную ситуацию, что благоприятно с точки зрения обеспечения технологической безопасности процесса.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография:

1. Управление технологической безопасностью промышленных процессов на основе нечетко-определенных моделей / Д. П. Вент, В. И. Ерофеев, В. Н. Богатиков и др. – ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И. Менделеева, Новомосковский институт (филиал) РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Новомосковск, 2019. – 208 с. (Монография)

В изданиях, входящих в международную реферативную базу данных SCOPUS

2. Sanayeva G. N., Prorokov A. E., Bogatikov V. N. Investigation of dynamic behavior of acetylene production by oxidative pyrolysis of natural gas // Hu Z., Petoukhov S., He M. (eds) Advances in Artificial Systems for Medicine and Education. AIMEE 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Vol. 658. – 2017. – P. 323-332.

3. Sanayeva G. N., Prorokov A. E., Bogatikov V. N. Development of a piecewise linear model of the oxidative pyrolysis process for the control system synthesis // Hu Z., Petoukhov S., He M. (eds) Advances in Artificial Systems for Medicine and Education. AIMEE 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Vol. 658. – 2017. – P. 333-342.

4. About fuzzy management of the safety of the process of oxidative pyrolysis / G. N. Sanaeva, A. E. Prorokov, D. P. Vent et al. // Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference “Fuzzy Technologies in the Industry – FTI 2018”. – Vol. 2258. – 2018. – P. 179-187.

5. Design of oxidative pyrolysis control algorithm based on fuzzy safety area and center definition / G. N. Sanayeva, I. E. Kirillov, A. E. Prorokov et al. // Advances in Intelligent

Systems and Computing. – Vol. 902 of Hu Z., Petoukhov S., He M. (eds) Advances in Artificial Systems for Medicine and Education II. AIMEE2018 2018. – Springer, Cham, 2019. – P. 549-559.

6. Система управления технологической безопасностью на основе предсказывающих импульсных риск-моделей / Г. Н. Санаева, А. Е. Пророков, Д. П. Вент и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 3. – С. 77-85

В изданиях по списку ВАК

7. Санаева Г. Н., Пророков А. Е., Богатиков В. Н. Исследование динамических свойств процесса окислительного пиролиза // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 7. – С. 67-77.

8. Санаева Г. Н., Пророков А. Е., Богатиков В. Н. Разработка модели процесса производства ацетилена с использованием методов кусочно-линейной аппроксимации // Известия Тульского государственного университета. – Т. 1 из Технические науки. Вып. 12. – ТулГУ Тула, 2017. – С. 24-35.

9. Разработка алгоритма работы системы управления для предотвращения аварийных ситуаций при управлении технологическими процессами / В. Н. Богатиков, Д. П. Вент, А. Е. Пророков и др. // Динамика сложных систем - XXI век. – 2018. – № 4. – С. 71-77.

10. Управление технологической безопасностью промышленных процессов на основе мультиагентного моделирования / С. Р. Бакасов, Г. Н. Санаева, Ю. А. Воронин и др. // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2019. – № 4. – С. 37-45.

11. Бакасов С. Р., Санаева Г. Н., Богатиков В. Н. Управление состояниями промышленных технологий на основе критерия риска // Программные продукты и системы. – 2019. – Т. 32, № 4. – С. 725-734

12. Иерархическая система нечеткого регулирования процесса получения ацетилена окислительным пиролизом природного газа / Г. Н. Санаева, А. Е. Пророков, В. Н. Богатиков, Д. П. Вент // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2020. – № 1. – С. 7-17.

В других изданиях:

13. Санаева Н. А., Санаева Г. Н., Пророков А. Е., Богатиков В. Н. Построение кусочно-линейной модели процесса окислительного пиролиза // Успехи в химии и

химической технологии. – Т. 31 из 8 (189). – РХТУ им. Д.И. Менделеева Москва, 2017. – С. 27-29.

14. Богатиков В. Н., Пророков А. Е., Санаева Г. Н., Санаева Н. А. Применение метода кусочно-линейной аппроксимации при разработке модели процесса окислительного пиролиза для синтеза системы управления // Нечеткие системы и мягкие вычисления. Промышленные применения. Fuzzy Technologies in the Industry (FTI-2017): Первая Всероссийская научно-практическая конференция. – Т. 2. – Ульяновск: УлГТУ Ульяновск, 2017. – С. 67-76.

15. Санаева Г. Н., Пророков А. Е., Богатиков В. Н. Синтез структуры системы управления технологической безопасностью производства ацетилена на основе вычисления центра безопасности // Современные сложные системы управления: NTCS'2017: мат-лы XII междунар. науч.-практ. конф. – Т. 2. – Изд-во Липецкого государственного технического университета Липецк, 2017. – С. 169-173.

16. Санаева Г. Н., Пророков А. Е., Богатиков В. Н. Построение дискретной модели процесса производства ацетилена окислительным пиролизом природного газа // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности (МНПК ЛЭРЭП-9-2015). – Саратов: СГТУ им. Гагарина Ю. А., 2015. – С. 105-108.

17. Санаева Г. Н., Пророков А. Е., Богатиков В. Н. Об определении области и центра технологической безопасности процесса производства ацетилена окислительным пиролизом // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности (МНПК ЛЭРЭП-9-2015). – Саратов: СГТУ им. Гагарина Ю.А., 2015. – С. 119-122.

18. Санаева Г. Н., Пророков А. Е., Богатиков В. Н. О разработке ресурсосберегающей системы управления технологической безопасностью процесса окислительного пиролиза // V Международная конференция-школа по химической технологии ХТ'16, сборник тезисов докладов сателлитной конференции XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. – Волгоград: Волгоградский ГТУ, 2016. – С. 118-120.

19. Санаева Г. Н., Пророков А. Е., Богатиков В. Н. О возможности применения дискретных моделей к диагностике состояния процесса производства ацетилена окислительным пиролизом природного газа // Энергетика, информатика, инновации - 2015 Сборник трудов V Международной научно-технической конференции. – Т. 1. – Универсум Смоленск, 2015. – С. 225-228.

20. Санаева Г. Н., Пророков А. Е., Богатиков В. Н. Определение области и центра

технологической безопасности процесса получения ацетилена окислительным пиролизом природного газа // Энергетика, информатика, инновации - 2015 Сборник трудов V Международной научно-технической конференции. – Т. 1. – Универсум Смоленск, 2015. – С. 222-224.