

АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА

На правах рукописи

**ЗАДАЧИ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ
ДЕГИДРИРОВАНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ОСНОВЕ
КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ СИМУЛЯЦИИ В РЕЖИМЕ
РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

Специальность: 3337.01 «Информационно-измерительные и управляющие системы (в химической технологии)»

Отрасль науки: Технические науки

Соискатель: Гулиева Ньюбар Алимурад гызы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации, представленной на соискание ученой степени
доктора философии по техническим наукам

Сумгайыт – 2023

Диссертационная работа выполнена на кафедре автоматики и управления Сумгайытского Государственного Университета

Научный руководитель: **Али Гасан оглы Нагиев**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Диссертационный Совет ED 2.04 Высшей аттестационной комиссии при Президенте Азербайджанской Республики, действующий в Азербайджанском Техническом Университете

Председатель Диссертационного Совета:

доктор технических наук,
профессор **Нурали Адил оглу Юсифбейли**

(подпись)

Ученый секретарь
Диссертационного Совета:

Кандидат технических наук,
доцент
Вахид Гара оглы Фархадов

(подпись)

Председатель научного
семинара:

доктор технических наук,
профессор

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее проработанности. Процессы дегидрирования углеводородов с использованием технологии кипящего слоя мелкозернистых катализаторов являются основным способом получения низших и частично средних алкенов, являющихся сырьем для производства разных полимеров. Эти процессы осуществляются в технологически сложных реакторно-регенераторных блоках, которые характеризуются наличием системы циркуляции катализаторной массы между реактором и регенератором. Специфические особенности этих процессов как объектов оперативного управления вызваны рядом свойств, исходящих в основном из нераздельной связанности двух реакционных аппаратов, характеризующихся наличием как прямых, так и обратных связей.

В результате каталитического процесса дегидрирования образуются кокс, который способен закупорить каналы в пористой структуре в частицах катализатора. Следовательно, катализатор очень быстро теряет активность в течение времени пребывания частиц в реакторе. В этом заключается причина циркуляционного восстановления катализатора, которое ведется путем выжигания кокса, накопленного в порах катализатора, где наряду с последним адсорбированы также и собственно сырье и продукты реакций при температуре $T=650-670^{\circ}\text{C}$. Тепло, получающееся в горении, составляет основную часть в тепловом балансе системы, допустимы даже и режимы, когда процесс оказывается самодостаточным в тепловом отношении, т.е. без ввода дополнительного топлива в регенератор.

Очевидно, скорости реакций, в том числе и реакций коксоотложения, имеют аррениусовую зависимость от температуры, поэтому между химическими процессами в реакторе и тепловыми в регенераторе создается своего рода динамическая связь. Эта связь усугубляет процессы контроля – малые изменения в каком-

либо аппарате, может привести к большим нарушениям, вплоть до аварийного повышения или спада температуры в системе.

От всего указанного рождена особенность данного процесса как объекта управления. Простой подход, заключающийся в соблюдении заданных значений параметров режима в «регламенте» отнюдь не решает проблему управления. Дело в том, что имеются «сильные» возмущения: - со стороны изменения загрузки установки по сырью, степени коксотворности сырья, тепловых процессов горения (не догорание кокса, т.е. соотношение $CO:CO_2$ при горении зависит от многих факторов) и т.д.

Следовательно, процессы в реакторе и регенераторе не могут рассматриваться раздельно. Необходим целостный подход – модель должна охватить как процессы коксообразования, так и горения, которые происходят в разных аппаратах, имеющих между собой динамическую связь.

Традиционный подход, применяющийся к настоящему времени в мировой практике промышленного производства, который заключается в стремлении улучшить стабилизацию отдельных режимных параметров в заданном уровне, не полностью решает проблему, хотя необходимость в присутствии последних также и ни чем не исключается.

Учитывая указанную особенность объекта вполне очевидна актуальность проблемы, заключающейся в разработке соответствующей технологии управления в широкой области изменения переменных состояния, которая может быть основана на создании единой, в тоже время нелинейной, математической модели управления тепловым режимом всей системы.

Объект и предмет исследования: Рассматриваются химико-технологический процесс дегидрирования углеводородов, осуществляющийся в ПС мелкозернистого катализатора с непрерывной его регенерацией. В данной технологии процесс протекает в непрерывном потоке сырья на установку и отличительно то, что в этой конструкции осуществляется циркуляция катализатора в системе реактор-регенератор. Примером могут быть процессы переработки бутана, изобутана, изопентана.

Цель и задачи исследования.

Целью исследования является разработка математической модели динамики тепловых состояний РРБ, осуществляющего процессы дегидрирования углеводородов, которая может послужить также и основой косвенного измерения в реальном времени глубины закоксованности катализатора на выходах двух соответствующих аппаратов, т.е. реактора и регенератора. Использование подробного математического описания динамики процессов позволит осуществить управление в широком диапазоне изменения переменных состояния, включая и задачу ситуационного управления, когда необходим топливный подогрев регенератора.

Методы исследования. В исследовании применены методологии построения математических моделей управляемых динамических систем, базирующиеся на теории дифференциальных уравнений, химической кинетике, теории управления и теории устойчивости, методах идентификации динамических систем и приемах симуляции в реальном времени.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая структура кинетической модели реакторно-регенераторного блока процесса дегидрирования углеводородов.

2. Постановка задачи косвенного измерения закоксованности катализатора в процессах каталитического дегидрирования углеводородов в ПС катализатора.

3. Метод параметрической идентификации математической модели динамики тепловых состояний реакторно-регенераторного блока, основанный на введении функций рассогласований, раздельно учитывающих как статические состояния, так и динамику переходных режимов.

4. Алгоритмы управления в реальном времени на основе нелинейной математической модели сложных динамических систем.

Научная новизна исследования.

1. Математическая структура тепловой нелинейной модели контроля динамических состояний реакторно-регенераторного блока процесса дегидрирования углеводородов.

2. Метод косвенного измерения физически не измеримых координат нелинейной динамической системы в реальном времени по сигналам части измеримых координат процесса дегидрирования углеводородов.

3. Построение модели коксовых отложений в порах катализатора на основе фрактального представления хаотической структуры высокопористого мелкодисперсного катализатора.

4. Двухкритериальная задача параметрической идентификации тепловой модели реакторно-регенераторного блока установок дегидрирования углеводородов, основанная на формировании пакета тестирующих импульсов.

5. Снижение размерности динамической системы реактор-регенератор в процессе дегидрирования углеводородов за счет автоматической стабилизации одной координаты вектора состояний.

6. Постановка и решение задачи управления при больших отклонениях тепловых координат реакторного блока установок дегидрирования углеводородов.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Впервые получена математическая модель системы, включающей процессы коксоотложения на катализаторе и окислительного восстановления его применительно к процессу дегидрирования изобутана в изобутилен. Математическая модель данного процесса и связанные с ней алгоритмы управления в реальном времени протекания процессов в свете контроля состояния и управления в широком диапазоне переменных состояния могут быть применены в процессах управления режимами на аналогичных реакторно-регенерационных системах с кипящим слоем катализатора.

Апробация работы. Основные положения диссертации были обсуждены на следующих конференциях: Республиканская

научная конференция посвященная 90-летию академика Тогрула Шахтактинского, Баку 2015; Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной дню Химика и 40-летию кафедры химико-технологических процессов филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Салавате, УФА, 2017; XXI республиканская научная конференция докторантов и юных исследователей, Баку, 2017; Международная научная конференция, Сумгаит, 2018; Международная научная конференция информационные системы и технологии достижений и перспектив, Сумгаит, 2020; IV Республиканская научная конференция прикладные задачи математики и новые информационные системы, Сумгаит, 2021.

Наименование организации, где выполнена работа.

Диссертационная работа выполнена на кафедре автоматизации и управления Сумгайтского Государственного Университета.

Общий объем диссертации с учетом отдельных структурных единиц диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Основное содержание работы состоит из 178 страниц, 29 рисунков и 7 таблиц. Объем общего и структурного разделов диссертации примерно распределяется следующим образом:

Общее - 182418 знаков: Введение – 6044 знаков; Первая глава – 27954 знаков; Вторая глава – 64788 знаков; Третья глава – 72320 знаков; Четвертая глава – 43983 знака; Заключение – 2630 знаков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности темы исследования, комментируются цель и решаемые задачи, вопросы, выносимые на защиту, перечисляются новизна научных результатов и их практическая значимость.

Первая глава посвящена анализу технологических особенностей процессов дегидрирования углеводородов как объектов управления и обзору литературных источников в области моделирования и управления этими процессами, в частности,

процессом дегидрирования изобутана в кипящем слое катализатора. Анализом охвачен ряд основных областей, причастных динамическому описанию кинетических закономерностей и вопросов автоматического управления тепловыми режимами систем реактор-регенератор, осуществляющих дегидрирование углеводородов.

Особенности технологических схем для осуществления каталитических процессов дегидрирования углеводородов в кипящем слое. Анализ литературных источников по решению проблем управления

Каталитическое дегидрирование углеводородов (ДУ) представляет собой один из довольно ярких представителей класса технологий, применяющихся для осуществления химических процессов в реакторно-регенераторных системах. Исходя из того, что наиболее оптимальным оказывается проведение контакта углеводородного сырья именно мелкозернистым катализатором (или же пылевидным), приходится применить технологию организации режима псевдооживления (ПС) катализатора, как в реакторе, так и регенераторе. Достаточно большая скорость конверсии сырья чревата быстрым закоксованием катализатора и падением его активности, что вызывает необходимость в параллельном очищении его путем окислительной регенерации. Как контакт катализатора с сырьем, так и с воздухом в параллельно проводимом процессе окислительного удаления кокса, протекают в ПС, что может быть организовано только в системе циркуляции катализатора между реактором и регенератором. Это представляет собой основную особенность данных систем, поскольку именно ею связано множество проблем контроля и управления тепловыми режимами блока «реактор-регенератор».

В задачах управления процессами дегидрирования углеводородов, имеет ряд специфических аспектов. На рисунке 1 приведена одна из широко распространенных конструкций для дегидрирования алканов (бутана, изобутилена, изопентана). Здесь катализатор в аппараты транспортируется в одинаковых U-образных трубах, из реактора воздухом, а обратно – азотом.

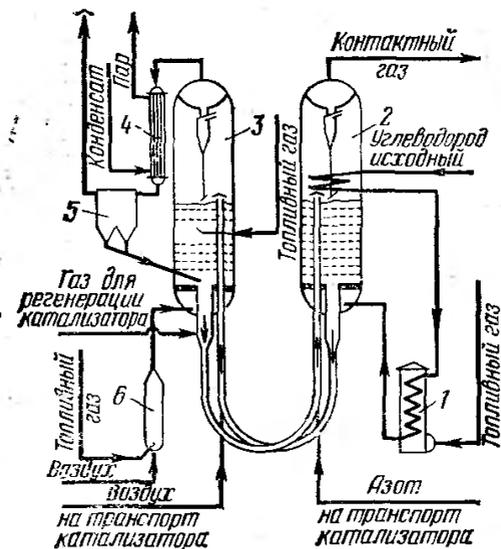


Рис. 1.2.2. Установка дегидрирования алканов с U образными транспортными линиями.

Отметим, в настоящем исследовании некоторые аспекты инженерного решения в этой конструкции приняты в учет при моделировании системы реактор-регенератор

К техническим затруднениям, связанным с сложностью технологической схемы, прежде всего, относится решение задачи автоматического контроля. Дело в том, что один из важных технологических измерений, каким является оперативный контроль степени закоксованности катализатора, представляет собой технически трудно решаемую задачу. Среднее время пребывания катализатора в реакционных аппаратах составляет порядка 10-16 мин, в течение которых оценивание состояния катализатора должно быть осуществлено без какой-либо ощутимой задержки. Очевидно, эта проблема может быть решена только с использованием поточных измерительных приборов, создание которых по сегодняшний день остается проблемным из-за высокой температуры и агрессивности среды.

В этой связи обращает на себя внимание некоторые стремления привлечь принцип робастного управления настроечными параметрами линейных систем автоматического регулирования температуры. В ряде работ эту задачу стараются решить с применением калмановской фильтрации, во избежание затрагивания кинетических исследований для выявления закономерностей образования кокса.

В научно-технической литературе находят освещение вопросы стабилизации режима на основе ПИД-регулирования. В этих системах центральными элементами технического решения чаще встречается ПЛК и система SCADA.

Касаясь темы визуализации управления, следует особо подчеркнуть практику применения программируемых логических контроллеров (ПЛК) в промышленной автоматизации. Эти средства в последнее время особенно получили развитие в области визуализации в динамике течения процесса управления в реальном времени. Компактность конструкций, способствующая их выпуску в виде встроенных элементов, создает благоприятные условия для доступа к оперативной информации и внедрения команд управления.

Работы в области математического моделирования блока реактор-регенератор.

Среди первых работ, отличающихся весомым вкладом и влиянием на последующие исследования касающихся моделирования в циркуляционных системах реактор-регенератор, следует отметить работу профессора Каирского университета С.С. Елнашае.

Химические основы, касающиеся кинетики процессов дегидрирования углеводородов, изучены отечественными учеными-химиками.

Широкое использование кинетических механизмов горения коксовых отложений – это то влияние отмеченных выше работ, которые благоприятствовали созданию расширенной структуры динамической модели РРБ. Более поздние работы в этой области

ставили вопрос в основном относительно идентификации зависимостей выходных показателей от режимных параметров.

В этой связи важно отметить, что в настоящей работе для моделирования динамики РРБ в ПС стратегически было намечено предпочтение отдать на псевдогомогенное представление структуры ПС.

Следует отметить, что особым направлением в области математического моделирования составляет так называемые кибернетические подходы, что характеризуется преобладанием информационного подхода.

С этой точки зрения привлекает внимания применение нечеткой логики в моделировании и создания ситуационного управления. Нечеткая логика оказывается эффективной для описания вероятности возникновения критических ситуаций, приводящих к нарушениям в режимах кипящего слоя в регенераторе.

Имеются попытки осуществить параметрическую идентификацию модели образования кокса на основании ряда лабораторных анализов.

Таким образом, в качестве итога следует обратить внимание на ряд аспектов проведенного анализа.

1. В качестве обобщения конструкционных вариантов реакторно-регенераторного блоков для осуществления дегидрирование углеводородов с микросферическим катализатором, в частности, изобутана целесообразно ориентироваться на конструкционный модель установок U-образного типа транспортирующих линий (рис.1.1.2). Эта модель в отличие от приведенных других моделей, например, модели «Ортофлоу», которая чаще применяется для осуществления каталитического крекинга тяжелых углеводородов, или модели «1А-1М» - тоже применяющегося для названных процессов, хорошо согласуется с основными современными требованиями.

2. Измерение степени закоксованности катализатора, как на выходе реактора после осуществления собственно химического процесса в кипящем слое, так и после регенерации встречает про-

блему технического характера, заключающегося в практической невозможности создания измерительных приборов для установления в потоках. Основная причина в абразивном воздействии потока, в наличии высокой температуры и во влиянии смолистой среды. Точное модельное оценивание глубины закоксованности катализатора представляет собой существенный вклад к решению настоящей проблемы.

3. Математической моделью может послужить кинетические зависимости, представленные в виде системы дифференциальных уравнений, построенных на основе балансов скоростей образования кокса и кинетической закономерности химической реакции высокотемпературного окислительного процесса в присутствии кислорода атмосферного воздуха.

4. Математическое моделирование реально функционирующей промышленной системы может оказаться успешной только в том случае, если оно будет основываться на параметрической идентификации по данным конкретной промышленной установки. Всякие препятствия, связанные с проведением активных экспериментов для получения информации к решению задачи параметрической идентификации, могут быть устранены за счет применения адаптивной настройки в реальном времени в режиме эксплуатации технически готовой системы.

Вторая глава посвящена математическому моделированию для управления тепловыми режимами процессов дегидрирования углеводородов, проводимых в реакторно-регенераторной системе.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА

Обобщенная схема РРБ, классификация основных координат.

Процессы каталитического дегидрирования углеводородов структурно могут быть представлены в виде замкнутой системы циркуляции катализатора между реактором, где собственно осуществляются целевые химические превращения, и регенератором, выполняющим роль восстановителя активности путем удаления коксовых отложений на катализаторе (рис2).

При этом понятие «восстановление» включает в себя помимо удаления коксовых отложений, также и восстановление валентности хрома в составе катализатора, поскольку катализатор, попадая в регенератор в среде высокой температуры, терпит окислительное превращение каталитически активного 6-ти валентного хрома, в не активный 3-х валентный хром.

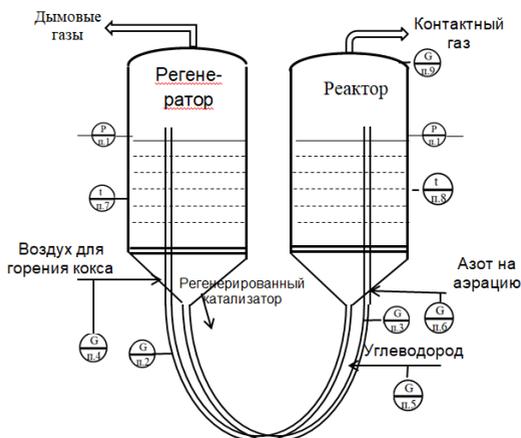


Рис.2. Упрощенная технологическая схема взаимосвязи реактора и регенератора по материальным потокам и основные координаты системы.

Для математического моделирования в целях управления проведем следующую классификацию:

1. Входные координаты, т.е. возмущения, и управление:

- расход сырья на установку, т.н. коксотворность сырья;
- управляющие параметры – скорость циркуляции катализатора в системе;
- ввод дополнительного топлива на подогрев регенератора;
- расход азота на аэрацию в транспортной линии ввода сырья в реактор.

2. Координаты пространства состояний.

Модель динамики тепловых состояний достаточно в полном объеме может быть представлена четырьмя координатами: -

температуры реактора и регенератора и степени закоксованности катализатора на выходах реактора и регенератора.

Если оперативное измерение температуры в аппаратах не встречает какие-либо затруднения, то оперативное измерение двух остальных координат в настоящей работе представляет собой одну из задач пристального внимания.

Вопросу, связанному с проблемами физического измерения данного параметра, посвящается специальный параграф, следовательно, ограничимся здесь только констатацией факта о том, что к настоящему времени отсутствует какого-либо физического измерительного прибора для выполнения оперативного контроля данной координаты.

Важно заметить, что перечисленные координаты – представляют пространство, определяющее лишь тепловое состояние РРБ. В частности, концентрации трехвалентного хрома в двух реакционных аппаратах не включаются как координаты теплового состояния в связи с их пренебрежительно малым влиянием на последнее.

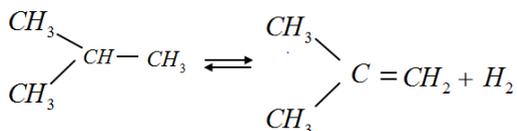
3. Выходные координаты.

Выходными координатами в данной постановке проблемы исследования могут оказаться не обязательно один показатель, например глубина конверсии сырья, а ряд показателей эффективности, которые, так или иначе, связываются с координатами состояния. Например, одними из вариантов выходных координат может оказаться также и показатель селективности реакций или энергосбережение производства в целом.

В рамках данного исследования основное внимание направлено на проблему управления координатами состояния, т.е. на второй пункт этого перечня, т.к. именно он имеет непосредственно целевое назначение и ориентируется на математическое моделирование именно динамических процессов в РРБ.

Кинетическое описание коксования катализатора, обратимых переходов валентности хрома на примере реакции дегидрирования изобутана.

Получение изобутилена из изобутана протекает по следующей схеме:



Важно отметить, что вместе с целевой реакцией происходит и побочные реакции, среди которых основное внимание необходимо уделять реакциям образования кокса. Кокс – это совокупность тяжелых углеводородов и собственно угля, со средним весовым соотношением С:Н = 12-19.

Упуская формальные записи системы дифференциальных уравнений, которые приведены в диссертации для описания кинетики реакций образования коксовых отложений, ограничимся следующим формальным представлением:

$$w_k = F_1(\bar{k}_k, T_1, \nu)$$

где \bar{k}_k – обобщенный коэффициент скорости реакций образования кокса, T_1 – температура в зоне реакции; ν – массовая скорость ввода сырья в реактор, которая в данной интерпретации принимается как эквивалент обобщенной концентрации коксостворных реакций.

Формальную запись уравнения скорости для реакции выжигания кокса целесообразно представить в виде:

$$\nu = F_2(k_2, T_2, f_6, \nu_2)$$

где $\nu, k_2, T_2, f_6, \nu_2$ – соответственно массовая скорость реакции регенерации катализатора, обобщенная константа скорости, температура регенератора, расход воздуха в регенератор и расход топливного газа в зону горения кокса.

Для учета обратимых переходов трехвалентного и шестивалентного хрома в процессе регенерации катализатора составим кинетическую запись реакций перемены валентности хрома в следующем виде :

$$\frac{dC_{Cr^{6+}}^{(2)}}{d\tau} = k_{+3} \exp(-E_2 / RT_2) C_{Cr^{6+}};$$

$$\frac{dC_{Cr^{3+}}^{(1)}}{d\tau} = k_{+6} \exp(-E_1 / RT_1) (1 - C_{Cr^{6+}}^{(1)}) C_{2,3};$$

где $C_{Cr^{3+}}^{(1)}, C_{Cr^{6+}}^{(2)}$ – концентрации трех и шестивалентного хрома в регенераторе, k_{+3}, k_{+6} – коэффициенты, скорости соответствующих реакций; E_1, E_2 – энергии активаций реакции падения и восстановления активности катализатора, R – универсальная газовая постоянная, τ – время.

Разработка единой тепловой модели РРБ на основе материального и теплового балансов.

Создавая единую (целостную) математическую модель нами использовался подход, основанный на описании механизма прямой и обратной связи по основным каналам РРБ:

$$G_1 \frac{dC_1}{dt} = F_k (C_2 - C_1) - \phi_1(T_1, C_1, C_2, w) G_1;$$

$$G_2 \frac{dC_2}{dt} = F_k (C_1 - C_2) + \phi_2(T_2, C_2) G_2;$$

$$G_1 c_k \frac{dT_1}{dt} = F_k c_k (T_2 - T_1) - \phi_1(T_1, C_2, w) q_2 G_1 +$$

$$+ c_{raw} F_{raw} (T_{raw} - T_1) + k_{en} S_1 (T_{en} - T_1);$$

$$G_2 c_k \frac{dT_2}{dt} = F_k c_k (T_1 - T_2) + \phi_1(T_2, C_1) q_1 G_2 + q_3 F_{ju} +$$

$$+ q_4 \delta F_k + F_{air} c_{air} (T_{air} - T_2) + k_{en} S_2 (T_{en} - T_2);$$
(1)

где C_1, C_2, T_1, T_2 – концентрации кокса и температуры в реакторе и регенераторе; F_k, F_{air}, F_{raw} – массовые скорости потоков – катализатора, воздуха в регенератор и сырья в реактор; $k_{en}, S_1, S_2, G_1, G_2$ – коэффициент теплопередачи в окружающую среду, площади соприкосновения с окружающей средой реактора и регенератора, массы катализатора в соответствующих аппаратах; c_k, c_{raw}, c_{air} – теплоемкости катализатора, сырья и воздуха; $\phi_1(T_1, C_2, w), \phi_2(T_2, C_2)$ – функции описания кинетических фак-

торов (в Аррениусовской форме), выражающие скорости реакций образования и выжига кокса.

Отметим, что в (1) функции скоростей образования кокса и восстановления активности катализатора аппроксимированы следующими выражениями:

$$\phi_1(T_1, C_1, C_2 w) = k_{01} \exp(-E_1 / RT_1) \frac{\alpha w C_1}{1 + \exp(-\beta C_2)}; \quad (2)$$

$$\phi_2(T_2, C_2) = k_{02} \exp(-E_2 / RT_2) C_2^\eta; \eta = 1.0 - 1.4$$

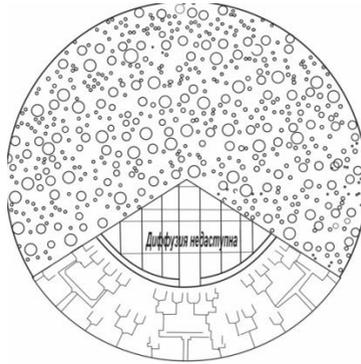
где w – весовая скорость ввода сырья, α, β, η – постоянные числа.

В основу функций (2) положен тот факт, что не малая часть каталитической реакции протекает внутри транспортной линии, т.е. в условиях уже очищенного катализатора. Так как степень очищенности в данном случае выражена величиной C_2 , то в этих функциях фигурирует как C_1 , так и C_2 . Учет блокировок пор катализатора коксовыми отложениями, очевидно, может вносить значительную точность, следовательно, моделирование пористой структуры оказалось одним из вопросов повышения точности процесса коксоотложения. Введен так называемый «псевдо канал», для моделирования которого использована методология фрактального анализа.

Фрактальное описание пористой структуры катализатора для моделирования процессов образования коксовых отложений. Использование метода фрактального анализа основано на классификации трех категорий каналов: - макро, мезо – и микро каналы для которых скорости процессов диффузии весьма различны.

В этом отношении весьма эффективной оказалась гипотетическая структура, известная в литературе как дендритовая модель системы пор твердого материала. Используя это гипотетическое, геометрическое построение и основываясь на абстрактной модели «псевдо канала», проведена формулировка для расчета некоторых коэффициентов передачи массы вглубь пористого материала.

Принята следующая геометрическая модель пористой структуры частицы катализатора (рис.3).



Внешняя среда

Рис.3. Дендритовые структуры в зерне пористого катализатора и ядро, недоступное диффузии.

Принимая следующие обозначения, выведены формулы, оценивающие эффективные коэффициенты передачи массы вещества. Суммарные периметры $\Pi'(\ell)$, площади сечений $S'(\ell)$ и объемы ветвь $V'(\ell)$ с длиной, равной ℓ , согласно геометрии цилиндрического канала и с учетом соотношения $r = b\ell$ могут быть вычислены следующим образом:

$$\Pi'(\ell) = \frac{2\pi\ell}{b} \left(\frac{\ell_0}{\ell} \right)^{D_{\Pi}}; \quad (3)$$

$$S'(\ell) = \frac{\pi\ell^2}{b} \left(\frac{\ell_0}{\ell} \right)^{D_S}; \quad (4)$$

$$V'(\ell) = \frac{\pi\ell^3}{b^2} \left(\frac{\ell_0}{\ell} \right)^{D_V}, \quad (5)$$

где фрактальные размерности D_{Π}, D_S, D_V , исходя из парамет-

ров $a = \frac{r_{n+1}}{r_n} = \frac{\ell_{n+1}}{\ell_n}$, $\frac{r_n}{\ell_n} = b$, $\frac{\chi_{n+1}}{\chi_n} = c$ вычисляются по выражениям:

$$D_v = 3 + \frac{\ln c}{\ln a}; D_s = 2 + \frac{\ln c}{\ln a}; D_{\Pi} = 1 + \frac{\ln c}{\ln a}.$$

Здесь r_n, ℓ_n – радиус и длина цилиндрического канала; χ_n – число ветвей в стволе дендрита; n – номер «поколения» в дендритовом образовании.

Соотношения (3)-(5) могут служить в качестве меры диффузионных торможений, которые, как известно, являются функциями размеров каналов. Иными словами, чем больше ограничения для объемной или поверхностной молекулярной диффузии, тем заметнее падение скорости доставки кислорода вглубь канала для реакции горения.

Математическая модель для симуляции динамики процессов при топливном подогреве регенератора.

В процессе управления имеет место ситуации, при которых необходим ввод в регенератор дополнительного количества газового топлива. Создается обстановка, при которой меняется не только гидродинамический режим, но и проявляет себя условие с дефицитом кислорода, вопреки тому, что в обычной ситуации имеет место существовать именно его избыток. В работе эта ситуация учитывается путем введения двухфазной модели кипящего слоя катализатора.

Третья глава посвящена исследованию статических и динамических свойств модели реакторно-регенераторного блока на основе выполненной параметрической идентификации на мере процесса дегидрирования изобутана

Параметрическая идентификация математической модели по данным промышленной установки

В области параметрической идентификации промышленных реакторно-регенераторных систем имеется положительный опыт, касающийся технологии процесса каталитического крекинга. В основе этого лежит так называемый принцип тестирующих воздействий. Идея принципа заключается в том, что функция рассогласования можно построить по статистике равновесных состояний, добавляя к этим эмпирическим данным некоторые данные, отражающие экспериментально полученные переходные режи-

мы. Заимствование этой концепции при учете технологических особенностей рассматриваемой системы оказывается таковым же успешным, как и в ранее примененных в литературе системах. Функция рассогласования применительно к нашей модели приобретает следующий вид:

$$R(p_1, p_2) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{N_1} (y_{ij}^M(p_1, p_2, u_j) - \xi_{ij}^T)^2 + \\ + \alpha \cdot \sum_{i=1}^4 \sum_{n=1}^{N_2} [Y_i^M(p_2, u_n, t_n) - Y^T(t_n)]^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

где $p_1 \in P_1; p_2 \in P_2$ – векторы идентифицирующих параметров, которые подлежат определению; y_{ij}^M, Y_i^M – соответственно компоненты 4-х мерного вектора состояний системы (1) и вектора при вынужденном движении после тестового импульса; ξ_{ij}^T – экспериментальные значения статистических данных, N_1 – число наблюдений (стационарных режимов, составляющих собственно статистику); индексы M, T – соответственно вычисленные по уравнениям значения и экспериментальные значения; t_n – шаг дискретного времени, $\alpha \in (0, 1)$ – коэффициент веса критерия относительно переходных динамических состояний. Заметим, что уравнения состояний стационарности получены в виде приравненные нулю правые части дифференциальных уравнений (1) и статических зависимостей (2).

Идентификации параметров статических состояний уравнений (1) пригодны обычная пассивная статистика, когда так называемый пакет тестирующих переходных режимов должен включать некоторое число характеристик разгона по тем или иным каналам. Одна из составляющих этого пакета приведена на рис. 4.

Переходные процессы, показанные на графике, в качестве пакета импульсных воздействий, предназначены для использования в решении проблемы идентификации динамической модели РРБ. Отметим, при минимизации функции (6) по варьируемым параметрам p_1, p_2 предусмотрено менять уровень предпочти-

тельности за счет коэффициента веса α , т.к. вторая составляющая функции невязки (6) нацелена на рассогласование по динамике.

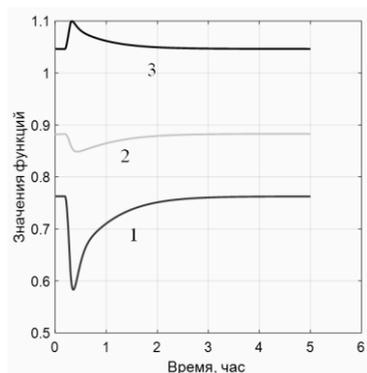
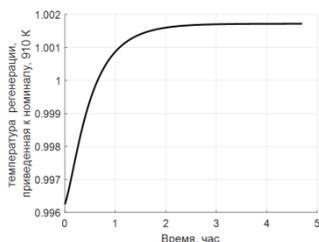


Рис.4. Реакция системы на импульсное снижение скорости катализатора: 1- степень закоксованности после регенерации; 2- температура реактора; 3- температура регенератора.

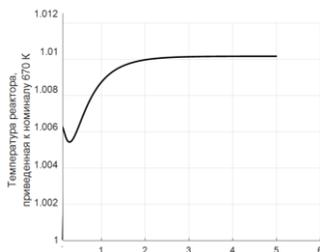
Получение передаточных функций по модели (1),(2) по каналам, вовлеченным к задаче локальной стабилизации режима

Наличие динамической модели системы в виде (1),(2) освобождает от хлопотливой операции получения кривых разгона на реальном объекте, заменяя ее 5%-й «ступенькой» на входах. В работе приводятся выкладки для линеаризация динамической модели по произвольно заданным каналам.

На рис. 5 (кривые а, б) показаны переходные процессы установления нового стационарного состояния после ступенчатого уменьшения скорости ввода воздуха в регенератор с размахом на 5% ($F_{raw}(t_0) = 1.05F_{raw}^{nom}$) и реакция системы (по температуре) на 5%-е ступенчатое изменение скорости ввода в реактор сырья ($F_{raw}(t_0) = 1.05F_{raw}^{nom}$). Как видно, в течение 1.2-14 часа система приобретает основную часть нового значения температуры регенерации и далее простоя этой переменной состояния не ощущим.



а)



б)

Рис. 5. Разгонные характеристики для получения передаточных функций.

Четвертая глава посвящена разработке алгоритмов решения проблемы контроля и управления тепловым режимом РРБ на основе нелинейной математической модели системы.

Снижение степени свободы тепловой модели реакторно-регенераторной системы за счет введения САР температуры в реакторе.

Снижение порядка системы дифференциальных уравнений (1),(2) за счет стабилизации температуры в реакторе посредством внешнего воздействия, которое не включено в вышеуказанное уравнение, служит важной цели – созданию визуальных представлений о динамике процесса. Современные информационные технологии, направленные на благоприятствование режимов функционирования человеко-машинных систем, получают все более развитие, убедительно показывая рациональность применения средств визуализации в процессах управления в реальном времени.

Достижение достаточного уровня стабильности во времени одной из координат реакторно-регенераторного блока позволит рассмотреть семейство траекторий в фазовом пространстве проекции трех координат. Очевидно, постановка и решение такого вопроса сопряжена с довольно серьезной задачей, поскольку температура в реакционной зоне находится под влиянием большого числа режимных факторов. Сюда относятся расход сырья на переработку, температура нагревания сырья и главное воздействие

– это влияние теплового режима регенерации катализатора. Поэтому эта задача успешно может быть решена только в том случае, если для тепловой системы найден надежный канал воздействия на эту координату. Нами обращено внимание на существование технологической линии ввода азота в транспортную линию (рис.6а).

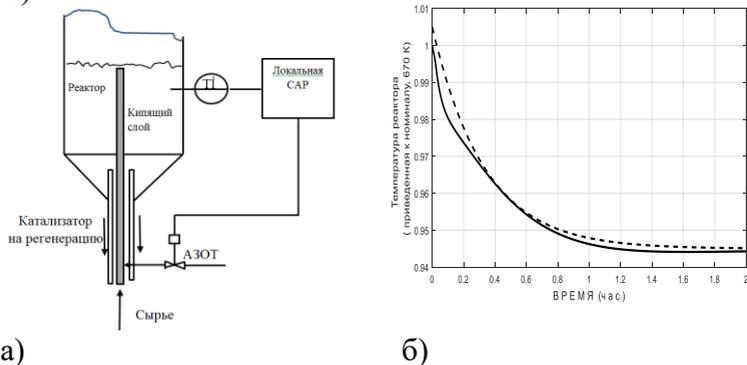


Рис.6. Принципиальная схема САР температуры с воздействием на расход азота в транспортную линию и отклик системы (1),(2) на ступенчатое возмущение со стороны увеличения ввода азота в транспортную линию реактора (сплошная кривая) и ее приближение (пунктирная кривая).

Обладая довольно весомым коэффициентом передачи, этот канал полностью изолирован от остальных переменных состояния и средств управления.

На рис.7. приведена структурная схема тракта обратной связи для стабилизации температуры реактора.

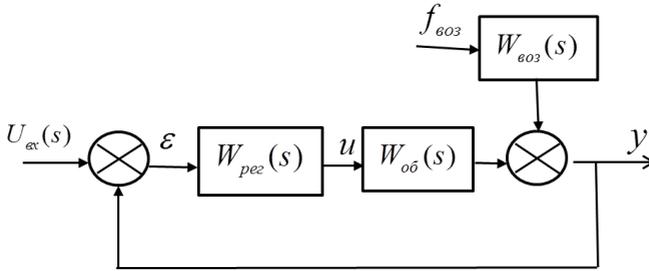


Рис.7. Структурная схема тракта обратной связи в системе стабилизации температуры реактора

Выделенные входы соответствуют заданию на стабилизируемое значение температуры и возмущению, которое приложено в точке действия обратной связи y . По обоим этим каналам представляет интерес изучение реакций системы с обратной связью.

При выборе закона регулирования мы исходили из соображения «от простого к сложному». Т.е. предполагали, что в данном контексте любое усложнение может привести к дополнительным нагромождениям, получив неоправданную сложность наглядности результата.

Согласно структурной схеме на основании преобразования Лапласа выпишем:

$$u(s) = \left(K + \frac{1}{T_u s} \right) \varepsilon(s) ; W_p(s) = \left(K + \frac{1}{T_u s} \right)$$

Выпишем уравнение передачи единичного скачка по каналу " $U_{эx} - y$ ":

$$y(s) = \frac{w_p(s)w_{оо}(s)}{1 + w_p(s)w_{оо}(s)} U_{эx} ; G_z(s) = \frac{w_p(s)w_{оо}(s)}{1 + w_p(s)w_{оо}(s)} .$$

Используя выражения (3.4.2.1) , (4.2.1.1) приведем соотношение (4.2.1.2) в конкретный вид:

$$G(s) = \frac{W_{ob}(s) \cdot W_p(s)}{1 + W_{ob}(s) \cdot W_p(s)};$$

где

$$W_{ob}(s) \cdot W_p(s) = W_0(s) = \left(\frac{k}{T^2 s^2 + 2T\zeta s + 1} \right) \left(K \cdot s + \frac{1}{T_u s} \right) =$$

$$= \frac{KkT_u s + k}{T^2 T_u s^3 + 2T\zeta T_u s^2 + T_u s}.$$

Составим структурную схему передачи сигнала возмущения на выход (температура реактора) с учетом того, то передаточную функция следует составить для нулевых начальных условий динамической системы. Это означает, что сигнал «задание на температуру реактора» необходимо принять равным нулю, т.е. $U_{ex} \equiv 0$. Тогда структурная схема передачи сигнала возмущения на выход примет следующий вид:

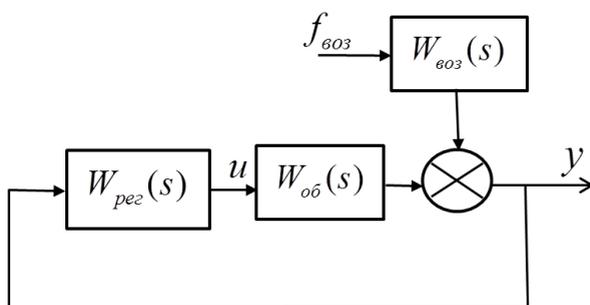


Рис. 8. Структура тракта передачи возмущения на выход

Далее, основываясь на принципе суперпозиции, т.е. на том факте, что каждое влияние проходит по собственному каналу, не зависимо от других, выпишем передаточную функцию замкнутой системы по каналу «расход сырья – температура реактора». Ссылаясь на структурную схему на рис.8, составим следующее соотношение:

$$G_f(s) = \frac{W_{\text{воз}}(s)}{1 + W_{\text{об}}(s) \cdot W_p(s)}; \text{ где}$$

$$W_{\text{воз}}(s) = \frac{k_1}{T_1^2 s^2 + 2T_1 \xi_1 s + 1};$$

$$W_{\text{об}}(s) \cdot W_p(s) = W_0(s) = \frac{KkT_u s + k}{T^2 T_u s^3 + 2T \xi T_u s^2 + T_u s}$$

Ниже приведены значения коэффициентов, использованных в уравнениях: $k = 0.23$; $k_1 = 0.14$; $T = 100 \text{ c}$; $psi = 1.2$; $T_u = 70 \text{ c}$; $K = 0.55$; $T_1 = 120 \text{ c}$; $psi_1 = 1.33$.

В работе далее посредством стандартных Матлаб-процедур основанных на поиске полюсов и нулей систем, заданных передаточными функциями, определяется характер переходных режимов (рис. 9).

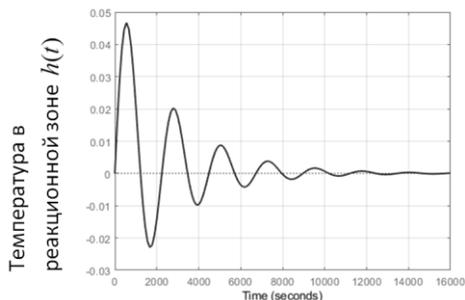


Рис.9. Реакция замкнутой системы на расход сырья.

Косвенное оценивание степени закоксованности катализатора по модели (1),(2).

В связи с этой задачей разработана принципиальная схема системы косвенного измерения на основе динамической модели.

Принцип, лежащий в основе этой системы, заключается в синхронизации решения системы дифференциальных уравнений с фазовыми траекториями реального промышленного объекта. Синхронизацию предполагается осуществить по температурным

координатам, которые вовлечены в аппаратную среду информационного обеспечения предполагаемой АСУ. Величины закоксованности катализатора должны определяться косвенно, т.е. по значениям двух соответствующих проекций вектора фазовых координат.

Очевидно, при таком подходе к задаче оценивания величин физически не реализуемых измерений основными проблемами встают, синхронизация названных двух вынужденных движений – «объект-модель».

Осуществление синхронизации модель-объект в динамике посредством периодического ввода начальных данных о состоянии реального объекта является широко используемым способом в практике управления промышленными системами. Отметим, одинаково эффективным может оказаться также ввод числовых значений векторов скоростей переменных состояний.

Синхронизацию в данной задаче необходимо осуществить исходя из двух стратегий: - это начальная синхронизация, когда необходимо задание начального времени и синхронизация в темпе течения процесса.

Последнее предполагает как, минимизацию рассогласования относительно переменных состояния, так и рассогласование их скоростей изменения.

На рис.10 приведена структура системы косвенного измерения степени закоксованности катализатора, требующая непрерывную адаптивную настройку.

В системе косвенного оценивания степеней закоксованности катализатора, основанной на синхронизации движений «модель-объект» функция рассогласования по координатам формируется в общем блоке, под названием формирователь градиента по аппроксимирующим параметрам. Этот блок ответственен также за периодическую адаптивную настройку аппроксимирующих параметров к внешним условиям функционирования объекта. Фор-

мируется градиент по параметрам с последующей коррекцией.

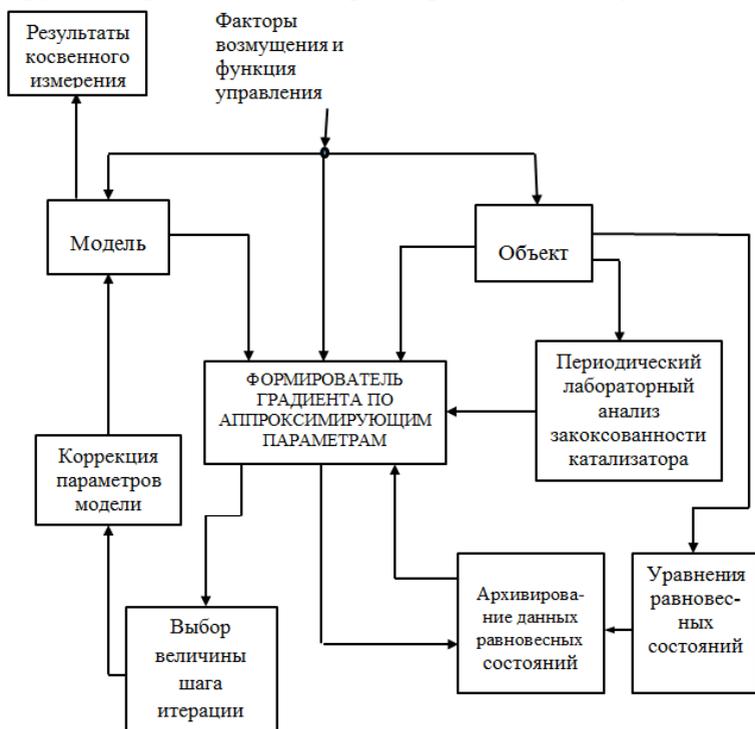


Рис.10. Принципиальная схема системы косвенного измерения степени закоксованности катализатора, требующая непрерывную адаптивную настройку.

В этом блоке решается важная задача синхронизации движений модели с движением реального объекта.

Для периодической коррекции применяется контрольное обновление данных. Причем обновлению подвергаются только измеряемые переменные состояния, т.е. осуществляется ввод в модель значений температурных координат системы и их производные.

Разработка систем локального управления переменными состояниями с применением программируемых логических контроллеров

В данном разделе центр внимания переносится в направлении взаимосвязанности вектора состояния системы (1),(2) и на вопрос обеспечения контролируемости остальных координат при оказании управляющих воздействий в рамках САР заданной координаты.

Ограниченность каналов воздействия на объект отрицательно может проявить себя именно в этом вопросе. Поэтому, вообще говоря, вопрос о стабилизации переменных состояний в целом для всех координат, может иметь своего корректного решения только в условиях прямых измерений всех переменных состояний. При этом необходимо применение многосвязных систем автоматического регулирования с передаточными функциями всех перекрестных каналов связей и наличия вектора управляющих воздействий с достаточной размерностью.

В отсутствие этих возможностей все же при выполнении определенных требований может быть поставлена задача стабилизации одной из координат рассматриваемой системы, включая в цепь обратной связи одну из косвенно оцениваемых координат, в частности, остаточную закоксованность катализатора после регенерации. С другой стороны, следует принять во внимание то, что при охвате обратной связью одной координаты необходим контроль выбегов за установленные границы остальных координат.

Отметим, эти особенности задачи контроля весьма успешно решаются средствами программируемых логических контроллеров.

Создание локальной системы стабилизации остаточной закоксованности катализатора на базе программируемого логического контроллера серии SIMATIC

Решение вопроса о косвенном измерении степени очищенности катализатора после регенерации создает реальные условия для создания замкнутых цепей управления целым рядом пере-

менных реакционно-регенерационных систем, т.е. САР температур в реакторе и регенераторе, степень закоксованности катализатора на выходе реактора и регенератора.

Отметим, что эти технологические переменные подвергнуты довольно сильному влиянию со стороны скорости циркуляции катализатора, и в то же время число независимых каналов воздействия на фазовые координаты не так много. Здесь речь идет, очевидно, о технологических переменных, охватываемых контурами обратных связей.

Что касается программных средств осуществления расчетов по установлению настроечных параметров и вопросов обеспечения необходимого качества и устойчивости синтезированной системы, то, как и в системе Simulink (приложение Matlab) и в системе программирования Simatic фирмы Siemens имеются достаточного объема модули соответствующего назначения. Отличительно, лишь то, что в библиотеке программных средств этих контроллеров отсутствует блок реализации передаточных функций, необходимых при симуляции и построении систем регулирования, отличных от одноконтурной схемы.

Этот вопрос решен за счет способа, предложенного группой сотрудников* кафедры «Автоматики и управления» Сумгаитского Государственного Университета, который позволяет реализовать передаточные функции произвольного порядка с запаздыванием.

В работе приводятся программы-функции, реализующиеся на языке LAD и содержащие 5 самостоятельных Network компонент. На рис.10. приведен Экран (Screen) для визуализации процесса локального контроля состоянием системы.

На рис.11 изображены переходные процессы при изменении задания регулятора от 0.22 на 0.27.

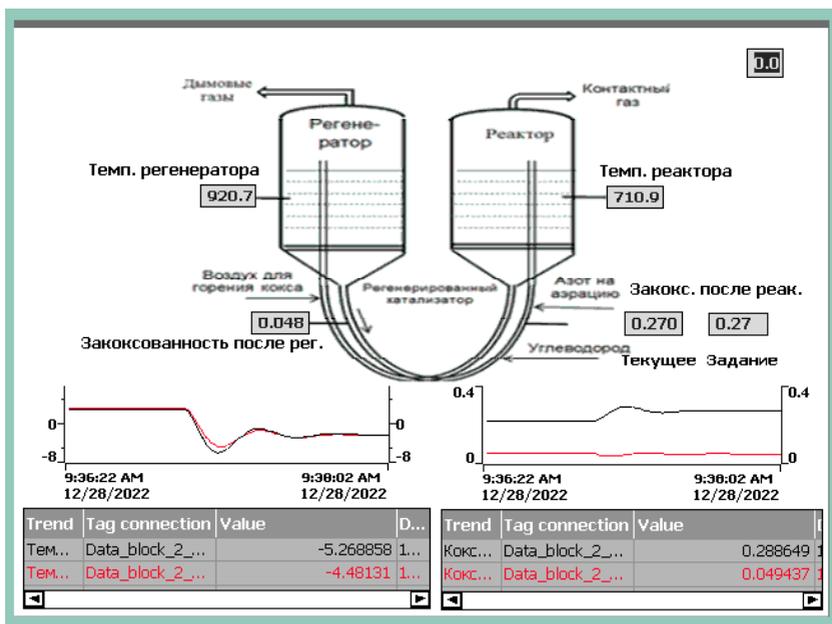


Рис.11. Экран (Screen) для визуализации, позволяющий в реальном масштабе времени выполнения функции контроля за измеряемым параметрам, как в цифровом, так и графическом виде, а также изменение задания регулятора выбранного параметра регулируемого параметра.

Время регулирования степени закоксованности катализатора на выходе реактора составляет 400 сек., а переходы из одного уравновешенного состояния в другое для степени остаточной закоксованности на катализаторе, на выходе регенератора составляет 460 сек., для температур в реакторе и регенераторе 450

⁴Алекперли Ф.А., Аскерова С.Ф., Симуляция системы управления технологическими процессами и адаптация ее программного обеспечения к промышленным условиям//ВКИТ, №9 (171), 2018, 39-48.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проводя обзор литературы выявлено, что проблема математического моделирования в целях управления процессами дегидрирования углеводородов в широкой области изменения фазовых переменных до настоящего времени остается не проработанной.

2. Учитывая особую важность оценивания степени коксования катализатора в решении задачи управления тепловым режимом осуществления технологического процесса и оптимизации выхода целевого продукта, важной задачей встает модельное оценивание указанных, физически не измеримых параметров.

3. Выявлено, что успешность решения проблемы виртуального измерения глубины коксовых отложений на катализаторе полностью зависит от точности динамической модели реакторно-регенераторного блока, которая может быть достигнута за счет применения кинетического подхода к описанию экзотермических реакционных процессов.

4. Особый режим регенерации имеет место, когда система подвергнута экстремному подогреванию с подачи дополнительного газа в регенератор. В этой ситуации математическая модель нуждается в структурных изменениях, которые заключаются в двухфазном описании псевдооживленного слоя катализатора в системе. Эта задача решается с учетом процессов массопередачи, имеющий место между плотным и разреженным фазами слоя псевдооживления.

5. Пористость структуры катализатора вызывает необходимость учета процессов передачи массы кислорода по внутренним микроскопическим каналам, вследствие чего эффективным оказывается применение фрактального описания структуры катализатора в разрабатываемой модели.

6. Проблема параметрической идентификации модели дегидрирования углеводородов имеет особенность в том, что параметрическую идентификацию необходимо провести как по данным равновесных режимов функционирования установки, так и по некоторым данным активного эксперимента переходных со-

стояний системы. В связи с этим вводится функция рассогласования специального вида, которая содержит как отклонение по статическим состояниям, так и по динамике переходных режимов.

7. В связи с важностью визуализации процесса управления предложено осуществить аппроксимацию системы выражением третьего порядка. Эффективность данной процедуры зависит от точности локальной системы стабилизации одной из координат динамической системы.

8. Разработана принципиальная схема системы косвенного измерения по динамической модели процесса дегидрирования изобутана, на основе параллелизма движений «объект – модель» при заданном начальном условии и обеспечении синхронизма.

9. Основываясь на целостной математической модели, удовлетворяющей необходимой динамической точности, достигнуты создание высококачественных локальных САР и обеспечение благоприятных условий их настройки. В работе эти системы строятся с использованием модулей среды ТІА (Totally Integrated Automation).

СПИСОК ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Гулиева Н.А. Снижение степени свободы четырехмерной модели системы реактор-регенератор для визуализации управления процессом дегидрирования углеводородов.//Bakı: Azərbaycan Ali Texniki Məktəblərinin Xəbərləri, - 2022, с.17. №6, - s.156-164.

2. Нагиев, А.Г., Амрахова, Н.А. Моделирование нестационарных тепловых режимов реакторного блока установки кк для пуска и управления в критических ситуациях// «азерб.хим.журнал». -2000,№4. -с.40-45.

3. Нагиев, А.Г., Мамедов, Дж. И., Гулиева, Н.А. Моделирование нестационарных процессов переноса вещества и адсорбции в пористой среде на основе фрактала «Дендрит»// Химия и химическая технология.- Иваново:- 2014. т:57, №8. -с.80-84.

4. Нагиев, А.Г., Нагиев, Г.А., Гулиева, Н.А. О структуре пространства состояний тепловой модели реакционно-регенерационных систем с кипящим слоем катализатора и принципах визуализации управления// Теор. Основы хим. Технол. РАН. -2019. -т:53, №1.- с.31-45.
5. Нагиев, Г.А., Гулиева, Н. А. Косвенная оценка переменных состояния реакционно-регенерационных систем на основе компьютерной симуляции// Измерительная техника. - 2021, № 8.-с.41-49.
6. Алиев, А.М., Нагиев, Г.А, Гулиева, Н.А. Об эволюции функций распределения концентрационных и температурных полей в моделях химических реакторов вытеснения и проблема описания траекторий// сум. гос. университет.научные известия. - 2015.т:15, №1, - с.50-54
7. Нагиев, Г.А., Садыгов В.В., Гулиева Н.А. Жесткие системы дифференциальных уравнений и пути совершенствования алгоритмов численного решения// Сум. гос. университет. Научные известия.-2016, т:16, №2, - с.61-65
8. Гулиева, Н.А. Математическое моделирование для управления тепловыми режимами реакционно-регенерационной системы, осуществляющей дегидрирование изобутана// Сум. гос. университет.научные известия.- 2018, т:18, №2, - с.66-70
9. Нагиев, Г.А., Садыгов, В.В., Гулиева, Н.А. Алгоритмизация численного анализа динамических систем с дифференциально-алгебраическими связями.// интеллектуальные технологии в машиностроении. междунароная научно-техническая конференция. – Баку: - 2016, -с.48-50.
10. Нагиев, Г.А., Гулиева, Н.А. Моделирование каталитических процессов дегидрирования с учетом меняющейся валентности хрома// Международная научная конференция, информационные системы и технологии: достижения и перспективы.- Сумгаит: -2018,- с.155-157
11. Гулиева, Н.А. Оперативный контроль степени закоксованности катализатора в реакционно-регенерационных системах по измерениям их температурных координат// прикладные

вопросы математики и новые информационные технологии, IV Республиканская научная конференция . -Сумгаит:-2021, - с.237-239

12. Гулиева, Н.А. О фрактальном представлении структуры высокопористых твердых катализаторов для математического моделирования адсорбционных процессов// Doktorantların və gənc tədqiqatçıların XIX respublika elmi konfransının materialları.- Bakı:-2015, - с.169-170

13. Нагиев, Г.А., Гулиева, Н.А. Об аппроксимации решений моделей реакторов вытеснения для описания их нестационарных режимов функционирования// Akademik Toğrul Şaxtaxtinskiyin 90 illik yubileyinə həsr olunmuş respublika elmi konfransı-Bakı: - 2015, - с.84.

14. Нагиев, Г.А., Садыхов, В.В., Гулиева, Н.А. Дендритовая модель пористого зерна адсорбента как пространственно-геометрический объект со свойством фрактальности//III Respublika elmi konfrans. Riyaziyyatın tətbiqi məsələləri və yeni informasiya texnologiyaları.- Sumqayıt: - 2016, - с.149

15. Гулиева, Н.А. О численном решении модельных уравнений механических систем с вариаторами// Doktorantların və gənc tədqiqatçıların XXI respublika elmi konfransı.- Bakı:-2017, с. 42

16. Нагиев, Г.А., Гулиева, Н.А. Двухфазная модель структуры кипящего слоя катализатора для моделирования процессов дегидрирования углеводородов// Международная научно-техническая конференция, посвященная дню химика и 40-летию кафедры химико-технологических процессов филиала уфимского государственного нефтяного технического университета г. Салават- Уфа:- 2017, -с.189-190

17. Нагиев, Г.А., Гулиева, Н.А. Об одном подходе к снижению размерности динамической системы для визуализации управления на примере процесса дегидрирования углеводородов//Informasiya sistemləri və texnologiyalar nailiyyətlər və perspektivlər. II beynəlxalq elmi konfransı. –Sumqayıt: -2020, с. 40-42

Личный вклад соискателя в публикациях, выполненных в соавторстве:

[2,3] -Параметрическая идентификация пористой структуры катализатора на основе фрактала дендрит с использованием в модели блока реактор-регенератор;

[4] -Параметрическая идентификация модели процессов, осуществляемых в кипящем слое катализатора и получение численного решения;

[5] –Решение задачи математического моделирования для косвенного измерения закоксованности катализатора и анализ точности оценки;

[6] –Оценивание гидродинамических параметров потока катализатора в поршневом течении в транспортных линиях;

[7] – Определение констант скоростей в кинетической модели среды реактор-регенератор.;

[9] –Разработка программного модуля определения длин итеративных шагов в задаче численного решения дифференциально-алгебраических систем уравнений;

[10,14] –Определение кинетических параметров в процессах дегидрирования углеводородов;

[13] - Оценивание параметров химической кинетики в реакторе идеального вытеснения по реакциям отложения кокса на поверхность катализатора;

[16] – Оценивание параметров межфазового массообмена в модели реактора в кипящем слое катализатора;

[17] - Синтез системы стабилизации в процессе дегидрирования углеводородов и алгоритм ее настройки.