

На правах рукописи



Креницын Николай Станиславович

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРОИЗВОДСТВА
ГЕКСАФТОРИДА УРАНА**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (химическая промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2015 г.

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ).

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент,
Дядик Валерий Феодосиевич

Официальные оппоненты: **Сырямкин Владимир Иванович**
доктор технических наук, профессор,
Томский государственный университет,
г. Томск, зав. каф. «Управления
качеством»

Ганджа Тарас Викторович
кандидат технических наук, ТУСУР,
г. Томск, доцент каф. моделирования и
системного анализа

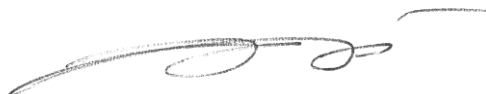
Ведущая организация – Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ
МИФИ), г. Москва

Защита состоится «25» декабря 2015 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.14 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ) по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 2, 10-й корпус, ауд. 332.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ТПУ, расположенной по адресу: г. Томск, ул. Белинского, д. 55, и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/4060/worklist>.

Автореферат разослан «21» октября 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Жерин И.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Задачи управления и повышения эффективности технологических процессов (ТП) производств ядерного топливного цикла (ЯТЦ) имеют важное народнохозяйственное значение, поскольку их решение способствует ускоренному развитию атомной энергетики и согласуется с политикой Правительства Российской Федерации. Решение этих проблем позволяет повысить эффективность и, как следствие, производительность ТП производства ядерного топлива для АЭС, а также улучшить их показатели по безопасности и экологичности.

Используемые в настоящее время в отечественной и зарубежной промышленности технологии получения гексафторида урана (ГФУ) являются отработанными и отвечают технико-экономическому уровню развития современной атомной промышленности. За более чем 50-ти летнюю историю развития техническая и аппаратурная база производства гексафторида урана (ПГУ) достигла такого уровня, при котором эффективность технологического процесса лимитируется качеством управления этим процессом. Поэтому крайне важной становится задача оптимального управления ТП ПГУ, решить которую без развитой автоматизированной системы управления (АСУ) невозможно.

Известные на сегодняшний день системы управления, функционирующие на предприятиях, производящих ГФУ, не обеспечивают эффективное автоматизированное управление аппаратами двух технологических линий действующего на сублиматном заводе (СЗ) АО «Сибирский химический комбинат» (СХК) ПГУ. Решение задачи разработки новых способов автоматизированного управления ТП ПГУ создаст значительный задел в решении основных проблем эффективного и надежного управления ТП ЯТЦ.

Актуальность темы представляемой работы определяется:

- отсутствием автоматизированной системы согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты двух взаимозависимых технологических линий ПГУ, что существенно усложняет работу оперативно-технологического персонала;

- необходимостью обеспечения максимального улавливания ценных компонентов (F_2 , UF_6 , HF) из хвостового технологического газа двух технологических линий на закиси-окиси урана (ЗОУ);

- необходимостью повышения динамической точности систем автоматического управления пламенными реакторами (САУ ПР) двух технологических линий ПГУ.

Степень разработанности. Способы ручного и автоматизированного управлений ТП ПГУ достаточно полно проработаны теоретически

сотрудниками ВНИИХТ и ТПУ и эмпирически на производственных площадках АО СХК и АО АЭХК. Результаты этих исследований легли в основу систем управления отдельными технологическими узлами и аппаратами. Значительный вклад в развитие научной основы для решения задач автоматизации процессов управления ПГУ внесли ученые: Дядик В. Ф., Береза В. Н., Онищук А. Н., Ливенцов С. Н., Цегельницкий М. М., Байдали С. А. Особенностью технологической схемы действующего ПГУ на СЗ СХК является комбинированный способ транспортировки полупродукта между аппаратами, включающий контейнерный способ и автоматизированную систему импульсного пневмотранспорта. В связи с этим задача синтеза АСУ комплексом аппаратов фторирования и улавливания ПГУ на СХК является уникальной.

Цель диссертационной работы – повышение эффективности ПГУ, одновременно перерабатывающего оксиды и тетрафторид урана. В рамках достижения цели диссертационной работы решались следующие задачи:

1) анализ действующего на СЗ СХК ПГУ с целью структурного синтеза АСУ ТП, протекающими в двух технологических линиях производства;

2) разработка автоматизированной системы согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты двух технологических линий ПГУ;

3) разработка систем автоматической стабилизации коэффициентов стехиометрического избытка оксидов урана (ОУ) над ценными улавливаемыми компонентами в аппаратах вторых ступеней улавливания (ВСУ) двух технологических линий;

4) модернизация САУ ПР с целью повышения ее динамической точности.

Научная новизна работы.

1) Разработан алгоритм функционирования АСУ ТП ПГУ, обеспечивающий согласованную работу аппаратов фторирования и улавливания. Предлагаемый алгоритм функционирования, в отличие от существующих, предполагает стабилизацию на требуемом уровне суммарного количества полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных питателях аппаратов первых ступеней улавливания (ПСУ).

2) Разработана математическая модель аппарата улавливания (АУ) ПГУ, позволяющая синтезировать и испытывать алгоритмы управления действующими аппаратами производства. Отличительной особенностью данной модели от существующих является учет в описании кинетики процессов улавливания основных физических параметров, характеризующих состояние взвеси и технологического газа в реакционном пространстве.

3) Разработан алгоритм активной идентификации параметров модели технологического объекта с самовыравниванием в замкнутом контуре управления, отличающийся от известных алгоритмов способом нахождения

стартовых значений оптимизируемых параметров модели.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанный алгоритм активной идентификации параметров модели технологического объекта с самовыравниванием в замкнутом контуре управления может быть использован в составе адаптивных систем управления технологическими процессами с изменяющимися во времени параметрами.

Разработанная математическая модель АУ ПГУ, адекватно описывающая технологические процессы в противоточных аппаратах, может быть использована при синтезе алгоритмов управления действующими аппаратами производств химической промышленности.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что разработанный программный модуль «ОПМ ПГУ» используется технологическим персоналом СЗ СХК с целью определения оптимальных величин массовых расходов газообразных и твердофазных продуктов, загружаемых в аппараты производства. САУ ПР приказом по СЗ СХК введена в промышленную эксплуатацию 24.09.2014. Основным эффектом от внедрения заключается в стабилизации основных технологических переменных производства, что позволило уменьшить диапазон отклонения технологических переменных от оптимальных значений, снизить количество урансодержащих оборотов, требующих дополнительной переработки, сократить количество внеплановых остановок технологического оборудования. В целом это обеспечило улучшение качества управления всем производственным комплексом, а также увеличило межремонтный пробег аппаратов фторирования, десублимации и улавливания двух технологических линий. Экономический эффект от внедрения результатов диссертационных исследований составляет 7,3 млн. руб. в год. Результаты работы также внедрены в учебный процесс на кафедре «Электроника и автоматика физических установок» (ЭАФУ) ФГАОУ ВО НИ ТПУ. Полученные результаты подтверждены актами внедрения.

Методология и методы исследования. Для достижения сформулированной цели и решения поставленных задач в работе использовались методы теории автоматического управления, математического моделирования, теории адаптивных систем управления и натурные испытания на производстве. При разработке алгоритма функционирования АСУ ТП ПГУ использовался программный модуль, разработанный в ходе диссертационной работы, а также программный комплекс Matlab.

Степень достоверности и апробация работы. Принятые в работе авторские решения основаны на анализе ТП действующего производства, современных методов математического моделирования и автоматического управления.

Достоверность результатов подтверждается доказательством адекватности разработанных математических моделей (с помощью общепринятых методов и методик установлено, что полученные математические модели описывают исследуемые процессы с погрешностью менее 12 %), а также успешными испытаниями разработанных комплексов алгоритмов и программ в условиях действующего производства.

Результаты исследований докладывались на следующих конференциях: международная научная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения профессора А. А. Воробьева «Становление и развитие научных исследований в высшей школе», г. Томск, 2009 г.; V международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы атомной энергетики и промышленности», г. Томск, 2010 г.; I всероссийская научно-практическая конференция молодых атомщиков Сибири «Ядерная энергетика: технология, безопасность, экология, экономика, управление», г. Томск, 2010 г.; XV, XVI, XVII, XIX, XX международные научно-практические конференции «Современные техника и технологии», г. Томск, 2009, 2010, 2011, 2013, 2014 г.г.; отраслевая научно-практическая конференция «Школа молодых атомщиков Сибири. Перспективные направления развития атомной отрасли», г. Томск, 2011 г.; VI международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности», г. Томск, 2014 г.; V международная научно-практическая конференция «Школа-конференция молодых атомщиков Сибири», г. Томск, 2014 г.; научно-технические советы СЗ СХК, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 г.г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 работы, в том числе: 6 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК; 2 статьи в зарубежном издании; 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ; 1 отчет о НИР с государственной регистрацией; 14 тезисов докладов на Российских и Международных конференциях.

Реализация результатов работы. Выполняемые работы были поддержаны:

— грантом Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 г. г. по теме «Разработка новых технологий автоматизированного управления и оптимизации ТП производств ядерного топливного цикла»;

— четырьмя хоздоговорными НИР между ТПУ и СЗ СХК по теме диссертации.

Положения, выносимые на защиту:

1) Автоматизированная система согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты двух технологических линий, обеспечивающая

коррекцию режимов работы взаимозависимых аппаратов фторирования и улавливания.

2) Динамическая пространственно-распределенная модель АУ ценных компонентов (F_2 , UF_6 , HF) на ОУ, с помощью которой были синтезированы и испытаны алгоритмы управления ТП в действующих на СЗ СХК аппаратах ПГУ.

3) Системы автоматической стабилизации коэффициентов стехиометрического избытка ОУ над ценными улавливаемыми компонентами в аппаратах ВСУ двух технологических линий ПГУ, обеспечивающие максимальное улавливание ценных компонентов (F_2 , UF_6 , HF) на ОУ.

4) САУ ПР, обеспечивающая стабилизацию концентрации фтора на выходе ПР за счет адаптации параметров настройки регулятора и компенсации влияния основного возмущения.

Автор диссертации принимал непосредственное участие в общей постановке задач, в проведении аналитического обзора и патентных исследований по теме диссертации, разработке и исследовании математических моделей, разработке и исследовании алгоритмов управления, проведении экспериментальных исследований на действующем производстве, анализе, интерпретации и обобщении полученных результатов, составлении отчетных документов, написании статей, докладов, формулировании научных положений, выносимых на защиту, и выводов, а также во внедрении результатов исследований в производство. Личный вклад автора диссертации в получение результатов приведенных исследований и разработок составляет не менее 70 %.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, содержащих основные результаты и выводы, заключения, списка литературы и приложений; включает 62 рисунка, 17 таблиц. Основное содержание изложено на 181 странице машинописного текста, приложение – на 5 страницах, список литературы включает 96 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, поставлены проблемы, определены цели и направления исследований, приведена общая характеристика работы.

В первой главе проведен анализ текущего состояния сублиматного производства в Российской Федерации и мире. Проанализирована технологическая схема ПГУ на СЗ СХК, состоящая из двух взаимозависимых технологических линий (оксидная и тетрафторидная), каждая из которых включает аппараты фторирования, десублимации и двух АУ. Ввод исходного

твёрдофазного урансодержащего сырья (тетрафторид урана (ТФУ), ЗОУ, полупродукт) в производство осуществляется через шнековые питатели АУ двух технологических линий, а технический фтор распределяется между ПР оксидной и тетрафторидной линий автономной АСУ. Взаимозависимость технологических линий выражается в том, что выгружаемый из аппарата ВСУ полупродукт распределяется между двумя технологическими линиями контейнерным способом.

Используя ранее составленные сотрудниками кафедры ЭАФУ ТПУ модели ПР, ДС и АУ нами была разработана статическая модель ПГУ, описывающая поведение оксидной и тетрафторидной технологических линий. Для проведения исследований модель ПГУ была реализована в среде Microsoft Visual Studio 2012, результатом чего явился оптимизирующий программный модуль ПГУ «ОПМ ПГУ», вид главного окна которого представлен на рисунке 1.

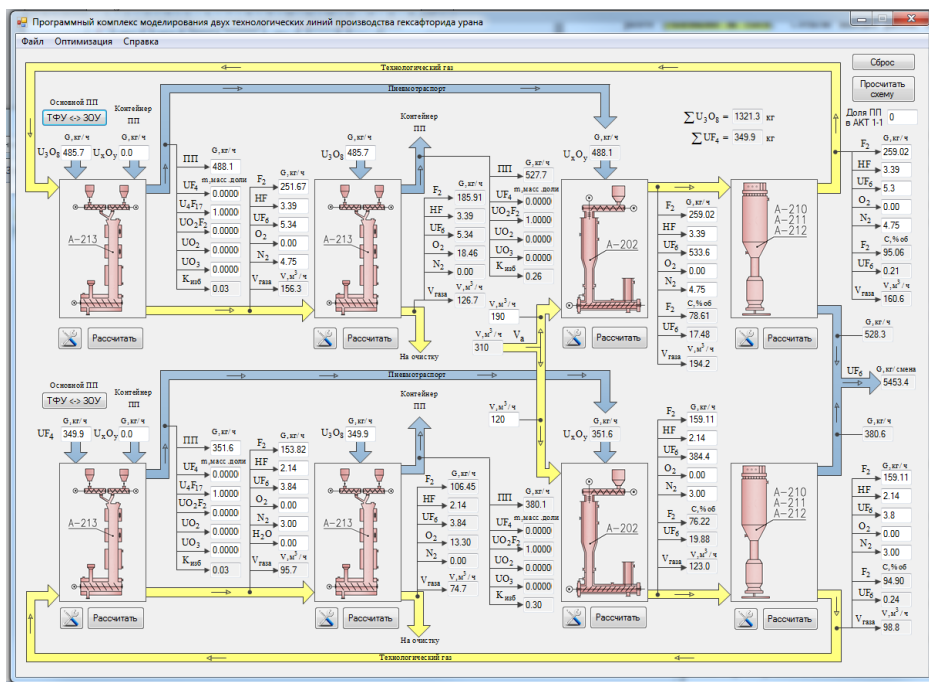


Рисунок 1 – Главное окно программного модуля, описывающего поведение двух технологических линий ПГУ в статике

Проверка адекватности «ОПМ ПГУ» производилась путем сопоставления рассчитанных на модели и выбранных из производственных данных основных измеряемых технологических переменных, количественно характеризующих производительность аппаратов: суммарного массового расхода ТФУ; суммарного массового расхода ЗОУ; суммарного массового расхода полупродукта в ПР двух технологических линий. Относительные отклонения сопоставляемых переменных, рассчитанные на 5 различных интервалах времени, не превысили 6%, что доказывает достоверность результатов расчетов на программном модуле «ОПМ ПГУ».

Использование в настоящее время системы импульсного пневмотранспорта для непрерывной передачи полупродукта из АУ в ПР, а также взаимозависимость технологических линий стали основными причинами того, что существующая АСУ ТП ПГУ не обеспечивает требуемого качества управления.

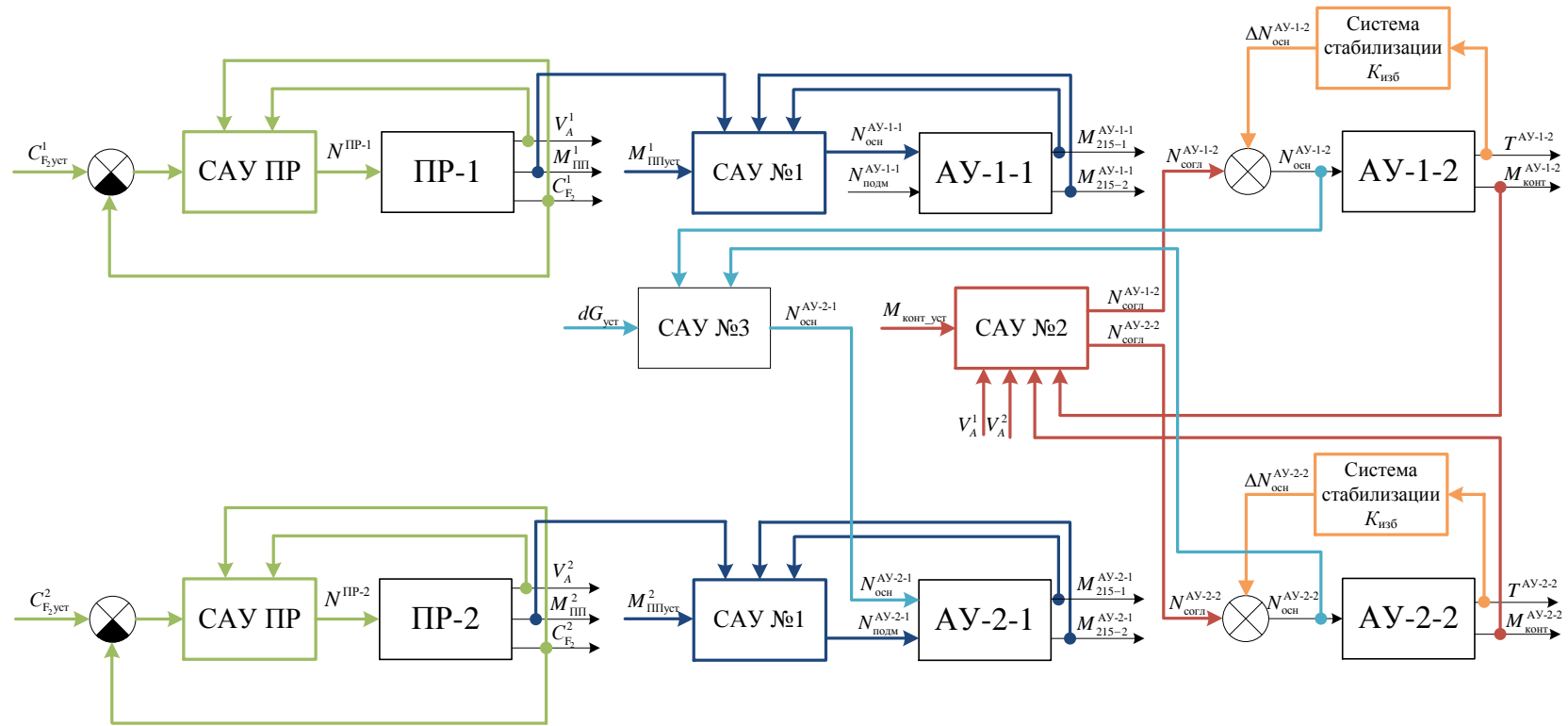
Посредством экспериментальных исследований на «ОПМ ПГУ» был разработан алгоритм функционирования АСУ ТП ПГУ, заключающийся в выполнении следующих целей:

- стабилизации суммарного количества полупродукта, одновременно находящегося в бункере загрузки ПР и камерных питателях аппарата ПСУ каждой из двух технологических линий;
- стабилизации суммарного количества полупродукта, накапливаемого в транспортных контейнерах;
- стабилизации отношения массовых расходов ТФУ и ЗОУ;
- стабилизации коэффициентов стехиометрического избытка ОУ над улавливаемыми компонентами в аппарате ВСУ каждой из двух технологических линий;
- стабилизации концентрации фтора на выходе ПР двух технологических линий.

Достижение сформулированных целей локальными САУ позволит решить задачу автоматизации расчета управляющих воздействий на шнеки загрузки ПР и аппаратов первой и второй ступеней улавливания двух технологических линий действующего на СХК ПГУ, обеспечивая при этом их согласованную работу.

В результате проведенных патентных исследований в Российской Федерации и других странах не найдены свидетельства о регистрации интеллектуальной собственности, препятствующие применению полученных нами результатов при разработке способов автоматизированного управления ТП ПГУ.

В результате была разработана структура (рисунок 2) АСУ ТП ПГУ, включающая: систему автоматической стабилизации концентрации фтора на выходе ПР (САУ ПР); систему автоматической стабилизации на заданном уровне суммарного количества полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных питателях аппарата ПСУ (САУ №1); систему автоматической стабилизации на заданном уровне суммарного количества полупродукта, накапливаемого в транспортных контейнерах (САУ №2); систему автоматической стабилизации на заданном уровне отношения массовых расходов ТФУ и ЗОУ (САУ №3); систему автоматической стабилизации коэффициента стехиометрического избытка ОУ над ценными улавливаемыми компонентами в аппарате ВСУ.



ПР-1, ПР-2 – ПР оксидной и тетрафторидной линий; АУ-1-1, АУ-2-1 – аппараты ПСУ оксидной и тетрафторидной линий; АУ-1-2, АУ-2-2 – аппараты ВСУ оксидной и тетрафторидной линий; $C_{F_2,уст}^1, C_{F_2,уст}^2$ – уставки на концентрацию фтора на выходе ПР оксидной и тетрафторидную линий, % об.; $N^{ПР-1}, N^{ПР-2}$ – частоты вращения шнеков загрузки ПР оксидной и тетрафторидной линий, об/мин.; V_A^1, V_A^2 – объемные расходы технического фтора на оксидную и тетрафторидную линии, m^3 ; $M_{ПП}^1, M_{ПП}^2$ – веса бункеров загрузки ПР оксидной и тетрафторидной линий, кг; $C_{F_2}^1, C_{F_2}^2$ – концентрация фтора на выходе ПР оксидной и тетрафторидной линий, % об.; $M_{ПП,уст}^1, M_{ПП,уст}^2$ – уставки на суммарное количество полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных питателей оксидной и тетрафторидной линий, кг; $dG_{уст}$ – уставка на отношения массовых расходов ТФУ и ЗОУ, отн. ед.; $N_{осн}^i, N_{подм}^i$ – частоты вращения шнеков загрузки и подмешки i -го аппарата, об/мин; M_{215-1}^i, M_{215-2}^i – веса камерных питателей i -го аппарата, кг; $M_{конт,уст}$ – уставка на суммарное количество полупродукта, накапливаемого в транспортных контейнерах, кг; $T^{АУ-1-2}, T^{АУ-2-2}$ – температуры реакционных зон аппаратов ВСУ оксидной и тетрафторидной линий, $^{\circ}C$; $M_{конт}^{АУ-1-2}, M_{конт}^{АУ-2-2}$ – вес контейнеров под аппаратами ВСУ оксидной и тетрафторидной линий, кг

Рисунок 2 – Структурная схема АСУ ТП в аппаратах двух технологических линий ПГУ

Во второй главе представлена разработанная в программном комплексе Matlab разработана динамическая математическая модель ПГУ, состоящего из двух технологических линий. Модель ПГУ описывает системы импульсного пневмотранспорта, исполнительные и регулирующие органы, автоматическое переключение загрузки полупродукта в бункеры, дискретность пневмотранспортной передачи полупродукта из узла выгрузки аппарата ПСУ в бункер загрузки ПР, динамику перемещения полупродукта по горизонтальным частям (ГЧ) АУ, а также учитывает инерционность и запаздывание контролируемых технологических переменных.

Адекватность составляющих динамической модели ПГУ, кроме модели ГЧ АУ, доказана в предыдущих работах. Достоверность результатов моделирования ГЧ производилась путем сопоставления количества выгружаемого из АУ в камерные питатели полупродукта, рассчитанного на модели, и реальных производственных данных весоизмерительных устройств на интервалах времени, где происходило опустошение наполненной и наполнение опустошенной ГЧ АУ.

Относительные отклонения времен от момента прекращения загрузки полупродукта в АУ до опустошения ГЧ, и от момента начала загрузки полупродукта в АУ до отклика весоизмерительных устройств камерных питателей, рассчитанных на модели, и реальных производственных данных составили 6 % и 12 % соответственно.

Используя динамическую модель ПГУ, была синтезирована автоматизированная система согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты двух технологических линий действующего на СЗ СХК ПГУ, включившая в свой состав три локальные САУ. Результатом работы САУ №1 (рисунок 2) являются управляющие воздействия на шнеки загрузки аппаратов ПСУ двух технологических линий, в результате чего стабилизируется требуемое суммарное количество полупродукта, накапливаемого в бункере загрузки ПР и камерных питателях аппарата ПСУ каждой из двух технологических линий. САУ №2 обеспечивает стабилизацию на требуемом уровне суммарного количества полупродукта, накопленного в транспортных контейнерах за счет коррекции управляющих воздействий на шнеки загрузки аппаратов ВСУ обеих линий. САУ №3, построенная по принципу программного управления, обеспечивает требуемое отношение массовых расходов ТФУ и ЗОУ в аппараты ПГУ за счет коррекции управляющего воздействия на шнек загрузки аппарата ПСУ тетрафторидной линии.

Исследование разработанной автоматизированной системы согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты двух технологических линий производилось путем проведения вычислительных экспериментальных исследований в программном комплексе Matlab с

использованием динамической модели ПГУ. Анализировались реакции на характерные для производства возмущения: изменение распределения технического фтора по двум линиям; изменение уставок на отношение массовых расходов ТФУ и ЗОУ; изменение градуировочного коэффициента шнека загрузки аппарата ВСУ тетрафторидной линии. Анализ результатов исследований подтвердил, что поставленная перед автоматизированной системой согласования загрузок задача удержания в допустимом диапазоне управляемых переменных выполняется. Максимальные динамические ошибки регулирования, приведенные к допустимым диапазонам по трем стабилизируемым переменным, не превысили 20 %.

В третьей главе разработана динамическая пространственно-распределенная модель АУ.

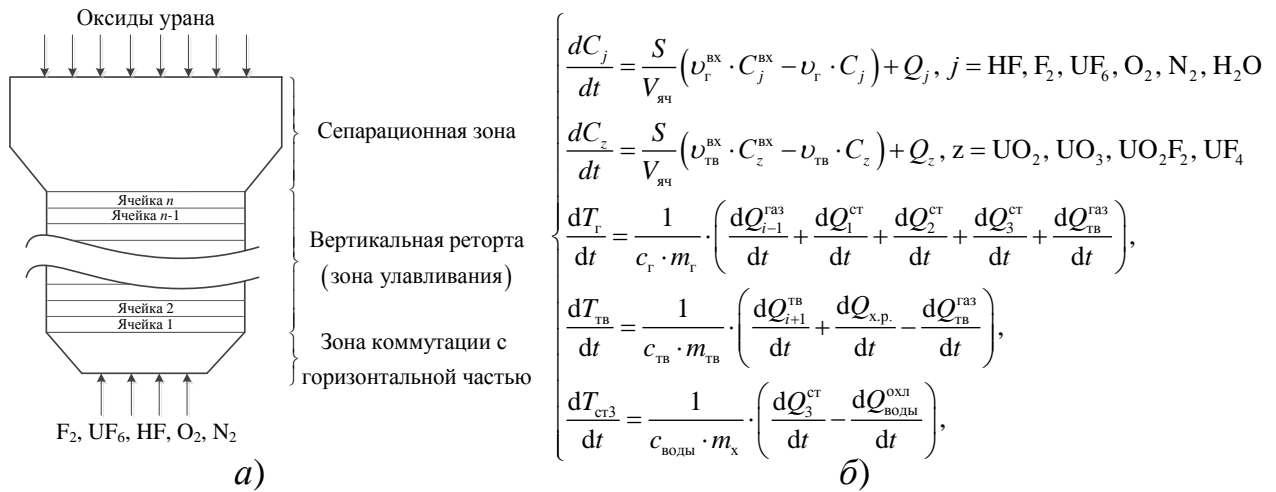
Проведенные исследования доказали, что преобладающая часть твердофазных частиц в АУ оксидной и тетрафторидной линий находятся в псевдооживленном состоянии. Рассчитаны времена нахождения газа и взвеси частиц в реакционном пространстве АУ, а также межкомпонентного выравнивания температур.

Использование закона действующих масс в кинетической форме позволило составить кинетическую составляющую модели АУ, учитывающую влияние термо- и гидродинамических режимов работы аппарата на скорость протекания химических реакций улавливания. Погрешность адекватности разработанной кинетической составляющей модели АУ данным, полученным на лабораторной установке, составила менее 10 %.

Разработанная модель АУ имеет ячеечную структуру, позволившую учесть противоточный характер движения взвеси и газа, позонное охлаждение и нагрев корпуса реактора, переменную по высоте реторты скорость газа и взвеси, возможность изменения граничных и начальных условий, соответствующих целям моделирования. Структура модели АУ и математическое описание ее ячейки представлены на рисунке 3.

Проверка адекватности модели АУ действующей установке проводилась путем расчета приведенных средних квадратических отклонений, рассчитываемых по модели и измеренных на аппарате ВСУ температур реакционной зоны на высотах установки термопар (T_4 , T_5 и T_6 рисунка 4) при подаче на вход модели значений, измеренных на производстве технологических переменных: массового расхода ЗОУ в АУ, объемного расхода технического фтора, массового расхода полупродукта в ПР, концентрации фтора на выходе ПР.

Приведенные к средним значениям температур каждой из контролируемых зон погрешности адекватности, рассчитанные на пяти интервалах времени, не превысили 5 %, что является достаточным для ее



C_n – концентрация n -го компонента, моль/м³; $V_{\text{яч}}$ – объем ячейки, м³; S – площадь горизонтального сечения ячейки, м²; $\nu_r^{\text{вх}}, \nu_r$ – скорости газа на входе и выходе ячейки, м/с; Q_n – скорость притока n -го компонента в ячейку в результате химической реакции, моль/(м³ с); $\nu_{\text{тв}}^{\text{вх}}, \nu_{\text{тв}}$ – скорости взвеси на входе и выходе ячейки, м/с; $\frac{dQ_k^{\text{ст}}}{dt}$ – скорость передачи тепла от k -ого теплового контура в реакционную зону, Дж/с; $\frac{dQ_{\text{тв}}^{\text{газ}}}{dt}$ – количество тепла, передаваемое технологическому газу от взвеси, Дж/с; $\frac{dQ_{i-1}^{\text{газ}}}{dt}, \frac{dQ_{i+1}^{\text{тв}}}{dt}$ – количество тепла от нижестоящей и вышестоящей ячеек, Дж/с; $c_r, c_{\text{тв}}, c_{\text{х}}$ – теплоемкости технологического газа, взвеси и хладагента, Дж/(кг·К); $m_{\text{х}}$ – масса хладагента, заполняемого нижний тепловой контур АУ, кг; $\frac{dQ_{\text{воды}}^{\text{охл}}}{dt}$ – скорость отвода тепла из нижнего теплового контура за счет обновления хладагента, Дж/с

Рисунок 3 – Структурная схема ячейечной модели АУ (а) и математическое описание ее ячейки (б)

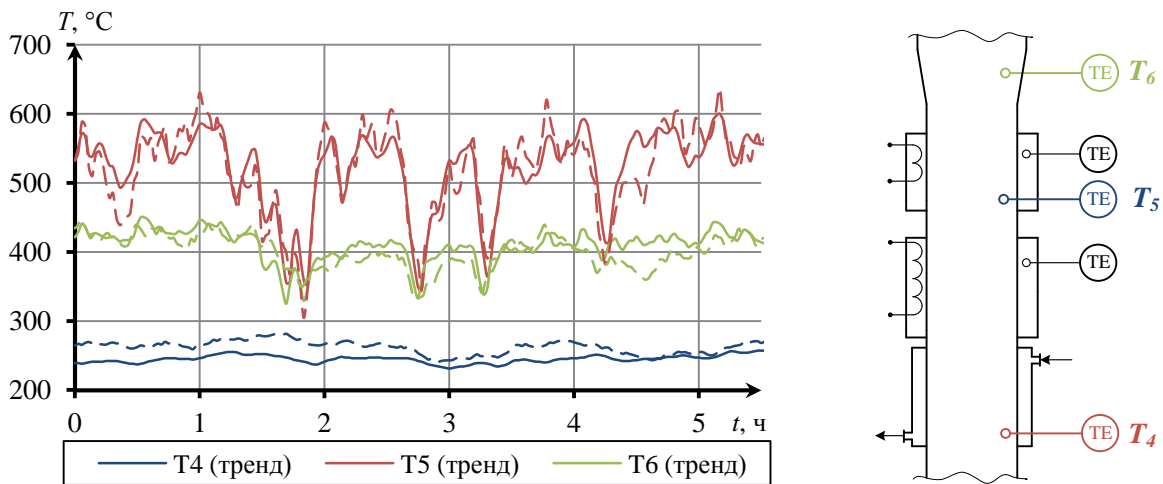


Рисунок 4 – График сравнения значений температур реакционной зоны аппарата ВСУ, рассчитанных в модели и выбранных из производственных данных, (а) на высотах установки термпар в реторте аппарата ВСУ (б)

использования при синтезе алгоритмов управления аппаратами ВСУ.

Путем экспериментальных исследований на модели АУ были выявлены зависимости температур реакционной зоны АУ от массового расхода фтора

на его входе, на основе которых были разработаны системы автоматической стабилизации коэффициентов стехиометрического избытка ($K_{изб}$) ОУ над ценными улавливаемыми компонентами обеих линий. При этом корректирующие воздействия на шнеки загрузки аппаратов ВСУ оксидной и тетрафторидной линий рассчитываются по выражениям (1) и (2) соответственно.

$$\Delta N_{осн}^{AY-1-2} = 2,09 \cdot 10^{-4} \cdot (T^{AY-1-2} - T_{уст}^{AY-1-2}) / k_{град}^{AY}, \quad (1)$$

$$\Delta N_{осн}^{AY-2-2} = 5,57 \cdot 10^{-4} \cdot (T^{AY-2-2} - T_{уст}^{AY-2-2}) / k_{град}^{AY}, \quad (2)$$

где $T_{уст}^{AY-1-2}, T_{уст}^{AY-2-2}$ – задающие воздействия систем стабилизации $K_{изб}$ оксидной и тетрафторидной линий, °С; $k_{град}^{AY}$ – градуировочный коэффициент шнека загрузки аппарата ВСУ.

Анализ эффективности системы автоматической стабилизации $K_{изб}$ производился путем вычислительных экспериментальных исследований на модели АУ. Проведенные исследования доказали (рисунок 5), что в случае нестабильности массового расхода фтора на входе АУ использование предлагаемых систем управления существенно снижает отклонение коэффициентов $K_{изб}$ от требуемых значений: в оксидном аппарате ВСУ на 53 %; а в тетрафторидном аппарате ВСУ на 72 %.

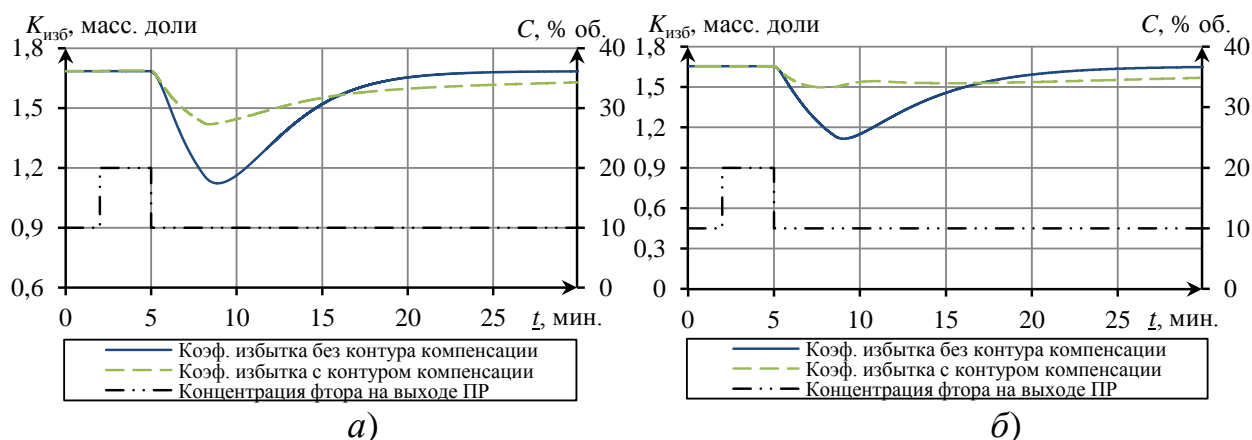


Рисунок 5 – График изменения коэффициента стехиометрического избытка в аппаратах ВСУ оксидной линии (а) и тетрафторидной (б) линий при трехминутном импульсном изменении расхода технического фтора на выходе ПР

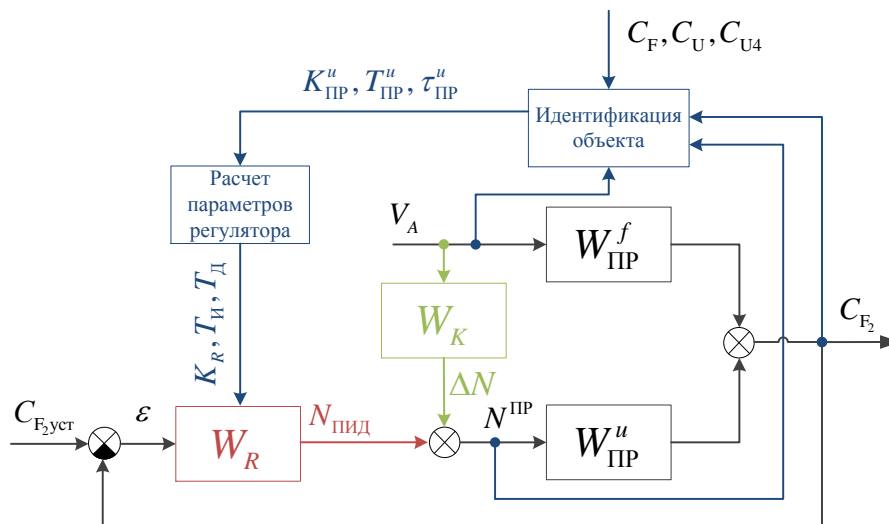
Достигнутый результат свидетельствует о повышении эффективности улавливания ценных компонентов из хвостового газа обеих линий ПГУ.

В четвертой главе сформулированы требования к динамической точности САУ ПР, заключающиеся в удержании среднего квадратического отклонения концентрации фтора на выходе ПР в процессе нормальной эксплуатации на производстве в диапазоне от 0 до 2 % об. Оценка качества

управления исходной САУ ПР на пяти различных интервалах времени подтвердила ее несоответствие предъявляемым требованиям.

Анализ производственных данных, характеризующих технические и технологические особенности ПГУ на СЗ СХК, выявил причины недостаточного качества САУ ТП, протекающими в ПР, основными из которых являются: нестабильность объемного расхода технического фтора на входе ПР; нестабильность состава и физических характеристик фторируемого полупродукта.

Для минимизации влияния выявленных причин на стабильность концентрации фтора на выходе ПР модернизирована САУ ПР, которая представляет собой комбинированную адаптивную САУ, реализованную на принципах обратной связи и компенсации основного возмущения (рисунок 6).



W_R – ПИД-регулятор контура стабилизации; $W_{\text{ПР}}^f, W_{\text{ПР}}^u$ – модели ПР по каналам возмущения и управления; W_K – П-регулятор контура компенсации; $C_{F_{2\text{уст}}}$ – уставка на концентрацию фтора САУ ПР, % об.; ε – сигнал рассогласования уставки ($C_{F_{2\text{уст}}}$) и измеренной (C_{F_2}) величины концентрации фтора на выходе ПР, % об.; $N_{\text{ПИД}}$ – управляющее воздействие, рассчитанное контуром стабилизации, об/мин; ΔN – управляющее воздействие, рассчитанное контуром компенсации, об/мин; $N^{\text{ПР}}$ – управляющее воздействие на шнек загрузки ПР, об/мин; C_{F_2} – измеренное значение концентрации фтора на выходе ПР, % об.; $K_{\text{ПР}}^u, T_{\text{ПР}}^u, \tau_{\text{ПР}}^u$ – коэффициент передачи, постоянная времени и время запаздывания модели ПР; K_R, T_I, T_D – коэффициент передачи, постоянные времени интегрирования и дифференцирования регулятора контура стабилизации; C_U, C_{U4}, C_F – массовые доли урана, четырехвалентного урана и растворимого фтора в полупродукте, загружаемом в ПР, масс. доли

Рисунок 6 – Структурная схема адаптивной комбинированной САУ ПР

Задача адаптации динамических свойств ПР решалась путем разработки алгоритма активной идентификации в замкнутом контуре управления. Суть разработанного алгоритма идентификации заключается в последовательном выполнении следующих операций:

а) по реакции объекта управления в замкнутом контуре на ступенчатое изменение управляющего воздействия – $x(t)$ (рисунок 7), используя выражения (3), рассчитываются стартовые значения параметров модели объекта управления;

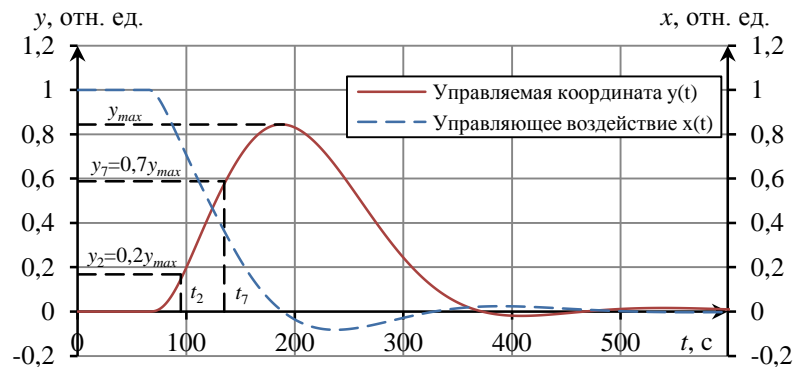


Рисунок 7 – Временные характеристики входного и выходного сигналов ТОУ в замкнутом контуре управления при ступенчатом изменении управляющего воздействия

$$K_{\text{ПР}}^u = \frac{S_2}{S_1} = \frac{\int_0^{t_{\text{пер}}} y(t) dt}{\int_0^{t_{\text{пер}}} x(t) dt}; \tau_{\text{ПР}}^u = \frac{t_2 \cdot \ln\left(1 - \frac{y_7}{K_{\text{ПР}}^u \cdot \Delta x}\right) - t_7 \cdot \ln\left(1 - \frac{y_2}{K_{\text{ПР}}^u \cdot \Delta x}\right)}{\left(\ln\left(1 - \frac{y_7}{K_{\text{ПР}}^u \cdot \Delta x}\right) - \ln\left(1 - \frac{y_2}{K_{\text{ПР}}^u \cdot \Delta x}\right)\right)}; \quad (3)$$

$$T_{\text{ПР}}^u = \frac{t_2 - \tau_{\text{ПР}}^u}{-\ln\left(1 - \frac{y_2}{K_{\text{ПР}}^u \cdot \Delta x}\right)};$$

б) с помощью метода Левенберга-Марквардта найденные значения параметров $K_{\text{ПР}}^u$, $T_{\text{ПР}}^u$, $\tau_{\text{ПР}}^u$ оптимизируются за счет минимизации расхождения исходных данных и реакции апериодического звена первого порядка с запаздыванием на сигнал $x(t)$.

Вычислительные экспериментальные исследования разработанного алгоритма идентификации в программном комплексе Matlab доказали его применимость в диапазоне изменения отношения времени запаздывания к постоянной времени модели ТОУ от 0 до 4. Погрешность идентификации не превысила 4 %.

Исследования по идентификации параметров модели ПР с помощью разработанного алгоритма выявили ограниченность его использования на действующем производстве по причине необходимости выбора благоприятного момента времени для его запуска, что требует дополнительных исследований.

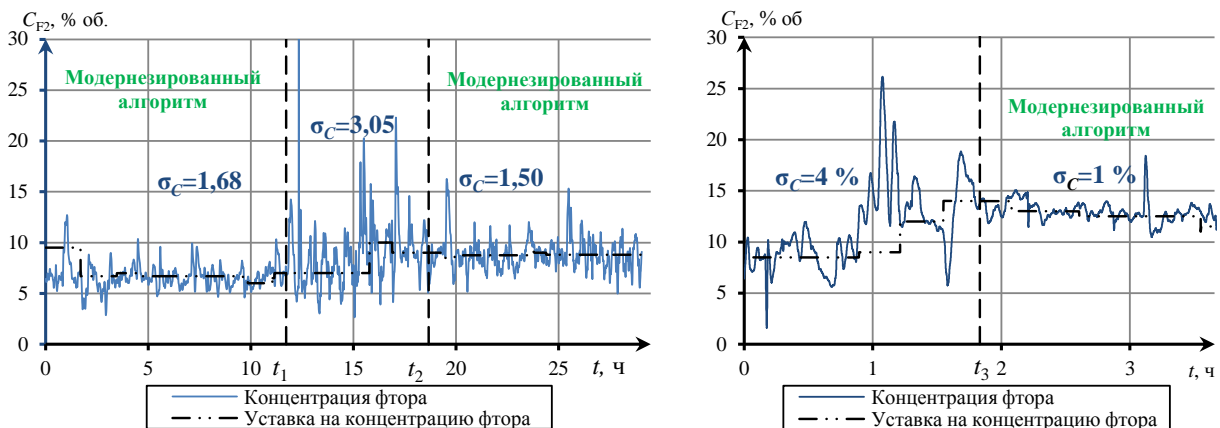
Адаптация динамических свойств ПР реализована с помощью составленных регрессионных моделей (4), описывающих зависимость постоянной времени и времени запаздывания модели ПР от измеряемых на производстве величин: частоты вращения шнека загрузки ПР, объемного расхода технического фтора на входе ПР и концентрации фтора на выходе ПР.

$$\begin{aligned}
 T_{ob}^u &= 281 - 0,87 \cdot V_A - 3,00 \cdot N^{ПР} - 0,007 \cdot V_A \cdot N^{ПР} + \\
 &+ 0,002 \cdot (V_A)^2 + 0,03 \cdot (N^{ПР})^2, \\
 \tau_{ob}^u &= 105 - 0,38 \cdot V_A - 0,27 \cdot N^{ПР} + 0,001 \cdot V_A \cdot N^{ПР} + \\
 &+ 0,0004 \cdot (V_A)^2 - 0,001 \cdot (N^{ПР})^2.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Алгоритм расчета коэффициента передачи модели ПР разработан на основе его статической модели. Особенностью алгоритма является учет изменения градуировочного коэффициента, перерасчет которого производится по результатам прямых измерений концентрации фтора на выходе ПР, частоты вращения шнека загрузки ПР и расхода технического фтора на входе ПР.

Разработанный алгоритм компенсации основного возмущающего воздействия, в отличие от классического, обеспечивает расчет корректирующего управляющего воздействия на шнек загрузки ПР по пропорциональному закону регулирования на основании рассогласования текущих измеренного и сглаженного величин расхода технического фтора. Использование предложенного контура компенсации в составе САУ ПР позволило повысить качество управления в 2,9 раз по сравнению с ранее используемым.

Апробация модернизированной САУ ПР проводилась на СЗ СХК. Фрагменты экспериментальных исследований отражены на рисунке 8.



t_1 – момент переключения с модернизированной на исходную САУ ПР; t_2, t_3 – моменты переключения с исходной на модернизированную САУ ПР; σ_T, σ_C – среднее квадратическое отклонение концентрации фтора на выходе ПР от своего математического ожидания.

Рисунок 8 – Экспериментальные данные отражающие моменты переключения между исходной и модернизированной САУ ПР

Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований САУ ПР выявил соответствие обеспечиваемого ею качества управления предъявляемым требованиям. Использование модернизированной САУ ПР позволило: в 2 раза сократить среднее квадратическое отклонение концентрации фтора на выходе ПР; в 10 раз уменьшить статическую ошибку регулирования; в 13 раз сократить количество переходов на ручной режим управления; в 4 раза сократить количество ручных вмешательств оперативно-технологического персонала в управление шнеком загрузки ПР.

По результатам опытной эксплуатации разработанные алгоритмы управления ПР, вошедшие в состав модернизированной САУ ПР, были приняты в промышленную эксплуатацию на СЗ СХК, что подтверждается актом внедрения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках диссертационной работы решена научная проблема, имеющая важное народнохозяйственное значение, заключающаяся в повышении эффективности ПГУ, одновременно перерабатывающего оксиды и терафторид урана. Основные выводы и результаты работ заключаются в следующем:

1 Разработан оптимизирующий программный модуль производства гексафторида урана «ОПМ ПГУ», с помощью которого спроектирован алгоритм функционирования АСУ ТП ПГУ, обеспечивающий согласованную работу аппаратов фторирования и улавливания двух технологических линий ПГУ на СЗ СХК. Программный модуль «ОПК ПГУ» используется технологическим персоналом СЗ СХК с целью определения оптимальных величин массовых расходов газообразных и твердофазных продуктов в аппараты двух технологических линий производства, что подтверждается актом внедрения.

2 Разработана динамическая математическая модель ПГУ, с помощью которой была разработана и исследована автоматизированная система согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты двух технологических линий ПГУ. Результаты разработки и исследования автоматизированной системы согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты двух технологических линий использованы в проектной документации «Создание нового конверсионного производства в ОАО «СХК»».

3 Разработана новая математическая модель аппарата улавливания ПГУ, используя которую были разработаны и исследованы системы автоматической стабилизации коэффициентов стехиометрического избытка ОУ над улавливаемыми компонентами в аппаратах ВСУ оксидной и

тетрафторидной линий ПГУ.

4 Разработан алгоритм активной идентификации параметров модели технологического объекта с самовыравниванием, описываемого инерционным звеном первого порядка с запаздыванием в замкнутом контуре управления. Предлагаемый метод внедрен в учебный процесс кафедры ЭАФУ ФГАОУ ВО НИ ТПУ, что подтверждается соответствующим актом.

5 Разработаны и внедрены на СЗ СХК алгоритмы, вошедшие в состав модернизированной САУ ПР. Опытно-промышленная эксплуатация показала, что модернизация САУ ПР позволила существенно повысить качество управления ТП ПР (среднее квадратическое отклонение концентрации фтора на выходе ПР снизилось в 2 раза), а также стабилизировать ТП всего ПГУ.

Экономический эффект от внедрения САУ ПР на СЗ СХК, по данным производственных испытаний, составил 7,3 млн. руб. в год.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК:

1 Криницын, Н. С. Синтез системы автоматического управления комплексом аппаратов фторирования и улавливания производства гексафторида урана [Текст] / С. А. Байдали, В. Ф. Дядик, А. С. Юрков, Н. С. Криницын // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 1. – С. 98–109.

2 Криницын, Н. С. Идентификация технологического объекта управления по его реакции на произвольное входное воздействие [Текст] / Н. С. Криницын, С. А. Байдали, В. Ф. Дядик // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 11/2. – С. 226–229.

3 Криницын, Н. С. Параметрический синтез двухконтурной каскадной системы автоматического управления [Текст] / С. А. Байдали, В. Ф. Дядик, Н. С. Криницын // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 11/2. – С. 197–201.

4 Криницын, Н. С. Система автоматического управления узлом фторирования производства гексафторида урана [Текст] / Н. С. Криницын, С. А. Байдали, В. Ф. Дядик // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2011. – № 6. – С. 1–8.

5 Криницын, Н. С. Параметрический синтез систем автоматического управления сложными производственными комплексами [Текст] / С. А. Байдали, Н. С. Криницын, В. Ф. Дядик // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2011. – № 6. – С. 9–15.

6 Криницын, Н. С. Адаптация параметров настройки типовых регуляторов в одноконтурных системах управления [Текст] /

Н. С. Криницын, В. Ф. Дядик, С. А. Байдали // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2012. – № 10. – С. 1–7.

В других изданиях:

7 Криницын, Н. С. Синтез САУ температурой реакционной зоны АКТ [Текст] / Н. С. Криницын, С. А. Байдали, В. Ф. Дядик // Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности : материалы конференции, 17-21 мая 2010 г., г. Северск. – 2010. – 70 с.

8 Криницын, Н. С. Система автоматизированного управления комплексом аппаратов фторирования и улавливания производства гексафторида урана [Текст] / С. А. Байдали, В. Ф. Дядик, О. П. Савитский, Н. С. Криницын // Физико-технические проблемы атомной энергетики в промышленности : сборник тезисов докладов V Международной научно-практической конференции, 7-8 июня 2010 г., г. Томск. – 2010. – 189 с.

9 Криницын, Н. С. Идентификация параметров объекта по его реакции на произвольное входное воздействие [Текст] / Н. С. Криницын, С. А. Байдали, В. Ф. Дядик // Физико-технические проблемы атомной энергетики в промышленности : сборник тезисов докладов V Международной научно-практической конференции, 7-8 июня 2010 г., г. Томск. – 2010. – 194 с.

10 Криницын, Н. С. Исследование каскадной двухконтурной системы автоматического регулирования температурой реакционной зоны АКТ [Текст] / Н. С. Криницын, С. А. Байдали, В. Ф. Дядик // Ядерная энергетика: технология, безопасность, экология, экономика, управление : сборник научных трудов I Всероссийской научно-практической конференции молодых атомщиков Сибири, 19-25 сентября 2010 г., г. Томск. – 2010. – С. 38–40.

11 Криницын, Н. С. Разработка и исследование математической модели узла фторирования производства гексафторида урана [Текст] / Ю. В. Извекова, Н. С. Криницын // Современная техника и технологии : труды XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 18-22 апреля 2011 г., г. Томск. – 2011. – Т.2. – С. 346–348.

12 Криницын, Н. С. Система автоматического управления температурой реакционной зоны аппарата улавливания [Текст] / Н. С. Криницын // Сборник тезисов лауреатов Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области физических наук в рамках Всероссийского фестиваля науки, 25 мая – 5 сентября 2011 г., г. Томск. – 2011. – С. 232–233.

13 Криницын, Н. С. Разработка математической модели производства гексафторида урана [Текст] / И. С. Надеждин, Н. С. Криницын, И. Р. Кубенский // Современная техника и технологии : труды XIX

Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 15-19 апреля 2013 г., г. Томск. – 2013. – Т.2. – С. 303–304.

14 Криницын, Н. С. Исследование необходимости описания ТООУ моделями высокого порядка при синтезе одноконтурных САУ [Текст] / А. В. Николаев, Н. С. Криницын, О. П. Савитский // Современные техника и технологии : труды XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 14-18 апреля 2014 г., г. Томск. – 2014. – Т.2. – С. 225–226.

15 Криницын, Н. С. Разработка модели горизонтальной части аппарата комбинированного типа [Текст] / А. А. Дериглазов, Н. С. Криницын // Современные техника и технологии : труды XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 14-18 апреля 2014 г., г. Томск. – 2014. – Т.2. – С. 165–166.

16 Krinichin, N. S. Closed Loop Identification by Optimization Method [Text] / V. F. Dyadik, N. S. Krinichin, V. A. Rudnev // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1084. – P. 636-641.

17 Krinichin, N. S. Harmonization Values of Downloads and Operating Modes of Interconnected Devices Production of Uranium Hexafluoride [Text] / I. S. Nadezhdin, N. S. Krinichin // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1084. – P. 655-660.

18 Криницын, Н. С. Согласование величин загрузок и режимов работы взаимосвязанных аппаратов ПГФУ [Текст] / И. С. Надеждин, Н. С. Криницын // Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности : сборник тезисов докладов VI Международной научно-практической конференции, 5-7 июня 2014 г., г. Томск. – 2014. – 39 с.

19 Криницын, Н. С. Согласование величин загрузок и режимов работы взаимосвязанных аппаратов ПГФУ [Текст] / В. Ф. Дядик, Н. С. Криницын, В. А. Руднев // Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности : сборник тезисов докладов VI Международной научно-практической конференции, 5-7 июня 2014 г., г. Томск. – 2014. – 31 с.

20 Криницын, Н. С. Математическая модель реактора улавливания фтор-содержащих продуктов [Текст] / Н. С. Криницын, В. Ф. Дядик, А. В. Николаев // Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности : сборник тезисов докладов VI Международной научно-практической конференции, 5-7 июня 2014 г., г. Томск. – 2014. – 33 с.

21 Криницын, Н. С. Алгоритм согласования загрузок в аппараты двух технологических линий производства гексафторида урана [Текст] / Н. С. Криницын, В. Ф. Дядик, А. А. Дериглазов // V Международная школа-конференция молодых атомщиков Сибири : сборник тезисов докладов, 22-24 октября 2014 г., Томск. – 2014. – 107 с.

22 Криницын, Н. С. Исследование режимов работы производства гексафторида урана одновременно перерабатывающего оксиды и тетрафторид урана [Текст] / Н. С. Криницын, А. В. Николаев, О. П. Савитский // V Международная школа-конференция молодых атомщиков Сибири : сборник тезисов докладов, 22-24 октября 2014 г., Томск. – 2014. – 108 с.

Документы, подтверждающие наличие исключительных прав на объекты интеллектуальной собственности:

23 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010616679. Расчет характеристик материальных потоков технологических линий производства гексафторида урана [Текст] / Николаев А.В., Криницын Н.С., Дядик В.Ф. ; заявитель и патентообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – № 2015612198 ; заявл. 23.03.15 ; опубл. 18.05.15. – 1 с.

В отчетах о НИР, зарегистрированных во ВНИИЦ:

24 Разработка новых технологий автоматизированного управления и оптимизации технологических процессов производств ядерного топливного цикла [Текст] : отчет о НИР (промежуточ.) : ТПУ ; рук. Ливенцов С. Н. ; исполн.: Байдали С. А. [и др.]. – Томск, 2011 с. – № ГР 01200905749. – Инв. № 02201157382.