федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

Криницын Николай Станиславович

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРОИЗВОДСТВА ГЕКСАФТОРИДА УРАНА

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: канд. техн. наук В.Ф. Дядик

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ					
Синтез структуры автоматизированной системы управления технологическими					
процессами протекающими в двух технологических линиях производства					
гексафторида урана 16					
1.1 Состояние отрасли 16					
1.2 Технология получения гексафторида урана 17					
1.3 Хронология эволюции автоматизированного управления					
технологическими процессами производства гексафторида урана СЗ АО «СХК» 21					
1.4 Разработка требований к автоматизации процессов производства					
гексафторида урана 24					
1.5 Патентные исследования					
1.6 Разработка структуры автоматизированной системы управления					
технологическими процессами производства гексафторида урана 34					
1.7 Выводы по главе 39					
2 Автоматизированная система согласования загрузок твердофазных					
компонентов в аппараты двух технологических линий 42					
2.1 Разработка динамической математической модели производства					
гексафторида урана 43					
2.1.1 Разработка модели горизонтальной части аппарата улавливания 45					
2.1.2 Процедура транспортировки полупродукта из аппарата первой					
ступени улавливания в бункер загрузки ПР 54					
2.2 Система автоматической стабилизации суммарного количества					
полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных питателях аппарата ПСУ 55					
2.3 Система автоматической стабилизации суммарного количества					
полупродукта накапливаемого в транспортных контейнерах 64					
2.4 Система автоматической стабилизации отношения массовых расходов					
ТФУ и ЗОУ					

	2.5	Анализ качества работы автоматизированной системы согласования							
за	загрузок твердофазных компонентов в аппараты двух технологических линий 69								
	2.6	Вывод	ы по главе71						
3	3 Системы автоматической стабилизации коэффициентов стехиометрического								
ИЗ	избытка оксидов урана над ценными фторсодержащими компонентами в								
аг	аппаратах первых ступеней улавливания73								
	3.1	Исслед	дование процесса улавливания фторсодержащих компонентов 73						
	3.2	Обзор	существующих моделей аппаратов улавливания 74						
	3.3	Разраб	ботка модели аппарата улавливания 77						
		3.3.1	Выбор структуры модели аппарата улавливания 78						
		3.3.2	Гидродинамика технологического процесса улавливания						
		3.3.3	Кинетика технологического процесса улавливания ценных						
	ком	поненто	ов на закиси-окиси урана 87						
	3.3.4 Тепловые процессы								
		3.3.4.1 Теплообмен взвеси и технологического газа							
	3.3.4.2 Тепловой эффект химических реакций улавливания								
	3.3.4.3 Теплообмен со смежными ячейками								
		3.3.4.4 Теплообмен с контурами охлаждения и нагрева							
		3.3.5	Проверка адекватности математической модели аппарата						
	улан	зливани	เя 101						
	3.4	Синтез	з системы автоматической стабилизации коэффициента						
ст	ехис	метрич	еского избытка 103						
		3.4.1	Алгоритм функционирования системы автоматической						
	стаб	билизац	ии коэффициента стехиометрического избытка 105						
	3.4.2 Параметрический синтез регулятора системы автоматической								
	стабилизации коэффициента стехиометрического избытка 107								
	3.5 Анализ эффективности системы автоматической стабилизации								
коэффициента стехиометрического избытка 110									
	3.6 Выводы по главе 113								
4	Система автоматического управления пламенным реактором 116								

4							
4.1	Оценка качества работы исходной САУ пламенным реактором 116						
4.2	Идентификация технологического объекта в замкнутом контуре						
управления 119							
	4.2.1 Аналитическое доказательство идентифицируемости						
техн	технологического объекта в замкнутом контуре управления 121						
	4.2.2 Идентификация по ступенчатому изменению управляющего						
BO3	цействия 125						
4.3	Алгоритм адаптации параметров модели ПР 130						
	4.3.1 Идентификация ПР по производственным данным 130						
	4.3.2 Алгоритм расчета динамических характеристик модели ПР 133						
	4.3.2.1 Динамическая математическая модель ПР 134						
	4.3.2.2 Составление аналитических зависимостей динамических						
характ	геристик модели ПР от измеряемых технологических переменных						
	4.3.3 Алгоритм адаптации коэффициента передачи модели ПР к						
ИЗМ	енению физико-механических характеристик полупродукта 142						
4.4	Контур компенсации влияния нестабильности расхода технического фтора						
на концентрацию фтора145							
4.5	Контур стабилизации концентрации фтора на выходе ПР 148						
4.6	Производственные испытания системы автоматического управления						
пламе	нным реактором 150						
4.7	Выводы по главе						
ЗАКЛ	ЮЧЕНИЕ 159						
СПИС	СОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 166						
ПРИЛ	ОЖЕНИЕ А Акт внедрения на СХК 177						
ПРИЛ	ОЖЕНИЕ Б Акт внедрения в учебный процесс						
ПРИЛ	ОЖЕНИЕ В Свидетельство о государственной регистрации программы для						
ЭВМ							

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ТП – технологический процесс;

ЯТЦ – ядерный топливный цикл;

ОУ – оксиды урана;

ГФУ – гексафторид урана;

ПГУ – производство гексафторида урана;

СЗ СХК – сублиматный завод АО «Сибирский химический комбинат»;

АЭХК – АО «Ангарский электролизный химический комбинат»;

ЭАФУ – кафедра «Электроника и автоматика физических установок»;

ПР – пламенный реактор;

ПСУ – первая ступень улавливания;

ВСУ – вторая ступень улавливания;

САУ – система автоматического управления;

ДС – десублиматор;

АУ – аппарат улавливания;

АСУ ТП – автоматизированные системы управления технологическими процессами;

ГЧ – горизонтальная часть.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи управления и оптимизации технологических процессов (ТП), (HTR) производств ядерного топливного цикла имеют важное народнохозяйственное решение способствует значение, поскольку ИХ атомной энергетики и согласуется политикой ускоренному развитию с 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.

Требование эффективного и надежного управления ТП производств ЯТЦ обосновано следующими факторами:

 высокой степенью загрязнения окружающей среды в случае возникновения аварийных ситуаций;

 высокой стоимостью используемой сырьевой базы и эксплуатационных затрат в производствах;

обслуживающего – опасностью И тяжелыми условиями труда для способностью, повышенной реакционной персонала, вызванными радиоактивностью и высокой токсичностью используемых продуктов (фтористый (ОУ), гексафторид урана (ГФУ), водород, фтор, оксиды урана серная кислота и др.);

 негативными последствиями для экономики и обороноспособности страны при снижении количества или качества выпускаемой продукции.

В технологии производства ядерного топлива гексафторид урана (ГФУ) занимает значимое место, так как через это соединение до настоящего времени проходит практически весь уран, используемый в энергетических и транспортных реакторах [1]. Решение задачи разработки новых способов автоматизированного управления ТП производства гексафторида урана (ПГУ) создаст значительный задел в решении основных проблем эффективного и надежного управления ТП ЯТЦ.

В Российской Федерации (РФ) существует два предприятия производящих ГФУ в промышленных масштабах: АО «Ангарский электролизный химический комбинат» (АЭХК) и АО «Сибирский химический комбинат» (СХК). С 2014 года АЭХК прекратил производство ГФУ, что привело к требованию увеличения производительности сублиматного завода (СЗ) СХК. В результате в 2014 году на СЗ СХК введена дополнительная технологическая линия, включающая стадии фторирования, десублимации ГФУ и улавливания ценных компонентов на ОУ, позволившая на одной производственной площадке одновременно перерабатывать тетрафторид урана (ТФУ) и закись-окись урана (ЗОУ) в варьируемых оперативно-технологическим персоналом пропорциях. Помимо этого, на обеих технологических линиях были введены в эксплуатацию дополнительные аппараты улавливания (АУ), позволившие перераспределять накапливаемый во вторых ступенях улавливания (ВСУ) полупродукт между пламенными реакторами двух технологических линий.

Действующая технологическая схема ПГУ на C3 CXK предполагает 8 точек ввода твердофазных продуктов, что существенно усложняет задачу оперативнотехнологическому персоналу по управлению массовыми расходами твердофазных продуктов подаваемых в аппараты фторирования и улавливания двух технологических линий, для обеспечения:

 – согласованности величин загрузок твердофазных компонентов в аппараты фторирования и улавливания, при которых сохраняется регламентный режим работы аппаратов и исключается накопление промежуточных продуктов;

 – минимизации потерь ценных компонентов в аппаратах первой и второй ступеней улавливания.

Особенностью технологической схемы действующего ПГУ на C3 СХК является комбинированный способ транспортировки полупродукта между аппаратами, включающий контейнерный способ и автоматизированную систему импульсного пневмотранспорта. В связи с этим задача синтеза автоматизированной системы управления (АСУ) комплексом аппаратов фторирования и улавливания ПГУ на СХК является уникальной для РФ.

Использование опыта зарубежных исследований не представляется возможным, что объясняется существенными отличиями в используемых технологиях и наличием информационного барьера, вызванного требованием к нераспространению ядерных технологий. Поэтому задача проведения собственных исследований является актуальной.

в настоящее время в отечественной и зарубежной Используемые промышленности технологии получения ГФУ являются отработанными и отвечают технико-экономическому уровню развития современной атомной промышленности [1, 2, 3]. За более чем 50-ти летнюю историю развития техническая и аппаратурная база ПГУ достигла такого уровня, при котором эффективность производственного процесса лимитируется качеством управления этим процессом. Поэтому крайне важной становится задача оптимального управления ТΠ ПГУ, решить которую без развитой АСУ данным технологическим процессом невозможно.

В федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ) на кафедре «Электроника и автоматика физических установок» (ЭАФУ) с 1974 года ведутся работы по созданию и совершенствованию алгоритмического и программного обеспечения АСУ ТП ПГУ СЗ СХК. В 1980 году введена в промышленную эксплуатацию одноконтурная система автоматического управления пламенным реактором (САУ ПР), обеспечивающая стабилизацию концентрации фтора на выходе аппарата путем изменения количества загружаемого полупродукта. В 1987 году введена в промышленную эксплуатацию АСУ первой и второй ступенями десублимации. В 2009 году разработана АСУ комплексом аппаратов фторирования и улавливания ПГУ, которая прошла производственные испытания, однако, не была принята в постоянную эксплуатацию. Причиной послужило расхождение с течением времени рассчитываемого и требуемого управляющих воздействий на шнек загрузки аппарата улавливания, ввиду нестабильности используемых в алгоритме управления коэффициентов, характеризующих работу технологических узлов.

В новых производственных условиях статические и динамические характеристики узла фторирования, как объекта управления, существенно изменились, это привело к снижению динамической точности САУ ПР, что актуализировало задачу модернизации существующей САУ ПР.

Таким образом, известные на сегодняшний день системы управления, функционирующие на предприятиях, производящих ГФУ, не обеспечивают эффективное автоматизированное управление ТП действующего на СЗ СХК ПГУ.

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 (F₂, UF₆, HF) из хвостового технологического газа двух технологических линий на ЗОУ;

– необходимостью повышения динамической точности САУ ПР двух технологических линий ПГУ;

Целью работы является повышение эффективности ПГУ, одновременно перерабатывающего ЗОУ и ТФУ. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

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

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

– разработка систем автоматической стабилизации коэффициентов стехиометрического избытка ОУ над ценными улавливаемыми компонентами в аппаратах ВСУ двух технологических линий;

– модернизация САУ ПР с целью повышения ее динамической точности.

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 АСУ ПГУ функционирования использовался программный модуль, разработанный в ходе диссертационной работы, программный также a комплекс Matlab.

Научная новизна работы заключается в том, что:

– разработан алгоритм функционирования АСУ ТП ПГУ, обеспечивающий согласованную работу аппаратов фторирования и первой ступени улавливания (ПСУ). Предлагаемый алгоритм функционирования, в отличие от существующих, предполагает стабилизацию на требуемом уровне суммарного количества полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных питателях аппарата ПСУ;

– разработана математическая модель АУ ПГУ, позволяющая синтезировать и испытывать алгоритмы управления действующими аппаратам 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;

– 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.

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 работы заключается в том, что полученные результаты способствуют повышению эффективности действующего ПГУ на СЗ СХК. Разработанный программный модуль используется технологическим персоналом СЗ с целью определения оптимальных величин массовых расходов газообразных и твердофазных продуктов в аппараты производства, что подтверждено актом внедрения результатов диссертационных исследований представленном в приложении А. 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»». Разработанные алгоритмы вошедшие в состав САУ ПР приняты в промышленную эксплуатацию 30.04.2014, по СЗ OT что подтверждается приказом актом внедрения представленном в приложении А.

Внедрение модернизированной САУ ПР на СЗ СХК, позволило снизить количество урансодержащих оборотов, требующих дополнительной переработки, сократить количество внеплановых остановок технологического оборудования, повысить качество управления всем производственным комплексом, а также увеличить межремонтный пробег аппаратов фторирования, десублимации и двух ступеней улавливания. Экономический эффект от внедрения системы составил 7,3 млн. руб. в год.

Выполняемые работы были поддержаны:

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

 – хоздоговорной НИР между ТПУ и СХК № 01С/09 от 01.08.09. на выполнение НИР «Создание автоматизированной системы управления комплексом аппаратов фторирования и улавливания производства гексафторида урана;

 – хоздоговорной НИР между ТПУ и СХК № 0-325/11 от 01.09.2011 г. на выполнение НИР «Совершенствование системы автоматизированного управления схемой производства ГФУ на C3 СХК»;

 – хоздоговорной НИР между ТПУ и СХК № 12-464/14У от 12.11.2012 г. на выполнение НИР «Реконструкция АСУ ТП производства гексафторида урана»;

– хоздоговорной НИР между ТПУ и СХК № 0-36/13 от 19.09.13 на выполнение НИР «Совершенствование системы управления производством ГФУ при работе двух технологических линий и разного вида сырья на сублиматном заводе ОАО «СХК»».

Результаты работы также внедрены в учебный процесс на кафедре ЭАФУ ТПУ, что подтверждается актом внедрения, представленном в приложении Б.

Основные положения, выносимые на защиту:

 автоматизированная система согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты двух технологических линий, обеспечивающая коррекцию режимов работы взаимозависимых аппаратов фторирования и улавливания;

– динамическая пространственно-распределенная модель АУ ценных компонентов (F₂, UF₆, HF) на ОУ, с помощью которой были синтезированы и испытаны алгоритмы управления ТП в действующих на СЗ СХК аппаратах ПГУ;

– системы автоматической стабилизации коэффициентов стехиометрического избытка ОУ над ценными улавливаемыми компонентами в аппаратах ВСУ двух технологических линий ПГУ, обеспечившие максимальное улавливание ценных компонентов (F₂, UF₆, HF) на ОУ;

– 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, проведении экспериментальных исследований, 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 %.

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 в условиях действующего производства разработанных комплексов алгоритмов и программ. Часть результатов работы используется в учебных курсах, преподаваемых для студентов специальности «Электроника и автоматика физических установок»: «статистические методы контроля и управления», «теория автоматического управления» и «средства автоматизации и приборы контроля химического производства».

Основные положения и результаты диссертационных исследований были представлены в докладах 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 «Физикотехнические 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, XVI, XIX, XX Международные научно-практические конференции «Современные техника и технологии», г. Томск, с 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 «Физикотехнические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности», г. Томск, 2014 г.;

– V Международная научно-практическая конференция «школаконференция молодых атомщиков Сибири», г. Томск, 2014 г;

- научно-технические советы C3 CXK, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 г.г.

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.

В первой главе диссертационной работы проводится анализ состояния ПГУ в России и мире, рассматриваются применяемые технологии. Исследуются структура и особенности эксплуатации действующего ПГУ на СЗ СХК, для которого разрабатывается алгоритм функционирования АСУ основными ТП. Глава завершается описанием структурной схемы АСУ ТП ПГУ. Во второй главе разрабатывается динамическая математическая модель ПГУ, описывающая количественно движение твердофазных и газообразных продуктов по аппаратам двух технологических линий. С помощью модели ПГУ синтезированы и исследованы САУ аппаратами первой и второй ступеней улавливания обеих технологических линий. В третьей главе описывается процесс разработки динамической пространственно-распределенной модели АУ, учитывающей влияние гидродинамики, кинетики и теплообменных процессов, протекающих в аппарате на процесс улавливания F₂, UF₆, HF. Используя модель AУ, разрабатываются исследуются системы автоматической стабилизации И стехиометрического избытка ОУ коэффициентов над улавливаемыми компонентами в обеих технологических линиях. В четвертой главе описывается

активной предложенный алгоритм идентификации параметров модели технологического объекта самовыравниванием с В замкнутом контуре управления, а также приводится его апробация на производственных данных. комбинированная САУ ПР, построенная Разрабатывается адаптивная на компенсации. Глава завершается описанием принципах стабилизации и экспериментальных исследований на СЗ СХК модернизированной САУ ПР, производится анализ полученных результатов. В заключение диссертационной работы приведена общая характеристика и основные выводы по результатам проведенных работ.

1 Синтез структуры автоматизированной системы управления технологическими процессами протекающими в двух технологических линиях производства гексафторида урана

1.1 Состояние отрасли

Долгие годы развитие атомной энергетики неоднозначно воспринималось общественностью. Ее сторонники и противники резко расходятся в оценках безопасности, надежности и экономической эффективности. Тем не менее, наступивший в 80-ых годах мировой энергетический кризис послужил серьезным толчком для развития данной отрасли, устанавливая ее на один уровень с традиционными источниками электроэнергии (ТЭС, ГЭС).

Подтверждением того, что атомная промышленность зарекомендовала себя как надежный и дешевый источник производства электроэнергии, является ее активное развитие во многих странах мира, в том числе в России.

250 Только В России отрасль представлена более атомная чем предприятиями и организациями, в которых занято свыше 190 тыс. человек. В структуре отрасли — четыре крупных научно-производственных комплекса: предприятия ЯТЦ, атомной энергетики, ядерно-оружейного комплекса и научно-Кроме исследовательские институты. того, после включения состав В Госкорпорации «Росатом» ФГУП «Атомфлот», сюда же можно включить самый мире ледокольный флот. Только в России осуществляется мощный в строительство Нововоронежской АЭС-2, Ленинградской АЭС-2, Балтийской АЭС, Ростовской АЭС (энергоблоки 3 и 4), первой в мире плавучей АЭС Ломоносов». В стадии достройки находится четвертый блок «Академик Белоярской АЭС. За рубежом ведется строительство атомных станций «Куданкулам» (Индия), «Бушер» (Иран), «Аккую» (Турция), Островецкой АЭС (Беларусь), второй очереди АЭС «Тяньвань» (Китай) [4].

Сырьевой материал для изготовления ядерного топлива обеспечивается различными источниками урана. В первую очередь это добыча природного урана, которая покрывает от 50 до 60 % мирового спроса. Остальные 40–50 % спроса

обеспечивают так называемые вторичные источники. Существенная роль отводится возвращению высокообогащенного урана из военной сферы. К вторичным источникам также относятся: запасы урана в «хвостах» обогатительного производства; уран, полученный при переработке облученного ядерного топлива; а также уже добытый уран, складированный у производителей топливных элементов и на предприятиях энергоснабжения [5].

Конверсия ЗОУ в ГФУ является неотъемлемой частью производства ядерного топлива. В 2012 году суммарные мировые мощности по конверсии ЗОУ в ГФУ составили 75 000 т [6].

Фабрикацией ядерного топлива в мире занимается 40 компаний. Но при этом круг компаний, способных в массовом порядке осуществлять конверсию урана в форму ГФУ, узкий. В мире есть всего четыре компании предлагающих услуги по конверсии урана – FAAE (Россия), «Сатесо» (Канада), AREVA (Франция) и «ConverDyn» (США) [7].

В России имеется два предприятия по конверсии ЗОУ в ГФУ, которые расположены в г. Северске (СХК) и г. Ангарске (АЭХК) [8].

Госкорпорацией "Росатом" в 2011 году принято решение сделать СХК главным центром ПГУ в России. Объем инвестиций на создание завода, где сосредоточится вся конверсия урана России, превысит 7 миллиардов рублей [9].

1.2 Технология получения гексафторида урана

ПГУ является неотъемлемой частью ЯТЦ. Большая часть АЭС, эксплуатируемых в настоящее время в мире, в качестве сырья используют ядерное топливо, обогащенное изотопом 235 U. Для обогащения урана по изотопу 235 U методом центрифугирования, используют ГФУ, так как при сравнительно низких температурах его можно перевести в газообразное состояние.

В настоящее время известно много технологий получения ГФУ. В большей степени технологию получения ГФУ определяет используемый фторирующий реагент, в качестве которого может выступать: газообразный фтор,

галоидофториды, фтороводород и др. Фторируемым же агентом может являться, в определенных условиях, практически любое урансодержащие соединение: металлический уран, ТФУ, ЗОУ, диокид урана, уранилфторид и т.д [1, 10, 10, 11, 12, 13, 14].

Современное промышленное ПГУ основано на взаимодействии газообразного фтора с оксидами и фторидами урана согласно уравнениям (1.1) по технологической схеме, включающей три основные стадии (рисунок 1.1): высокотемпературное фторирование урансодержащих соединений, десублимацию ГФУ и улавливание ценных фторсодержащих газовых компонентов (F₂, HF и UF₆) на исходном сырье.

$$\begin{split} & \mathrm{UF}_4 + \mathrm{F}_2 \rightarrow \mathrm{UF}_6, \\ & \mathrm{UO}_2 + 3\mathrm{F}_2 \rightarrow \mathrm{UF}_6 + \mathrm{O}_2, \\ & 2\mathrm{UO}_3 + 6\mathrm{F}_2 \rightarrow 2\mathrm{UF}_6 + 3\mathrm{O}_2, \\ & \mathrm{U}_3\mathrm{O}_8 + 9\mathrm{F}_2 \rightarrow 3\mathrm{UF}_6 + 4\mathrm{O}_2, \\ & \mathrm{UO}_2\mathrm{F}_2 + 2\mathrm{F}_2 \rightarrow \mathrm{UF}_6 + \mathrm{O}_2. \end{split}$$



Рисунок 1.1 – Принципиальная технологическая схема ПГУ

В качестве исходного сырья может выступать как ЗОУ, так и ТФУ. Исторически сложилось, что за рубежом ГФУ преимущественно получают по тетрафторидной схеме (из ТФУ), а в России, как по оксидной (из ЗОУ), так и по тетрафторидной [1].

На СЗ СХК для получения ГФУ использовалась как тетрафторидная схема, так и оксидная. Неоспоримым преимуществом тетрафторидной схемы, над оксидной, является более высокий выход по ГФУ на единицу затраченного молекулярного фтора. Однако улавливание ценных компонентов из хвостовых газов на ТФУ малоэффективно, по сравнению с ЗОУ.

В связи с необходимостью повышения производительности по ГФУ без изменения производственных мощностей по фтору, на СЗ СХК в 2014 году запущена дополнительная технологическая линия, что позволило одновременно перерабатывать ЗОУ и ТФУ. Структурная схема модернизированного ПГУ приведена на рисунке 1.2.

В первой линии осуществляется фторирование полупродукта, преимущественно полученного из ЗОУ (оксидная линия), во второй – из ТФУ (тетрафторидная линия).

Преимуществами действующего ПГУ над классическими схемами, используемыми на C3 CXK ранее, являются:

 повышение производительности по ГФУ на единицу затрачиваемого фтора по сравнению с ранее используемой оксидной схемой;

- обеспечение эффективного улавливания ценных компонентов на ЗОУ;

 возможность эксплуатации производства в непрерывном режиме без накопления промежуточных продуктов;

 возможность влияния на суммарную производительность двух технологических линий за счет изменения массовых расходов перерабатываемых ТФУ и ЗОУ, а так же количества затрачиваемого технического фтора.

Достижение указанных преимуществ стало возможным благодаря расширению узла улавливания, в состав которого вошли два АУ: аппарат ПСУ и аппарат ВСУ. Ключевой функцией аппаратов ВСУ обеих технологических линий явилось улавливание ценных компонентов на ЗОУ. Выгружаемый из аппарата

Подмешиваемые урансодержащие ΠП Технический Оксиды U компоненты фтор Улавливание Улавливание Фторирование в Десублимация F_2 , HF, UF₆ F_2 , HF, UF₆ Импульсный пламенном реакторе Охлаждение и ΓФУ На очистку пневмотранспорт фильтрация газа (AY-1-1) (AY-1-2) (ПР-1) (ДС-1) Огарки Пыль ΠП Дополнительная Контейнер переработка Оксилная линия Товарный гексафторид урана ΠП Технический ΤΦУ Оксиды U фтор Фторирование в Десублимация Улавливание Улавливание Импульсный ΓФУ F₂, HF, UF₆ F₂, HF, UF₆ пламенном реакторе Охлаждение и На очистку пневмотранспорт фильтрация газа (AY-2-1) (AY-2-2) (ПР-2) (ДС-2) Огарки Пыль ΠП Дополнительная Контейнер переработка Тетрафторидная линия Поток твердофазных компонентов Поток технологического газа _ _

АУ-1-1, АУ-2-1 – аппараты первых ступеней улавливания оксидной и тетрафторидной линий; АУ-1-2, АУ-2-2 –аппараты вторых ступеней улавливания оксидной и тетрафторидной линий; ДС-1, ДС-2 –узлы десублимации оксидной и тетрафторидной линий; ДС-1, ДС-2 –узлы десублимации оксидной и тетрафторидной линий; ПП – полупродукт (U₃O₈, UO₂F₂, UF₄)

Рисунок 1.2 – Структурная схема действующего на СЗ СХК ПГУ

ВСУ полупродукт контейнерным способом распределяются по узлам загрузки аппаратов ПСУ двух технологических линий. В аппаратах ПСУ, обладающих двумя шнековыми питателями, происходит дозирование и перемешивание двух видов продуктов, смесь которых далее посредствам импульсного пневмотранспорта доставляется в бункеры загрузки ПР обеих технологических линий.

1.3 Хронология эволюции автоматизированного управления технологическими процессами производства гексафторида урана СЗ АО «СХК»

Начиная с 1974 года на кафедре ЭАФУ ТПУ ведутся работы по созданию и совершенствованию алгоритмического и программного обеспечения АСУ ТП ПГУ на C3 CXK.

Для синтеза алгоритмов управления отдельными технологическими аппаратами и производством в целом, необходимы математические описания присущих им закономерностей, поэтому на протяжении всех этапов разработки АСУ ТП ПГУ создавались требуемые для решения конкретных задач, статические либо динамические математические модели.

Одновременно с проектированием, изготовлением и монтажом нового противоточного АУ фторосодержащих компонентов из хвостовых газов ПГУ создавалась его динамическая математическая модель. Была создана квазигомогенная модель АУ неполного смешения, в которой дисперсный поток представлен как однородная среда с усреднёнными характеристиками [15, 16]. Это позволило описать гидродинамику и термодинамику процесса улавливания по высоте аппарата однопараметрической диффузионной моделью.

В результате исследований на модели АУ были сформулированы конкретные рекомендации по поддержанию температурного режима в аппарате, а также по размещению датчиков температуры. Рекомендации были реализованы в промышленном АУ. На основании исследований на математической модели АУ была построена первая САУ АУ. Расчет управляющего воздействия производился алгоритмом, построенным на принципе компенсации влияния основного возмущения (массового расхода фтора на входе АУ) на величину коэффициента стехиометрического избытка ОУ над ценными улавливаемыми компонентами.

Статическая модель ПГУ составлена на основании описания физикохимических процессов, происходящих в отдельных аппаратах и уравнений тепловых и материальных балансов [15, 17]. Эта модель позволила вычислить величины коэффициентов передач отдельных аппаратов по каналам управляющих и возмущающих воздействий, оценить линейность объектов управления, чувствительность выходных переменных к нестабильности параметров моделей и их от входных координат объекта управления. С помощью зависимости статической ПГУ реализованы косвенные модели измерения важных технологических переменных:

- расхода и состава технологического газа на входе узла десублимации;

расхода и состава хвостовых газов на входе в АУ;

 коэффициента стехиометрического избытка ОУ над ценными улавливаемыми компонентами;

- состав полупродукта выгружаемого из АУ и т. п.

Динамическая модель узла фторирования, необходимая для синтеза САУ ПР, построена на основании экспериментальных исследований [18]. Итоговая модель ПР, как объекта управления, представлена выражением (1.2).

$$W_{\rm TIP}(s) = \frac{-1.1 \cdot e^{-90s}}{55 \cdot s + 1}.$$
 (1.2)

На основании полученной модели произведен синтез одноконтурной системы автоматической стабилизации концентрации фтора на выходе ПР, структурная схема которой представлена на рисунке 1.3.



 $R_{\Pi P}$ – передаточная функция регулятора САУ ПР; $C_{3a,A}$ – уставка на концентрацию фтора, об. %; ΔC – сигнал рассогласования, об. %; C_{F_2} –концентрация фтора на выходе ПР, об. %; $N^{\Pi P}$ – частота вращения шнека загрузки бункера ПР, об/мин; V_A – расход технического фтора, м³/ч Рисунок 1.3 – Структурная схема САУ ПР

Для составления системы управления узлом десублимации разработана десублиматора, физикоматематическая модель отражающая основные химические процессы и закономерности, протекающие в используемых на СЗ СХК аппаратах [19, 20]. Результаты расчетов на данной модели использовались для построения статической регрессионной модели процесса захолаживания технологического газа в десублиматоре (ДС), позволяющей вычислить массу накопленного десублимата как функцию входных переменных. На основании данной регрессионной модели разработан алгоритм управления ДС. При этом управляющее воздействие выдается в виде величины цикла захолаживания, рассчитанной по выражению, полученному из регрессионной модели как функции заданной толщины слоя десублимата, и входных технологических переменных, характеризующих процесс десублимации.

Ввод в эксплуатацию системы импульсного пневмотранспорта, обеспечивающего транспортировку полупродукта накопленного в узле выгрузки АУ в бункер загрузки ПР, привел к необходимости обеспечения согласованности в выборе величин массовых расходов сырьевых продуктов в аппараты ПР и АУ. Для решения этой задачи разработана АСУ замкнутой технологической схемы по переработке ЗОУ, структурная схема которой представлена на рисунке 1.4 [21].



 $T_{_{3a,A}}^{AY}$ – уставка на температуру реакционной зоны АУ, °С; ΔT – сигнал рассогласования температуры реакционной зоны АУ, °С; V_A – расход технического фтора, м³/ч; M, M_{MOQ} – измеренная и рассчитанная по модели массы бункера загрузки ПР, кг; ΔM – сигнал рассогласования массы бункера ПР, кг; N_{MOQ}^{AY} – рассчитанная по модели частота вращения шнека загрузки АУ, об/мин; ΔN^{AY} – корректирующее значение, об/мин; N^{AY} – управляющее воздействие на шнек загрузки АУ, об/мин; $W_{_{AY}}$ – передаточная функция АУ; $W_{_{R_T}^{AY}}$ – передаточная функция регулятора АУ, обеспечивающего регулирование температуры реакционной зоны АУ; $W_{_{R_M}^{AY}}$ – передаточная функция в АУ Рисунок 1.4 – Структурная схема САУ комплексом аппаратов фторирования и

улавливания

1.4 Разработка требований к автоматизации процессов производства гексафторида урана

Проведенная модернизация ПГУ на СЗ СХК привела к увеличению аппаратов В одной технологической количества линии. а также к режимов работы тетрафторидной взаимозависимости оксидной И линий. Отсутствие эксплуатации технологических опыта производства, одновременно перерабатывающего два вида сырья, актуализировало задачу оценки режимов работы аппаратов с помощью компьютерного моделирования.

Используя ранее составленные сотрудниками кафедры ЭАФУ ТПУ модели ПР, АКТ и ДС, нами была разработана статическая модель ПГУ, описывающая поведение оксидной и тетрафторидной технологических линий действующего производства [22]. Информационная структурная схема разработанной модели представлена на рисунке 1.6.

В процессе исследований на математической модели ПГУ (рисунок 1.6), проводимых совместно с сотрудниками СЗ СХК, возникла необходимость ее программной реализации. В качестве среды разработки был выбран Microsoft Visual Studio 2012, обладающий достаточным набором базовых функций для реализации модели ПГУ и интерфейса пользователя. Вид главного окна разработанного программного модуля «ОПМ ПГУ» приведен на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – Главное окно программного модуля описывающего поведение двух технологических линий ПГУ в статике

Разработанный программный модуль позволяет решать следующие задачи:

– расчет входных и выходных характеристик материальных потоков отдельных аппаратов производства (ПР, ДС, АУ);



Рисунок 1.6 – Информационная структурная схема статической модели действующего на СЗ СХК ПГУ

– расчет характеристик материальных потоков аппаратов замкнутого производства, состоящего из двух технологических линий при заданных массовых расходах технического фтора, ЗОУ и ТФУ;

 – оптимизацию массовых расходов ЗОУ, ТФУ и технического фтора по двум технологическим линиям по заданным пользователем критериям.

На разработанный «ОПМ ПГУ» получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, приведенное в приложении В.

В новых производственных условиях в аппарат ПСУ тетрафторидной линии предполагается загружать ТФУ. Проведенные предварительные производственные испытания по улавливанию фторсодержащих компонентов на высокофторированном полупродукте и ТФУ доказывают низкую степень улавливания. Ввиду этого, при дальнейших исследованиях в АУ оксидной и тетрафторидной линий принято не учитывать взаимодействие F₂, HF и UF₆ с полупродуктом и ТФУ.

Проверка адекватности описания ТП ПГУ, протекающих на C3 СХК с помощью «ОПМ ПГУ», производилась путем сопоставления основных измеряемых технологических переменных: суммарного массового расхода ТФУ – $\Sigma G_{T\Phi Y}$; суммарного массового расхода ЗОУ – ΣG_{30Y} ; суммарного массового расхода полупродукта в ПР-1 и ПР-2 – $\Sigma G_{\Pi P}$. В таблицу 1.1 сведены результаты сравнения, полученные с помощью «ОПМ ПГУ» и из производственных данных при варьировании отношения объемных расходов технического фтора на оксидную (V_A^1) и тетрафторидную (V_A^2) линии и отношения массовых расходов ТФУ ($G_{T\Phi Y}$) и ЗОУ (G_{30Y}).

Относительные погрешности определения параметров $\Sigma G_{T\Phi y}$, ΣG_{3Oy} и $\Sigma G_{\Pi P}$ с помощью «ОПМ ПГУ» составили 5,9 %, 4,9 % и 3,1 % соответственно, что доказывает достоверность результатов расчетов на программном модуле «ОПМ ПГУ».

Сложность эксплуатации действующего производства заключается в выборе управляющих воздействий на дозирующие устройства, обеспечивающих подачу

	Условия сог	Сопоставляемые параметры						
№ п/п	$rac{V_A^1}{V_A^2},$	$rac{G_{\mathrm{T}\Phi\mathrm{y}}}{G_{\mathrm{30y}}},$	$\Sigma G_{\mathrm{T}\Phi\mathrm{y}}, \%$		$\Sigma G_{30Y}, \%$		$\Sigma G_{\Pi P}, \%$	
	отн. ед	отн. ед	тренд	модель	тренд	модель	тренд	модель
1	1	1,59	60,1	55,9	36,7	39,2	94,6	97,8
2	0,97	1,43	56,4	55,3	36,5	34,8	88,2	92,6
3	1,18	1,33	57,5	53,4	39,6	40,0	100,0	96,0
4	1,14	1,54	54,2	58,0	38,6	37,7	99,1	98,3
5	0,93	1,82	57,1	60,5	36,5	33,2	98,8	96,3

Таблица 1.1 – Результаты сравнения производственных данных и данных, полученных с помощью программного модуля «ОПМ ПГУ»

твердофазных урансодержащих продуктов и технического фтора по аппаратам производства. Шнековые питатели ПР и аппаратов первой и второй ступеней улавливания входящих в состав двух технологических линий, предполагают 8 точек ввода твердофазного продукта в технологию, а распределение технического фтора организуется локальной АСУ на два ПР. Предметом исследования на математической модели являлись следующие задачи:

 – определение зависимости суммарной производительности ПГУ от распределения технического фтора на оксидную и тетрафторидную технологические линии;

– определение зависимости суммарной производительности ПГУ от величин массовых расходов ТФУ и ЗОУ;

 выявление ограничений на технологические переменные производства, в рамках которых не наблюдается существенных потерь его эффективности;

 формирование рекомендаций по выбору величин загрузок сырьевых продуктов в аппараты производства.

Количество технического фтора, используемого при производстве ГФУ на C3 CXK, обеспечивается действующим электролизным производством и является известной постоянной величиной [1].

Проведенные с использованием «ОПМ ПГУ» исследования доказали, что наибольшее влияние на количество производимого ГФУ, при фиксированном расходе технического фтора, оказывают величины массовых расходов ТФУ и ЗОУ (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Зависимость производительности двух технологических линий от отношения величин массовых расходов ТФУ и ЗОУ

Полученная зависимость позволяет прогнозировать и обеспечивать требуемую производительность производства путем изменения величин загрузок в аппараты, согласно графику 1.7. В качестве рабочей точки выбрано отношение массовых расходов ТФУ и ЗОУ, при которых достигается 67 %-ое повышение производительности относительно ранее действующей оксидной схемы ПГУ, что соответствует новым планам СЗ СХК.

Экспериментально доказано, что изменение распределения технического фтора по двум линиям, не влияет на производительность. Однако выявлено ограничение на минимальное допустимое количество технического фтора, подаваемого на ПР тетрафторидной линии. Данная величина равна минимальному количеству технического фтора, достаточному для фторирования всего объема перерабатываемого тетрафторида, с учетом требуемого по технологии стехиометрического избытка по фтору в ПР тетрафторидной линии (рисунок 1.8).

Из данных представленных на рисунке 1.8 видно, что в рабочей точке не

менее 41 % технического фтора от общего количества должно направляться на ПР тетрафторидной линии.



*m*_{V_A²} – отношение массового расхода технического фтора перерабатываемого ПР тетрфторидной линии к массовому расходу технического фтора перерабатываемому обеими линиями
Рисунок 1.8 – Зависимость минимальной допустимой массовой доли технического фтора перерабатываемой ПР тетрафторидной линии от отношения массовых расходов ТФУ и ЗОУ

Немаловажным фактором, требующим учета при ведении ТП, является стехиометрический избыток ОУ над F_2 , НF и UF₆ в аппаратах ВСУ. В процессе исследований, проводимых с помощью «ОПМ ПГУ», было выявлено, что максимальное улавливание ценных компонентов в двух технологических линиях достигается в случае равенства коэффициентов стехиометрического избытка ОУ в оксидном и тетрафторидном аппаратах ВСУ (рисунок 1.9).

На рисунке 1.10 приведены результаты сопоставления коэффициентов стехиометрического избытка ОУ для ранее используемой оксидной и действующей схем ПГУ при варьировании концентрации фтора на выходе ПР.

Данные, представленные на рисунке 1.10, свидетельствуют о более чем двукратном снижении коэффициента стехиометрического избытка при эксплуатации в рабочей точке (рисунок 1.7) действующей схемы ПГУ относительно ранее используемой оксидной.



*K*_{окс}, *K*_{тетр} – коэффициенты стехиометрического избытка ОУ над ценными улавливаемыми компонентами в аппаратах ВСУ оксидной и тетрафторидной линий, отн. ед.

Рисунок 1.9 – Зависимость степеней улавливания F_2 , HF и UF₆ в аппаратах ВСУ оксидной и тетрафторидной линий от распределения ЗОУ на две технологические





Рисунок 1.10 – Зависимость коэффициента стехиометрического избытка ОУ над F₂, HF и UF₆ от концентрации фтора на выходе ПР

Анализ работы оксидной технологической линии в 2010-2013 г.г. по производственным данным доказывает, что мгновенное значение концентрации фтора на выходе ПР изменяется в диапазоне 0-30 % об. (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 – Концентрация фтора на выходе ПР при эксплуатации оксидной схемы ПГУ

Зависимость, представленная на рисунке 1.10, свидетельствует о том, что действующая технологическая схема ПГУ при концентрациях фтора больших 17 % об. не обеспечивает стехиометрического избытка ОУ в аппаратах ВСУ, что может привести к потерям ценных компонентов. Данное обстоятельство актуализирует повышение требований к САУ ПР, а также к алгоритмам формирования управляющих воздействий на шнеки загрузки аппаратов ВСУ обеих технологических линий.

Приведенные выше зависимости корректны в случае стабильности, как характеристик сырьевых продуктов, так и эффективности технологических узлов. В противном случае возникает потребность в изменении или перераспределении массовых расходов сырьевых продуктов по аппаратам фторирования и улавливания двух линий. Подобные переходные процессы создают условия для неоднородности фторируемого в ПР полупродукта, следствием чего является генерация дополнительных возмущений, нарушающих нормальное протекание ТП производства. Минимизировать влияния этих возмущений можно за счет разработки АСУ аппаратами первой и второй ступеней улавливания обеих технологических линий.

На основании вышеуказанных закономерностей сформулированы требования к целям управления аппаратами двух технологических линий действующей схемы ПГУ:

 обеспечение согласованности загрузок твердофазных компонентов в аппараты двух технологических линий ПГУ;

 стабилизация в автоматическом режиме суммарной производительности по ГФУ двух технологических линий;

обеспечение максимального улавливания фторсодержащих компонентов
в хвостовых технологических газах путем обеспечения равенства коэффициентов
стехиометрического избытка ОУ над F₂, HF, UF₆ в аппаратах ВСУ обеих линий;

 стабилизация в автоматическом режиме состава полупродукта выгружаемого из аппаратов ПСУ обеих линий;

– стабилизация концентраций фтора на выходах ПР обеих технологических линий.

1.5 Патентные исследования

Результаты последнего опубликованного патентного поиска способов автоматизации процессов ПГУ приведены в работе [21]. В работе были выявлены зарегистрированные изобретения, выполняющие автономно следующие функции:

- повышение качества ведения процесса фторирования;

 повышение эффективности перемешивания полупродукта в реакторе дожига;

– поддержание стабильного теплового режима в зоне фторирования;

 максимальное улавливание ГФУ из технологического газа поступающего со стадии десублимации; повышение эффективности процесса сублимации-десублимации в сублимационном аппарате.

Результаты патентного поиска могут быть использованы для изучения ТП с целью дальнейшей модернизации производства, а также при проектировании новых аппаратов и для составления заявки на выдачу патента РФ на способ автоматизированного управления комплексом аппаратов ПГУ [21]. Использование данных работ для управления процессами протекающими в оксидной и тетрафторидной линиях действующего на СЗ СХК ПГУ не представляются возможным ввиду различия в конструкции аппаратов и их техническом оснащении.

В последующий период, до 2015 года включительно, не было выявлено зарегистрированных авторских свидетельств по САУ процессами ПГУ.

Таким образом, 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.

1.6 Разработка структуры автоматизированной системы управления технологическими процессами производства гексафторида урана

Проведенные производственные исследования выявили, что спроектированный в работе [21] каскадный способ управления температурой АУ (рисунок 1.4) может быть успешен лишь при стабильном поведении внутреннего контура стабилизации концентрации фтора, что не было достигнуто на этапе его апробации в составе САУ оксидного ПГУ. Ввиду этого, данная САУ не была принята в постоянную эксплуатацию и как следствие не рассматривалась как элемент АСУ ТП действующей технологической схемы ПГУ.

Автоматизированная система согласования загрузок в аппараты ПР и АУ, разработанная в 2009 году, предполагает расчет управляющего воздействия на шнек загрузки АУ по статической модели. При этом коррекция управляющего

воздействия осуществлялась путем минимизации рассогласования измеренного и рассчитанного по модели веса бункера загрузки ПР. Данная АСУ прошла производственные испытания, однако не была принята в постоянную Причиной послужило расхождение с эксплуатацию. течением времени рассчитываемого и требуемого управляющих воздействий на шнек загрузки АУ, ввиду нестабильности используемых в системе управления коэффициентов, характеризующих работу технологических узлов.

Помимо этого, автоматизированная система согласования загрузок в аппараты ПР и АУ не предусматривает анализ текущей степени наполненности камерных питателей, который необходим для объективной оценки ситуации при формировании управляющего воздействия на шнек загрузки АУ.

Приведенные выше причины актуализируют задачу разработки новой АСУ ТП действующего ПГУ.

Основным возмущением, дестабилизирующим управляемую координату на выходе ПР, является расход технического фтора. Для минимизации его влияния предлагается включить в САУ ПР контур компенсации влияния нестабильности расхода технического фтора на концентрацию фтора на выходе ПР.

Изменения состава фторируемого продукта и объемов технического фтора, подаваемых в ПР оксидной и тетрафторидной линий, привели к изменению объемных расходов технологического газа на выходе ПР. Следствием этого послужило изменение статических и динамических свойств узлов фторирования как объектов управления, что существенно снизило качество управления автоматических систем стабилизации концентраций фтора на выходах ПР обеих технологических линий. Вероятность изменения распределения технического фтора и отношения массовых расходов ТФУ и ЗОУ приводит к необходимости адаптации параметров САУ ПР к изменению статических и динамических параметров его модели.

Одним из важнейших качеств АСУ ТП, влияющих на ее приживаемость, является ее грубость, а именно нечувствительность к изменениям характеристик технологического объекта управления (ТОУ) в процессе эксплуатации, что

достигается включением в структуру САУ алгоритма адаптации параметров настроек регулятора к изменяющимся во времени свойствам ТОУ [23, 24, 25, 26].

В результате проведенного анализа технологической схемы действующего ПГУ был сформирован критерий, характеризующий качество согласования загрузок в аппараты ПГУ. В качестве уставки предлагается использовать суммарное количество полупродукта, находящегося одновременно в бункере ΠР И камерных питателях аппарата ПСУ каждой загрузки ИЗ **ДВУХ** технологических линий. Стабилизируя данную величину на требуемом уровне за счет изменения количества загружаемого полупродукта в аппарат ПСУ и достигается согласованность загрузок в ПР и аппарат ПСУ каждой из двух технологических линий.

Используя аналогичный принцип, предлагается решить задачу стабилизации количества полупродукта в транспортных контейнерах путем изменения частот вращения шнеков загрузки аппаратов ВСУ. Решение данной задачи позволит исключить ситуации излишнего накопления, либо недостатка полупродукта, требуемого для пополнения бункеров ПР обеих технологических линий.

Нестабильность количества фтора в хвостовом газе приводит к изменению стехиометрического избытка ОУ над ценными компонентами, что негативно сказывается на эффективности аппаратов ВСУ и приводит к дестабилизации состава выгружаемого из аппаратов ВСУ полупродукта. Существующими на СЗ СХК средствами контроля не представляется возможным измерение количества фтора в хвостовом газе, ввиду чего был проведен анализ альтернативных источников информации. Единственной измеряемой величиной косвенно характеризующей количество фтора в хвостовом газе является температура реакционной зоны аппарата ВСУ.

Используя показания датчика температуры реакционной зоны аппарата ВСУ, путем изменения количества загружаемой ЗОУ организована компенсация нестабильности стехиометрического избытка ОУ над ценными улавливаемыми компонентами в аппаратах ВСУ двух технологических линий.
Результатом проведенного анализа является АСУ ТП ПГУ, перерабатывающего два вида сырья (рисунок 1.12), которая включает в себя [27, 28, 29, 30, 31]:

– систему автоматической стабилизации на заданном уровне суммарного количества полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных питателях аппарата ПСУ для оксидной ($M_{\Pi\Pi ycr}^1$) и тетрафторидной ($M_{\Pi\Pi ycr}^2$) технологических линий. Управляющими воздействиями при этом являются частоты вращения шнека загрузки аппарата ПСУ оксидной линии (N_{och}^{AY-1}) и шнека подмешки аппарата ПСУ тетрафторидной линии ($N_{nодM}^{AY-2-1}$) (САУ №1);

– систему автоматической стабилизации на заданном уровне суммарного количества полупродукта накапливаемого в транспортных контейнерах (*M*_{конт_уст})
 за счет изменения частот вращения шнеков загрузки аппаратов ВСУ оксидной (*N*^{AY-1-2}_{согл}) и тетрафторидной (*N*^{AY-2-2}_{согл}) линий (САУ №2);

– систему автоматической стабилизации на заданном уровне $(dG_{y_{CT}})$ отношения массовых расходов ТФУ и ЗОУ за счет изменения частоты вращения шнека загрузки аппарата ПСУ тетрафторидной линии (N_{och}^{AY-2-1}) (САУ №3);

– систему автоматической стабилизации коэффициента стехиометрического избытка ОУ над ценными улавливаемыми компонентами в аппаратах ВСУ двух технологических линий, за счет коррекции управляющих воздействий на шнеки загрузки аппаратов ВСУ оксидной (ΔN_{och}^{AY-2-2}) и тетрафторидной (ΔN_{och}^{AY-2-2}) линий;

– систему автоматической стабилизации концентраций фтора на выходе ПР оксидной ($C_{F_2}^1$) и тетрафторидной ($C_{F_2}^2$) линий за счет изменения частот вращения шнеков загрузки (САУ ПР).



 $C_{F_2ycr}^1$, $C_{F_2ycr}^2$ – уставки на концентрацию фтора на выходе ПР оксидной и тетрафторидную линий, % об.; $N^{\Pi P-1}$, $N^{\Pi P-2}$ – 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, м³; $M_{\Pi\Pi}^1$, $M_{\Pi\Pi}^2$ – веса бункеров загрузки ПР оксидной и тетрафторидной линий, кг; N_{ocen}^i , N_{nogm}^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; T^{AV-1-2} , T^{AV-2-2} – температуры реакционных зон аппаратов ВСУ оксидной и тетрафторидной линий, кг линий, °C; M_{KOHT}^{AV-1-2} , M_{KOHT}^{AV-2-2} – веса контейнеров под аппаратами ВСУ оксидной и тетрафторидной линий, кг Рисунок 1.12 – Структурная схема АСУ аппаратами двух технологических линий ПГУ

1.7 Выводы по главе

ПГУ СХК Действующее на состоит ИЗ двух взаимозависимых технологических линий (оксидная и тетрафторидная), каждая из которых включает аппараты фторирования, десублимации и улавливания. Ввод в исходного твердофазного (ТФУ, ЗОУ. технологическую схему сырья полупродукт) осуществляется через шнеки загрузки аппаратов первой и второй ступеней улавливания двух технологических линий, а технический фтор распределяется между ПР автономной АСУ. Взаимозависимость технологических линий выражается в том, что выгружаемый из аппаратов 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 послужил программный модуль «ОПМ ПГУ». Проверка адекватности «ОПМ ПГУ» производилась путем сопоставления рассчитанных на модели и выбранных из производственных данных основных измеряемых технологических переменных, количественно характеризующих производительность аппаратов: суммарный массовый расход ТФУ; суммарный массовый расход ЗОУ; суммарные массовые расходы 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 аппарата ПСУ в ПР, а также взаимозависимость технологических линий стали основными причинами того, что существующая АСУ ТП ПГУ не обеспечивает требуемого качества управления. Посредствам 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 АСУ ТП ПГУ, включающая: систему автоматической стабилизации концентрации фтора на выходе ПР; систему автоматической стабилизации на заданном уровне суммарного количества полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных питателях аппарата ПСУ; систему автоматической стабилизации на заданном уровне суммарного количества полупродукта, накапливаемого в транспортных контейнерах; систему автоматической стабилизации на заданном уровне отношения массовых расходов

40

ТФУ и ЗОУ; систему автоматической стабилизации коэффициента стехиометрического избытка ОУ над ценными улавливаемыми компонентами в аппарате ПСУ.

Для синтеза АСУ ТП протекающими в двух технологических линиях ПГУ необходимо произвести разработку и исследование 5 входящих в нее подсистем.

2 Автоматизированная система согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты двух технологических линий

Технология ПГУ используемая на C3 СХК реализована на большом количестве аппаратов, совместное включение которых образует взаимозависимость обеих технологических линий, как по газовой, так и по твердой фазе. В этой связи, малейшее отклонение от номинального режима работы любого аппарата ПГУ приводит к необходимости коррекции величин загрузок в аппараты первой и второй ступеней улавливания как оксидной, так и тетрафторидной линий. Причинами отклонений могут служить:

 изменения градуировочных характеристик шнеков загрузки ПР и АУ двух технологических линий;

– изменения физико-механических свойств перерабатываемых продуктов;

 изменения во времени величин расхода технического фтора на входе ПР в каждой из двух технологических линий;

- изменения эффективности технологических узлов;

 подмешивание в аппарат ПСУ оксидной линии полупродукта выгружаемого из фильтров.

Разработанная в главе 1 структура АСУ ТП ПГУ предполагает ввод возмущений, выраженных в:

 изменении уставки на суммарное количество полупродукта в бункере ПР и камерных питателях аппарата ПСУ каждой из двух технологических линий;

– изменении уставки на суммарное количество полупродукта, накапливаемого в транспортных контейнерах;

- изменении уставки на отношение массовых расходов ТФУ и ЗОУ.

Для разработки систем управления ТП, необходима математическая модель ТОУ, описывающая зависимость управляемой координаты от управляющей. Эмпирическое определение такой зависимости затруднительно, ввиду риска простоев производственных мощностей. Решение задачи синтеза автоматизированной системы согласования загрузок в аппараты ПГУ может быть достигнуто путем составления динамической математической модели, описывающей поведение двух взаимозависимых технологических линий перерабатывающих два вида сырья. Помимо этого, разработка динамической модели ПГУ позволит провести исследования по определению обеспечиваемого качества управления в случае возникновения выявленных выше возмущений.

2.1 Разработка динамической математической модели производства гексафторида урана

Математическое моделирование является удобным инструментом, используемым при автоматизации ТП, который позволяет без прямых воздействий на реальный ТОУ наблюдать его реакцию на различные возмущения [32, 33]. При составлении модели ТП, подлежащего управлению, высокие требования к точности описания предъявляются управляющему каналу и, в меньшей степени, сторонним процессам. Это объясняется тем, что сторонние процессы рассматриваются как возмущения.

Требования к согласованности загрузок в аппараты фторирования и улавливания двух технологических линий, сформулированные в первой главе, определяют назначение динамической модели ПГУ. В качестве управляющего канала рассматриваются технические средства, с помощью которых организовано движение твердофазных продуктов по технологическим линиям. Точность описания динамики движения технологического газа менее критична, ввиду ее несущественного влияния на массовые расходы твердофазных продуктов по аппаратам производства.

Опираясь на описанную в подразделе 1.2 структуру действующего на C3 СХК ПГУ, была разработана структурная схема динамической математической модели ПГУ, описывающей изменение во времени основных технологических переменных оксидной и тетрафторидной линий (рисунок 2.1).

В основу динамической модели ПГУ легла его статическая модель, составленная в первой главе. Динамические свойства узлов фторирования и



Рисунок 2.1 – Структурная схема динамической модели ПГУ включающая оксидную и тетрафторидную

технологические линии

десублимации были описаны в работе [21] моделями (2.1) и (2.2) соответственно.

$$W_{y\Phi}(s) = \frac{e^{-90s}}{55 \cdot s + 1}.$$
(2.1)

$$W_{\rm yg}(s) = \frac{e^{-194s}}{195 \cdot s + 1}.$$
(2.2)

Идентичные конструкции АУ первой и второй ступеней улавливания предполагают загрузку твердофазного продукта в вертикальную реторту посредствам шнекового питателя. Находясь в состоянии стесненного падения, взвесь взаимодействует с встречным потоком технологического газа. Продукты реакции улавливания осаждаются в горизонтальную часть (ГЧ), где, перемешиваясь, выгружаются в один из двух камерных питателей.

Для описания процесса движения твердофазных продуктов по АУ предлагается использование двух моделей. Первая, статическая модель, описывает химизм процесса улавливания наблюдаемого при движении продукта по вертикальной реторте, вторая – динамическая, описывает динамику движения продукта через ГЧ АУ.

Согласно регламенту эксплуатации аппаратов ПСУ двух технологических линий, выбор камерного питателя в который выгружается полупродукт обеспечивает оператор-технолог. В его же функции входит управление установкой импульсного пневмотранспорта. Для имитации действий операторатехнолога в состав динамической модели ПГУ включен алгоритм автоматической транспортировки полупродукта из аппарата ПСУ в бункер загрузки ПР.

Таким образом, для составления динамической модели ПГУ требуется разработать модель ГЧ АУ и алгоритм автоматической транспортировки полупродукта из аппарата ПСУ в бункер загрузки ПР.

2.1.1 Разработка модели горизонтальной части аппарата улавливания

Эскиз ГЧ АУ приведен на рисунке 2.2.



△*l* – шаг распределения лопостей по длинне ГЧ АУ Рисунок 2.2 – Эскиз горизонтальной части АУ

ГЧ АУ представляет собой цилиндр, внутри которого расположен барабан с лопастями. Барабан приводится во вращение мотор-редуктором как в прямом, так и в инверсном направлениях.

Конструктивные особенности ГЧ АУ позволяют судить о том, что вращение барабана мешалки приводит к выравниванию профиля распределения полупродукта по длине аппарата независимо от направления вращения мешалки. Это подтверждают производственные данные, представленные на рисунке 2.3.

Из рисунка 2.3 видно, что накопление полупродукта в камерных питателях наблюдается как при прямом, так и при инверсном направлениях вращения мешалки. Отталкиваясь от конструкционных особенностей аппарата (рисунок 2.2), было сделано допущение о том, что идеальное перемешивание полупродукта происходит на интервале Δl (рисунок 2.3), за один оборот барабана мешалки. Эффект перемешивания обоснован разной направленностью лопастей мешалки, воздействующих последовательно на одну порцию порошкообразного полупродукта. Принятое допущение позволило составить систему уравнений (2.3),основанную на модели идеального смешения, описывающую перемешивание полупродукта внутри интервала Δl [34].



 t_0- момент времени соответствующий переключению направления вращения мешалки с прямого на инверсное

Рисунок 2.3 – Показания весоизмерительных устройств камерных питателей АУ

$$\begin{cases} \frac{dM_{1}^{UO_{2}}}{dt} = \binom{M_{2}^{UO_{2}} - M_{1}^{UO_{2}}}{2 \cdot T_{MeIII.}}, \\ \frac{dM_{2}^{UO_{2}}}{dt} = \binom{M_{1}^{UO_{2}} - M_{2}^{UO_{2}}}{2 \cdot T_{MeIII.}}, \\ \frac{dM_{1}^{UO_{3}}}{dt} = \binom{M_{2}^{UO_{3}} - M_{1}^{UO_{3}}}{2 \cdot T_{MeIII.}}, \\ \frac{dM_{2}^{UO_{3}}}{dt} = \binom{M_{1}^{UO_{3}} - M_{2}^{UO_{3}}}{2 \cdot T_{MeIII.}}, \\ \frac{dM_{1}^{UO_{2}F_{2}}}{dt} = \binom{M_{1}^{UO_{2}F_{2}} - M_{1}^{UO_{2}F_{2}}}{2 \cdot T_{MeIII.}}, \\ \frac{dM_{2}^{UO_{2}F_{2}}}{dt} = \binom{M_{1}^{UO_{2}F_{2}} - M_{2}^{UO_{2}F_{2}}}{2 \cdot T_{MeIII.}}, \\ \frac{dM_{1}^{UE_{4}}}{dt} = \binom{M_{2}^{UE_{4}} - M_{1}^{UE_{4}}}{2 \cdot T_{MeIII.}}, \end{cases}$$
(2.3)

где M_i^k – масса *k*-го компонента в *i*-ой ячейке, кг;

*Т*_{меш.} – постоянная времени мешалки, с.

Полученная экспериментально зависимость постоянной времени $T_{\text{меш}}$ от частоты вращения мешалки, описывается выражением (2.4).

$$T_{\text{MeIII.}} = \frac{60}{3 \cdot N_{\text{MeIII.}}},\tag{2.4}$$

где $N_{\text{меш.}}$ – частота вращения барабана мешалки, об/мин;

В выражении (2.4) коэффициент при множителе $\frac{60}{N_{\text{меш.}}}$ подобран из условия,

что за один оборот мешалки происходит 95-ти процентное перемешивание продукта на интервале Δl .

Отталкиваясь от принятого допущения, ГЧ АУ была описана 38-ю ячейками длиной $\Delta l/2$ и одной крайней ячейкой, длиной 0,47 · Δl мм. Принцип разбиения ГЧ АУ на ячейки отражен на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Принцип разбиения ГЧ АУ на элементарные ячейки

Диаметр вертикальной реторты в области ее стыковки с ГЧ АУ составляет $3,4 \cdot \Delta l$ мм. Проанализировав геометрию аппарата, с учетом принятого разбиения на ячейки было определено, что загрузка ведется в ячейки с 5 по 10 и частично в ячейки 4 и 11 (рисунок 10). В зону загрузки попадают $0,1 \cdot \Delta l$ мм от ширины

ячейки 4 и 0,3 · *∆l* мм от ширины ячейки 11. Вид горизонтального сечения зоны загрузки продуктов представлен на рисунке 2.5.



S_i – площадь пересечения вертикальной реторты с *i*-ой ячейкой Рисунок 2.5 – Горизонтальное сечение зоны загрузки ГЧ АУ

Как видно из рисунка 2.5, каждая элементарная ячейка имеет разную площадь соприкосновения с вертикальной ретортой АУ, соответственно и распределение загружаемых продуктов будет происходить пропорционально отношению площади соответствующей ячейки и площади зоны загрузки, согласно выражению (2.5).

$$G_i^{\text{BX.}} = \frac{S_i}{S_{\text{BX.}}} \cdot G_{\text{BX.}}, \qquad (2.5)$$

где S_i – площадь соприкосновения зоны загрузки с *i*-ой ячейкой, м²;

 $S_{\rm BX}$ – площадь зоны загрузки полупродукта в ГЧ АУ, м²;

 $G_{_{\rm BX.}}$ – массовый расход полупродукта поступающего из вертикальной в ГЧ АУ, кг/ч;

 $G_i^{\text{вх.}}$ – массовый расход полупродукта в *i*-ую ячейку, кг/ч.

Соотнеся площади S_i с площадью S_{вх.}, были получены весовые коэффициенты (рисунок 2.6 а), в соответствии с которыми происходит распределение массового расхода полупродукта поступающего в ГЧ из вертикальной реторты АУ по ячейкам.

Из ГЧ полупродукт выгружаются шнеком выгрузки из зоны, описываемой 36 и 37 ячейками. Весовые коэффициенты, в соответствии с которыми



Рисунок 2.6 – Гистограмма массовых долей полупродукта поступающего в ячейки модели ГЧ АУ из вертикальной реторты (а) и выгружаемого из ячеек модели ГЧ АУ в камерные питатели (б)

происходит выгрузка полупродукта, отображены на рисунке 2.6 б.

Рабочее пространство ГЧ АУ ограничено с одной стороны цилиндрическим корпусом радиуса $R_{\text{меш}}$, а с другой – барабаном мешалки радиуса $R_{\text{бар}}$. Тогда объем рабочего пространства ГЧ, заполняемого полупродуктом, определяется выражением (2.6).

$$V_{\text{Meill}} = \pi \cdot \left(R_{\text{Meill}}^2 - R_{\text{foap}}^2 \right) \cdot l_{\text{Meill}}, \qquad (2.6)$$

где $l_{\text{меш}}$ – длина мешалки, м;

В рабочем пространстве ГЧ вращается барабан мешалки, на поверхности которого имеются лопасти. Всего на шнеке 22 лопасти, шесть из которых выполнены по типу «уголок» и имеют внешний вид, представленный на рисунке 2.7 а, а остальные шестнадцать лопастей выполнены по типу «швеллер» (рисунок 2.7 б).

Рассчитанный объем, занимаемый лопастями мешалки ($V_{\text{лоп}}$), соответствует 2 % от объема ГЧ ($V_{\text{меш}}$).

50



Рисунок 2.7 – Форма лопастей барабана мешалки ГЧ АУ типов «уголок» (а) и «швеллер» (б)

Итоговая система уравнений, описывающая распределение полупродукта по ГЧ представлена выражением (2.7) [35].

$$\begin{cases} \frac{dM_{1}^{k}}{dt} = \binom{M_{2}^{k} - M_{1}^{k}}{2 \cdot T_{\text{MeIII.}}} \\ \frac{dM_{i}^{k}}{dt} = \binom{M_{i-1}^{k} + M_{i+1}^{k} - 2 \cdot M_{i}^{k}}{2 \cdot T_{\text{MeIII.}}} \\ \frac{dM_{39}^{k}}{dt} = \binom{M_{38}^{k} - M_{39}^{k}}{2 \cdot T_{\text{MeIII.}}} \end{cases}$$
(2.7)

Проверка адекватности модели ГЧ АУ (2.7) производилась в программном комплексе Matlab путем сопоставления количества выгружаемого из АУ в камерные питатели полупродукта, рассчитанного на модели, и реальных производственных данных весоизмерительных устройств. Рассматривались участки времени, на которых происходило наполнение опустошенной ГЧ. Пример отобранного участка представлен на рисунке 2.8.

Сопоставлялись интервалы времени с момента начала загрузки в вертикальную часть АУ до момента реакции весоизмерительных устройств камерных питателей АУ. Результаты сопоставления интервалов времени, рассчитанных по модели и полученных из производственных данных, приведены в таблице 2.1.



Рисунок 2.8 – Масса полупродукта выгружаемого из ГЧ АУ в камерные питатели при наполнении опустошенной ГЧ

Таблица 2.1 – Результаты сопоставления расчетов на модели и данных, отобранных из производственных трендов при наполнении опустошенной ГЧ АУ

Дата	$ au_{ m MOДель},c$	$ au_{ ext{тренды}}, ext{c}$	$\Delta \tau$, c	δτ, %
03.05.12	70	87	17	19,5
06.09.12	30	25	5	20
09.06.12	61	83	22	26,5
14.08.12	80	87	7	8,05
16.09.12	90	77	13	16,9
20.06.12	60	60	0	0
22.08.12	320	330	10	3,0
01.06.12	110	113	3	2,7
Среднее	_	_	9,6	12,1

Согласно данным, приведенным в таблице 2.1, среднее относительное отклонение результатов моделирования ($\tau_{\text{модель}}$) от производственных данных весоизмерительных устройств камерных питателей АУ ($\tau_{\text{тренды}}$) составило 12,1 %.

Одним из важнейших параметров, характеризующим инерционность процесса транспортировки полупродукта через ГЧ АУ является количество полупродукта, находящегося в ней в режиме нормальной эксплуатации. Для оценки данной величины было произведено сопоставление интервалов времени с момента прекращения загрузки полупродукта в ГЧ АКТ, до ее полного опустошения (рисунок 2.9). Результаты сопоставления сведены в таблицу 2.2.



Рисунок 2.9 – Масса полупродукта выгружаемого из ГЧ АУ в камерные питатели при опустошении наполненной ГЧ

Согласно данным представленным в таблице 2.2, среднее относительное отклонение времен опустошений ГЧ АУ рассчитанных на модели ($TT_{\text{модель}}$) и производственных данных весоизмерительных устройств камерных питателей ($TT_{\text{тренды}}$) составило 6,3 %.

Дата	$TT_{\rm модель}, c$	$TT_{ m тренды}, c$	ΔTT , c	δ <i>TT</i> , %
06.09.12	1256	1236	20	1,6
07.05.12	1440	1260	180	14,3
14.08.12	1190	1100	90	8,2
16.09.12	1385	1375	10	0,7
18.04.12	2450	2160	290	13,4
19.04.12	2230	2220	10	0,45
20.06.12	1630	1610	20	1,2
22.08.12	1610	1460	150	10,3
Среднее	_	_	96,3	6,3

Таблица 2.2 – Результаты сопоставления расчетов на модели и данных, отобранных из производственных трендов при опустошении наполненной ГЧ АУ

Достигнутые отклонения результатов моделирования и производственных данных укладываются в 12 %, что является достаточным для использования модели ГЧ АУ при синтезе автоматизированной системы согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты двух технологических линий ПГУ.

2.1.2 Процедура транспортировки полупродукта из аппарата первой ступени улавливания в бункер загрузки ПР

Из ГЧ шнеком выгрузки полупродукт доставляется в один из камерных питателей аппарата ПСУ. Далее, по инициативному сигналу оператора-технолога посредством импульсного пневмотранспорта, полупродукт из соответствующего камерного питателя поступает в бункер загрузки ПР.

В обязанности оперативно-технологического персонала входит управление установкой пневмотранспорта, основанием для которого являются показания весоизмерительных устройств камерных питателей аппарата ПСУ и бункера загрузки ПР. Проведя анализ различных участков производственных данных, были сформулированы функции, реализация которых в модели ПГУ обеспечила имитацию действий оператора-технолога при моделировании транспортировки полупродукта из камерных питателей аппарата ПСУ в бункер загрузки ПР каждой из двух технологических линий:

 – формирование сигнала, инициирующего запуск/останов системы импульсного пневмотранспорта обеспечивающего транспортировку полупродукта из выбранного оперативно-технологическим персоналом камерного питателя в бункер ПР;

– выбор камерного питателя, в который осуществляется выгрузка полупродукта из ГЧ АУ.

Запуск системы импульсного пневмотранспорта осуществляется при достижении минимального порогового уровня веса бункера загрузки ПР. Завершение пневмотранспортировки происходит в момент полного опустошения камерного питателя, из которого транспортировался полупродукт.

В случае, если масса полупродукта в камерном питатели равна или превышает максимальную допустимую величину ($M_{\rm max}$), выгрузка продолжается в другой камерный питатель того же АУ.

2.2 Система автоматической стабилизации суммарного количества полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных питателях аппарата ПСУ

Определить допустимый диапазон изменения суммарного количества полупродукта в бункере ПР и камерных питателях аппарата ПСУ можно рассмотрев максимально загруженное и опустошенное состояния, при которых обеспечивается корректная работа производства. Максимально допустимое заполнение бункера загрузки ПР и камерных питателей аппарата ПСУ наблюдается в случае, когда к моменту окончания процесса пневмотранспортировки полупродукта в бункер ПР, максимально заполнены один из камерных питателей и бункер загрузки ПР. С учетом их вместимости максимальная загруженность соответствует $2 \cdot M_{\text{max}}$, где M_{max} – максимальная вместимость как бункера загрузки ПР, так и одного камерного питателя АУ.

Минимальное допустимое заполнение бункера загрузки ПР и камерных питателей аппарата ПСУ наблюдается в случае, когда к моменту полного опустошения бункера ПР, наполнен один из камерных питателей. Следовательно, минимальное суммарное количество полупродукта в бункере ПР и камерных питателей аппарата ПСУ совпадает с величиной $M_{\rm max}$.

Выявленные границы определяют допустимый диапазон изменения управляемой координаты системы автоматической стабилизации суммарного количества полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных питателях каждой из двух технологических линий.

Непрерывные возмущения, наблюдаемые на производстве, приводят к нестабильности суммарного количества полупродукта, отклоняя его как в меньшую, так и в большую стороны относительно среднего значения. Для сокращения вероятности выхода управляемой координаты ИЗ диапазона допустимых значений предлагается в качестве уставки ($M_{\Pi\Pi\nu cr}$) выбрать середину допустимого диапазона, равную $1,5 \cdot M_{\text{max}}$. Тогда алгоритм функционирования разрабатываемой САУ сводится к стабилизации в диапазоне от $M_{
m max}$ ДО $2 \cdot M_{\text{max}}$ суммарного количества полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных ПСУ. Структурная схема питателях аппарата системы автоматической стабилизации суммарного количества полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных питателях представлена на рисунке 2.10.

Для настройки регулятора САУ, представленной на рисунке 2.10, требуется определить динамические характеристики обобщенного объекта управления. Рассматривая канал управления, представляющий собой участок от точки приложения воздействия до точки изменения управляемой координаты, можно сделать вывод о том, что его динамические и статические характеристики определяют горизонтальная и вертикальная части АУ.



M[∑]_{IIII} – суммарное количество полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных питателях аппарата
 ПСУ, кг; *N*^{Ay}_{пид} – управляющее воздействие на шнек загрузки аппарата ПСУ рассчитанное ПИД регулятором, об/мин; *N*^{AV} – управляющее воздействие на шнек загрузки аппарата ПСУ рассчитанное
 ПИД-регулятором с учетом ограничения на скорость нарастания, об/мин; *M*^{AV}₂₁₅₋₁, *M*^{AV}₂₁₅₋₂ – веса первого и
 второго камерных питателей аппарата ПСУ, кг; *M*_{пп} – вес полупродукта в бункере загрузки ПР, кг
 Рисунок 2.10 – Структурная схема системы автоматической стабилизации
 суммарного количества полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных
 питателях аппарата ПСУ

Необходимая для настройки регулятора разрабатываемой САУ модель объекта управления представлена интегрирующим звеном первого порядка с запаздыванием:

$$W(s) = \frac{K_{AV} \cdot e^{-\tau_{AV} \cdot s}}{s}, \qquad (2.8)$$

*K*_{Ay}, *τ*_{Ay} – коэффициент добротности по скорости и время запаздывания модели объекта управления системы автоматической стабилизации суммарного количества полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных питателях.

Коэффициент K_{AV} модели (2.8) определяет зависимость скорости накопления полупродукта в камерных питателях АУ от частоты вращения шнека загрузки АУ. Проведенные на «ОПМ ПГУ» исследования показали, что массовый расход ОУ существенно больше массового расхода улавливаемых F₂, HF и UF₆, вследствие чего принято допущение о том, что коэффициент K_{AV} описывается следующим выражением:

$$K_{\rm AV} = \frac{k_{\rm rpag}^{\rm AV}}{60},$$
 (2.9)

где $k_{\text{град}}^{\text{АУ}}$ – градуировочный коэффициент шнека загрузки АУ, кг/об.

После шнекового питателя полупродукт поступает в вертикальную часть АУ, где находясь в состоянии стесненного падения, через время τ_{B4} достигает ГЧ. Данный участок правомерно описывается звеном запаздывания с единичным коэффициентом передачи. Величина τ_{B4} рассчитывается как отношение высоты вертикальной части и средней скорости осаждения взвеси – 0,35 м/сек [36].

Динамика движения полупродукта по ГЧ АУ описывается моделью разработанной в п. 2.1.1. Для приведения ее в соответствие со структурой (2.8) потребовалось решить задачу линеаризации разработанной ранее модели ГЧ и представления ее передаточной функцией вида [37]:

$$W(s) = \frac{1 \cdot e^{-\tau_{\Gamma_{1}} \cdot s}}{s},$$
 (2.10)

Одним из условий, налагаемых на систему автоматической стабилизации суммарного количества полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных питателях АУ, является ограничение по скорости нарастания управляющего сигнала равное 2,4 об/мин за 1 час. С целью определения коэффициента $\tau_{\Gamma \Psi}$ модели (2.10) в условиях малых приращений N^{AV} было произведено моделирование переходных процессов реакции модели ГЧ (2.7) при изменении частоты вращения шнека загрузки АУ N^{AV} в диапазоне от -2,4 об/мин до +2,4 об/мин относительно рабочей точки. Результаты моделирования приведены на рисунке 2.11.

Полученные реакции (рисунок 2.11) были обработаны в программном комплексе Matlab, результаты сведены в таблицу 2.3.

Согласно данным приведенным в таблице 2.3, среднее значение времени запаздывания $\tau_{\Gamma\Psi}$ соответствует 58 с.

Математическое описание отдельных участков канала управления системы автоматической стабилизации суммарного количества полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных питателях АУ позволило определить численное значение параметра τ_{AV} модели (2.8) по выражению (2.11).



Рисунок 2.11 – Масса полупродукта выгружаемого из ГЧ АУ при ступенчатом изменение частоты вращения шнека загрузки АУ

Таблица 2.3 – Зависимость времени запаздывания модели ГЧ АУ от величины подаваемого возмущения

Начальное значение N^{AY} , об/мин	Конечное значение N^{Ay} , об/мин	$ au_{ m \Gamma Y}$, c
20	20,8	27,33
20	21,6	53,72
20	22,4	75,68
20	19,2	29,13
20	18,4	62,64
20	17,6	99,88
Среднее	_	58

$$\tau_{\rm AV} = \tau_{\rm BY} + \tau_{\rm FY} = 78 \,\mathrm{c.} \tag{2.11}$$

На практике в качестве регулятора одноконтурной САУ астатическим объектом, описываемым моделью (2.8), используют ПИ и ПИД законы регулирования [38]. Результаты расчета параметров настройки ПИ- и ПИД-регулятора по известным методикам сведены в таблицу 2.4 [38, 39, 40].

Таблица 2.4 – Параметры настройки регулятора системы автоматической стабилизации суммарного количества полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных питателях аппарата ПСУ

	ПИ-закон		ПИД-закон		
Метод расчета	$K_{\scriptscriptstyle P}^{\scriptscriptstyle m AY}$	$T_{{\scriptscriptstyle \cal U}}^{\scriptscriptstyle m AY}$	$K_{ m P}^{ m Ay}$	$T_{ m M}^{ m Ay}$	$T_{ m A}^{ m Ay}$
Оптимального модуля	0,6	455	0,72	22,7	3,7
Апериодической устойчивости	0,51	455	0,86	456	20,5
Копеловича	0,44	468	0,66	390	15,6
Копеловича- Шаркова	0,51	449	0,71	390	17,9

К наиболее существенным возмущениям дестабилизирующим суммарное количество полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных питателях относятся:

– изменение градуировочных характеристик шнека загрузки ПР;

– изменение количества загружаемого полупродукта в ПР вызванное изменением расхода технического фтора.

– изменение градуировочных характеристик шнека загрузки АУ.

Изменение градуировочных характеристик шнека загрузки ПР отслеживает САУ ПР, вследствие чего корректируется частота вращения шнека загрузки ПР с целью достижения требуемой концентрации фтора на выходе ПР.

Изменение величин расхода технического фтора на линиях ПГУ происходит с участием оператора-технолога, в процессе чего в ручном режиме корректируются загрузки и в АУ.

Изменение градуировочных характеристик шнека загрузки АУ является неконтролируемой величиной, что дает основание считать данное возмущение наиболее критичным при настройке системы автоматической стабилизации суммарного количества полупродукта в бункере загрузки ПР и камерных питателях аппарата ПСУ.

Выбор параметров настройки регулятора производился на основании сопоставления реакций САУ на ступенчатое воздействие, представляющее собой дополнительный прирост в 10 % к максимальной производительности шнека загрузки АУ. Величина возмущения обоснована результатами исследований по определению диапазона изменения градуировочного коэффициента шнека загрузки АУ [21].

Результаты моделирования САУ с рассчитанными параметрами настройки (таблица 2.4) были обработаны, а рассчитанные показатели качества сведены в таблицу 2.5.

	ПИ-закон			ПИД-закон		
Метод расчета	<i>t</i> _р , ч	A _{1,} отн. ед.	<i>A</i> ₃ , %	<i>t</i> _р , ч	A _{1,} отн. ед.	<i>A</i> ₃ , %
Оптимального модуля	46,2	0,453	97	-	-	-
Апериодической устойчивости	46,2	0,453	97	45,5	0,453	97
Копеловича	44,6	0,453	97	50	0,453	118
Копеловича-Шаркова	46,9	0,453	097	50	0,453	118

Таблица 2.5 – Показатели качества исследуемых САУ

Показатели качества переходных процессов для САУ с настройками ПИД-регулятора, рассчитанных по методу оптимального модуля, не приведены, ввиду неустойчивости системы управления.

Сопоставление качества регулирования остальных САУ производилось по следующим показателям качества:

– время установления t_p , характеризующее длительность переходного процесса от момента подачи возмущения до момента входа регулируемой координаты ($M_{\Pi\Pi}$) в зону допустимой точности. Зона допустимой точности была принята равной 3,3 % относительно уставки ($M_{\Pi\Pi}$);

– максимальное отклонение A_1 управляемой координаты ($M_{\Pi\Pi}$) относительно уставки ($M_{\Pi\Pi_{VCT}}$) выраженное в приведенной к M_{\max} величине;

– перерегулирование управляющего сигнала *A*₃, рассчитывалось по выражению (2.12).

$$A_{3} = \frac{\Delta N_{\text{make}} - \Delta N_{\text{crar}}}{\Delta N_{\text{crar}}} \cdot 100$$
(2.12)

где $\Delta N_{\text{макс}}$ – максимальное отклонение управляющего воздействия $N^{\text{АУ}}$ относительно своего начального значения за время переходного процесса (t_{p}), об/мин;

 $\Delta N_{\rm crat}$ – разность между начальным и установившимся значением $N^{\rm AY}$, об/мин.

Из данных, приведенных в таблице 2.5, видно, что все исследуемые САУ обеспечивают схожее и низкое качества управления. Это объясняется вводом ограничения на скорость изменения управляющего воздействия, которое привело к колебательным переходным процессам по управляемой координате ($M_{\Pi\Pi}$) для исследуемых САУ.

Анализ литературы не выявил аналитических методов, позволяющих осуществить настройку ПИД–регуляторов с учетом ограничений на управляющее воздействие. Виду этого, была произведена итерационная оптимизация параметров настройки регулятора, опирающаяся на следующие критерии:

- перерегулирование A_3 не должно превышать 20 %;

- минимизация времени установления $t_{\rm p}$;

– минимизация отклонения управляемой координаты $M_{\Pi\Pi}$ относительно ее желаемого значения $M_{\Pi\Pi\nu cr}$.

В результате параметрической оптимизации был выбран ПИ-закон управления (2.13) с параметрами настройки (2.14).

$$W(s) = K_{\rm p}^{\rm AY} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{\rm H}^{\rm AY} \cdot s}\right)$$
(2.13)

$$K_{\rm p}^{\rm AV} = 0,032,$$

 $T_{\rm H}^{\rm AV} = 7240.$ (2.14)

Реакция САУ (рисунок 2.10) с оптимизированными параметрами ПИрегулятора (2.13) на ступенчатом изменение частоты вращения шнека загрузки АУ приведена на рисунке 2.12.



Рисунок 2.12 – Переходная функция САУ АУ с оптимизированными параметрами регулятора

Из графика 2.12 видно, что управляемая координата М_{пп}, нормированная допустимом диапазоне, а управляющее находится в на величину $M_{\rm max}$, N^{AY} воздействие имеет малое перерегулирование (A_3) < 20 %). что свидетельствует о достаточном качестве управления спроектированной САУ при допустимых условиях изменения управляющего воздействия.

Так же было произведено исследование системы на грубость. Коэффициент добротности по скорости модели (2.8) варьировалась в пределах 10 %, а время запаздывания в пределах 50 % относительно номинальных значений. Результаты проверки на грубость представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Показатели качества управления исследуемой САУ при варьировании параметров модели объекта управления

Условия эксперимента	<i>t</i> _р , ч	<i>А</i> _{1,} отн. ед.	<i>A</i> ₃ , %
При увеличении на 10 % коэффициента			
добротности по скорости и на 50 %	2,3	61	20
динамических параметров модели ТОУ			
При номинальных параметрах модели ТОУ	1,9	56	19
При уменьшении на 10 % коэффициента			
добротности по скорости и на 50 %	1,59	52	19
динамических параметров модели ТОУ			

Из полученных результатов (таблица 2.6) видно, что разработанная система автоматической стабилизации суммарного количества полупродукта в бункере ΠР питателях аппарата ПСУ загрузки И камерных каждой ИЗ **ДВУХ** обладает технологических линий достаточной грубостью, что является основанием для ее использования в составе АСУ ТП ПГУ.

2.3 Система автоматической стабилизации суммарного количества полупродукта накапливаемого в транспортных контейнерах

Проведенные компьютерные исследования на статической модели ПГУ выявили следующие зависимости:

 – суммарная загрузка ЗОУ в аппараты ВСУ двух технологических линий определяет скорость накопления полупродукта в транспортные контейнеры;

 – распределение массового расхода ЗОУ на два аппарата ВСУ определяет величины стехиометрических избытков ОУ над ценными улавливаемыми компонентами на обеих технологических линиях.

С учетом выявленных зависимостей была разработана система автоматической стабилизации на требуемом уровне суммарного количества полупродукта накапливаемого в транспортных контейнерах, структурная схема которой представлена на рисунке 2.13.



Рисунок 2.13 – Структурная схема системы автоматической стабилизации суммарного количества полупродукта накапливаемого в транспортных контейнерах

Представленная рисунке 2.13 САУ построена по принципу обратной связи и включает алгоритм разделения управляющего воздействия на два аппарата. Контур стабилизации с ПИД-регулятором, корректирует суммарный массовый расход ЗОУ в аппараты ВСУ двух линий, с целю стабилизации на требуемом уровне суммарного количества полупродукта, накапливаемого в транспортных контейнерах. Алгоритм разделения управляющего воздействия, рассчитанного регулятором ($N_{\rm corn}$), обеспечивает распределение величины $N_{\rm corn}$ на два управляющих воздействия на шнеки загрузки аппаратов ВСУ оксидной и тетрафторидной линий, при которых достигается одинаковый коэффициент стехиометрического избытка ОУ над ценными улавливаемыми компонентами на обеих технологических линиях.

Конструкции аппаратов первой и второй ступеней улавливания идентичны, что дает основания считать одинаковыми и их свойства как объектов управления. Ввиду этого, в системе автоматической стабилизации суммарного количества полупродукта, накапливаемого в транспортных контейнерах, принято использовать рассчитанный в подразделе 2.2 ПИ–регулятор.

На величину стехиометрического избытка, создаваемого в аппарате ВСУ, влияет как количество загружаемой ЗОУ, так и количества поступающих со стадии десублимации F₂, HF, и UF₆.

Проведенные с помощью «ОПМ ПГУ» исследования выявили зависимость отношения частот вращения шнеков загрузки в аппаратах ВСУ двух технологических линий от отношения расходов технического фтора и величины концентрации фтора на выходе ПР, при условии равенства стехиометрических избытков в оксидной и тетрафторидной линиях (рисунок 2.14).



Рисунок 2.14 – Зависимость отношения частот вращения шнеков загрузки в аппараты ВСУ двух технологических линий от отношения расходов технического фтора двух технологических линий и концентрации фтора на выходе ПР

Представленные на рисунке 2.14 результаты были описаны выражением (2.15).

$$ust = \frac{N_{\text{corn}}^{\text{AV-1-2}}}{N_{\text{corn}}^{\text{AV-2-2}}} = 0,07108 - 0,00086 \cdot C_{\text{F}_2} + 0,7618 \cdot \frac{V_A^1}{V_A^2} + 0,0055 \cdot C_{\text{F}_2} \cdot \frac{V_A^1}{V_A^2}$$
(2.15)

где *ust* – уставка на отношение величин загрузок ЗОУ в оксидную и тетрафторидную технологические линии, отн. ед.;

 C_{F_2} – арифметическое среднее значение уставок на объемную концентрацию фтора на выходе ПР двух технологических линий, % об.

Выявленная зависимость (2.15) позволила распределять управляющее воздействие рассчитанное регулятором на две технологические линии по следующим условиям:

если
$$dN^{AY}(i) \ge 0$$
 u $ust < \frac{N_{corn}^{AY-1-2}(i-1)}{N_{corn}^{AY-2-2}(i-1)}$, то $N_{corn}^{AY-1-2}(i) = N_{corn}^{AY-1-2}(i-1) + \frac{1}{3} \cdot dN^{AY}(i)$,
 $N_{corn}^{AY-2-2}(i) = N_{corn}^{AY-2-2}(i-1) + \frac{2}{3} \cdot dN^{AY}(i)$;
если $dN^{AY}(i) \ge 0$ u $ust > \frac{N_{corn}^{AY-1-2}(i-1)}{N_{corn}^{AY-2-2}(i-1)}$, то $N_{corn}^{AY-1-2}(i) = N_{corn}^{AY-1-2}(i-1) + \frac{2}{3} \cdot dN^{AY}(i)$,
 $N_{corn}^{AY-2-2}(i) = N_{corn}^{AY-2-2}(i-1) + \frac{1}{3} \cdot dN^{AY}(i)$;
если $dN^{AY}(i) < 0$ u $ust < \frac{N_{corn}^{AY-1-2}(i-1)}{N_{corn}^{AY-2-2}(i-1)}$, то $N_{corn}^{AY-1-2}(i) = N_{corn}^{AY-1-2}(i-1) + \frac{2}{3} \cdot dN^{AY}(i)$,
 $N_{corn}^{AY-2-2}(i) = N_{corn}^{AY-2-2}(i-1) + \frac{1}{3} \cdot dN^{AY}(i)$;
если $dN^{AY}(i) < 0$ u $ust < \frac{N_{corn}^{AY-1-2}(i-1)}{N_{corn}^{AY-2-2}(i-1)}$, то $N_{corn}^{AY-1-2}(i) = N_{corn}^{AY-1-2}(i-1) + \frac{1}{3} \cdot dN^{AY}(i)$;
если $dN^{AY}(i) < 0$ u $ust > \frac{N_{corn}^{AY-1-2}(i-1)}{N_{corn}^{AY-2-2}(i-1)}$, то $N_{corn}^{AY-1-2}(i) = N_{corn}^{AY-1-2}(i-1) + \frac{1}{3} \cdot dN^{AY}(i)$;
если $dN^{AY}(i) < 0$ u $ust > \frac{N_{corn}^{AY-2-2}(i-1)}{N_{corn}^{AY-2-2}(i-1)}$, то $N_{corn}^{AY-1-2}(i) = N_{corn}^{AY-1-2}(i-1) + \frac{1}{3} \cdot dN^{AY}(i)$,
 $N_{corn}^{AY-2-2}(i) = N_{corn}^{AY-2-2}(i-1) + \frac{2}{3} \cdot dN^{AY}(i)$, (2.16)

где $dN^{Ay}(i)$ – управляющее воздействие рассчитанное регулятором на *i*-ом такте управления, об/мин;

N^{AУ-1-2}_{согл}(*i*) – управляющее воздействие на шнек загрузки аппарата ВСУ оксидной линии на *i*-ом такте управления, об/мин;

N^{AУ-2-2}(*i*) – управляющее воздействие на шнек загрузки аппарата ВСУ тетрафторидной линии на *i*-ом такте управления, об/мин.

2.4 Система автоматической стабилизации отношения массовых расходов ТФУ и ЗОУ

Проведенные в первой главе компьютерные исследования выявили, что наибольшее влияние на суммарную производительность оксидной и тетрафторидной технологических линий оказывает отношение массовых расходов ТФУ и ЗОУ (рисунок 1.7). Количественно, затраты ЗОУ определяет система автоматической стабилизации суммарного количества полупродукта,

накапливаемого в транспортных контейнерах, следовательно, воздействовать на отношение массовых расходов ТФУ к ЗОУ возможно только путем изменения массового расхода ТФУ, обеспечиваемого шнеком загрузки аппарата ПСУ тетрафторидной линии.

Структурная схема предлагаемой системы автоматической стабилизации отношения массовых расходов ТФУ и ЗОУ представлена на рисунке 2.15.



Рисунок 2.15 – Структурная схема системы автоматической стабилизации отношения массовых расходов ТФУ и ЗОУ

Управляющее воздействие на шнек загрузки аппарата ПСУ тетерафторидной линии корректируется позиционной САУ на основании рассогласования уставки и текущего отношения массовых расходов ТФУ и ЗОУ согласно выражениям (2.17)

$$N_{\text{och}}^{\text{AV-2}}(i) = \begin{cases} N_{\text{och}}^{\text{AV-2}}(i) + \frac{2,4}{3600} \cdot \Delta t, \text{ если } dG_{\text{ycr}} \leq 0,95 \cdot \frac{N_{\text{och}}^{\text{AV-2}}(i)}{N_{\text{och}}^{\text{AJV-1}}(i) + N_{\text{och}}^{\text{AJV-2}}(i)} \\ N_{\text{och}}^{\text{AV-2}}(i) - \frac{2,4}{3600} \cdot \Delta t, \text{ если } dG_{\text{ycr}} \geq 1,05 \cdot \frac{N_{\text{och}}^{\text{AJV-1}}(i) + N_{\text{och}}^{\text{AJV-2}}(i)}{N_{\text{och}}^{\text{AJV-1}}(i) + N_{\text{och}}^{\text{AJV-2}}(i)} \\ N_{\text{och}}^{\text{AV-2}}(i) - \frac{2,4}{3600} \cdot \Delta t, \text{ если } 0,95 < \frac{dG_{\text{ycr}} \cdot \left(N_{\text{och}}^{\text{AJV-1}}(i) + N_{\text{och}}^{\text{AJV-2}}(i)\right)}{N_{\text{och}}^{\text{AV-2}}(i)} < 1,05 \end{cases}$$

$$(2.17)$$

2.5 Анализ качества работы автоматизированной системы согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты двух технологических линий

В режиме нормальной эксплуатации на аппараты ПГУ непрерывно действует большое контролируемых количество И неконтролируемых возмущений, которые отклоняют технологические параметры от их номинальных значений. Испытать разработанную автоматизированную систему согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты ПГУ при всех возможных возмущениях не представляется возможным. Ввиду этого для проверки работоспособности автоматизированной системы согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты ПГУ были выбраны те возмущения, которые оказывают наибольшее влияние на управляемые координаты:

– изменение распределения технического фтора $\frac{V_A^1}{V_A^2}$ относительно номинального на 30 %, с 1,14 на 1,5 (возмущение №1);

– изменение уставки dG_{ycr} на отношение массовых расходов ТФУ и ЗОУ на 45 %, с 1,82 до 1 (возмущение №2);

– уменьшение градуировочного коэффициента шнека загрузки аппарата
 ВСУ тетрафторидной линии относительно номинального на 10 % (возмущение №3).

При испытаниях автоматизированной системы согласования загрузок включающей 4 САУ, оценивались динамические ошибки регулирования каждого из контуров автоматического управления, а также общее быстродействие всей АСУ. Результаты анализа качества управления приведены в таблице 2.7.

Из приведенных в таблице 2.7 данных видно, что максимальные динамические ошибки регулирования, приведенные к допустимым диапазонам по трем стабилизируемым переменным, не превысили 20 %. Достигнутое качество управления автоматизированной системы согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты ПГУ доказывает ее работоспособность.

Таблица 2.7 – Показатели качества управления автоматизированной системы согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты двух технологических линий

	Возмущение	Возмущение	Возмущение
Показатели качества	№ 1	Nº2	Nº3
Максимальное отклонение от			
уставки суммарного количества			
полупродукта в бункере ПР и	6 1	0.0	0.3
камерных питателях аппарата ПСУ	0,1	0,9	0,5
в оксидной линии, приведенное к			
допустимому диапазону, %			
Максимальное отклонение от			
уставки суммарного количества			
полупродукта в бункере ПР и			
камерных питателях аппарата ПСУ	19,0	8,8	11,4
в тетрафторидной линии,			
приведенное к допустимому			
диапазону, %			
Максимальное отклонение от			
уставки суммарного количества			
полупродукта накапливаемого в	1 0	5 /	15
транспортных контейнерах в	1,7	5,4	1,5
тетрафторидной линии, приведенное			
к допустимому диапазону, %			
Максимальное отклонение			
отношения массовых расходов ТФУ	0,14	0,45	10^{-4}
и ЗОУ от уставки, отн. ед.			
Время установления,			
характеризующее длительность			
переходного процесса от момента			
подачи возмущения, до момента	3,9	9,2	3,4
входа регулируемых координат в			
зону допустимой точности – 5 % от			
уставок, ч			

2.6 Выводы по главе

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 загрузи 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, 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 первой САУ являются управляющие воздействия на шнеки загрузки аппарата ПСУ двух технологических линий, в результате чего достигается требуемое суммарное количество полупродукта накапливаемого в бункере загрузки ПР и камерных питателях аппарата ПСУ каждой из двух технологических линий. Вторая САУ обеспечивает стабилизацию суммарного количества полупродукта, накопленного в транспортных контейнерах, за счет коррекции управляющих воздействий на

71

шнеки загрузки аппаратов ВСУ обеих линий. Третья САУ, 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, превысили 20 %. не Достигнутая динамическая точность управления, в близких к производственным условиях испытаний, достаточной использования является ДЛЯ разработанной автоматизированной системы согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты двух технологических линий на СЗ СХК.
3 Системы автоматической стабилизации коэффициентов стехиометрического избытка оксидов урана над ценными фторсодержащими компонентами в аппаратах первых ступеней улавливания

3.1 Исследование процесса улавливания фторсодержащих компонентов

Назначением аппаратов ВСУ в составе ПГУ является улавливание ценных фторсодержащих компонентов на ОУ. Конструкция АУ представлена на рисунке 3.1 [1, 41].



1, 1' – бункеры загрузки; 2 – шнек загрузки с электроприводом постоянного тока; 3– распылитель; 4 – реторта; 5 – ТЭН; 6 – рубашка охлаждения; 7 – ГЧ с мешалкой; 8 – шнек выгрузки; 9 – шнек перегрузки; 10 – камерные питатели установки пневмотранспорта Рисунок 3.1 – Эскиз АУ

73

Принцип работы аппарата АУ следующий. Газ, содержащий улавливаемые компоненты, через входной патрубок газораспределительной головки поступает в ГЧ с мешалкой (7). Из бункера (1) шнековым питателем (2) через распылитель (3) в реторту (4) АУ подаются ОУ, в которой протекают процессы улавливания фтороводорода, фтора И ГФУ. Твердофазные продукты улавливания, образующиеся в реторте аппарата, смешиваются мешалкой в ГЧ АУ (7) и шнеком выгрузки (8) выгружаются в корпус шнека перегрузки (9), который позволяет производить выгрузку поочередно В два камерных питателя установки пневмотранспорта (10) путем изменения направления вращения шнека перегрузки. Также дополнительно смонтирован бункер (1'), из которого периодически осуществляется подмешивание различных твердых урансодержащих продуктов, например, пыли из фильтров непосредственно в корпус шнека перегрузки.

В подразделе 1.6 было показано, что для стабилизации коэффициента $(K_{\mu_{3}5})$ ОУ стехиометрического избытка улавливаемыми над ценными фторсодержащими компонентами в аппаратах ВСУ обеих технологических линий требуется рассчитывать корректирующее управляющее воздействия на частоты вращения шнеков загрузки АУ. Для синтеза систем автоматической стабилизации коэффициентов стехиометрического избытка (Кизб) двух технологических линий формализация зависимости температуры реакционной требуется ЗОНЫ OT массового расхода фтора на входе АУ, что может быть достигнуто с помощью математической модели АУ.

3.2 Обзор существующих моделей аппаратов улавливания

Разработанные ранее модели АУ, представляют собой диффузионные пространственно-распределенные модели, имеющие следующий вид [15, 16, 21, 42,]:

74

$$\begin{cases} \varepsilon \cdot \frac{\partial X_{i}}{\partial t} = D_{_{3}\phi\phi} \cdot \frac{\partial^{2} X_{i}}{\partial l^{2}} - \frac{\partial (\upsilon_{_{\Gamma}} \cdot X_{i})}{\partial l} - W_{i}, \quad (i = \mathrm{HF}, \mathrm{F}_{2}, \mathrm{UF}_{6}), \\ c_{_{\mathrm{CHC}}} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{_{3}\phi\phi} \cdot \frac{\partial^{2} T}{\partial l^{2}} - \frac{\partial (q \cdot T)}{\partial l} + \sum_{i=1}^{3} \Delta H_{i} \cdot W_{i} \cdot C_{i0} - Z \cdot (T - T_{_{\mathrm{CT}}}), \\ c_{_{\mathrm{XI}}} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial t} = -c_{_{\mathrm{XI}}} \cdot \frac{\partial (\upsilon_{_{\mathrm{XI}}} \cdot \Theta)}{\partial l} + B \cdot (T_{_{\mathrm{CT}}} - \Theta), \\ c_{_{\mathrm{CHC}}} = (\varepsilon c_{_{\Gamma}} + \beta c_{_{\mathrm{TB}}}), \\ q = \varepsilon c_{_{\Gamma}} \upsilon_{_{\Gamma}} - \beta c_{_{\mathrm{TB}}} (\upsilon_{_{\mathrm{BHT}}} - \upsilon_{_{\Gamma}}), \\ Z = \frac{K_{_{\mathrm{T}}} F}{V_{_{\mathrm{P}}}}, \quad B = \frac{Z \cdot V_{_{\mathrm{P}}}}{c_{_{\mathrm{XII}}} \cdot V_{_{\mathrm{X}}}}. \end{cases}$$

$$(3.1)$$

где ε – объемная доля газа в реторте, об. доли; X_i – степень превращения (улавливания) *i*-го компонента, масс. доли; $D_{_{3}\phi\phi}$ – эффективный коэффициент диффузии, M^2/c ; l – высота АКТ, м; υ_r – скорость технологического газа в АУ, м/с; W_i – скорость превращения (улавливания) *i*-го компонента на ОУ, масс. доли/с; $c_r, c_{r_B}, c_{x_{\pi}}$ – объемные теплоемкости технологического газа, взвеси и хладагента, Дж/(M^3 ·K); β – степень заполнения реторты твердой фазой; $\lambda_{_{3}\phi\phi}$ – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(M·K); $\upsilon_{_{Burr}}$ – скорость витания твердофазных продуктов в АУ, м/с; ΔH_i – тепловой эффект *i*-ой реакции, Дж/(M^3 ·об. доли); C_{i0} – объемная доля *i*-го компонента, об. доли; *T*, T_{cr} , Θ – температура реакционной среды, стенки и хладагента, К; $\upsilon_{x_{\pi}}$ – скорость хладагента в контуре охлаждения, м/с; K_T – коэффициент теплопередачи через цилиндрическую стенку, Дж/(с·К·M²); *F* – площадь поверхности реторты, M^2 ; V_p и V_x – объем реторты и охлаждающей системы, M^3 ;

Кинетика процессов улавливания в модели (3.1) описывается уравнениями (3.2) [36].

$$W_{\rm HF} = 2,673 \cdot \left(0,74+0,016 \cdot C_{\rm HF}^{0}\right) \cdot e^{\frac{-7650}{RT}} \cdot \left(1-X_{\rm HF}\right),$$

$$W_{\rm F_{2}} = \left(3,53+0,0335 \cdot C_{\rm F_{2}}^{0}\right) \cdot e^{-\frac{5620}{RT}} \cdot \left(1-X_{\rm F_{2}}\right)^{1,306-0.01 \cdot C_{\rm F_{2}}^{0}},$$

$$W_{\rm UF_{6}} = \left(2,66+0,22 \cdot C_{\rm UF_{6}}^{0}\right) \cdot e^{-\frac{5733}{RT}} \cdot \left(1-X_{\rm UF_{6}}\right)^{1,111},$$

(3.2)

где C_i^0 – объемная концентрация *i*-го компонента в составе технологического газа на входе АУ, % об.

Проведение работ по синтезу системы автоматической стабилизации Кизб требует от разрабатываемой модели АУ чувствительности к изменению технологических параметров, таких как скорость газа, состав газа, степень заполнения взвесью аппарата, температуры реакционной зоны И Т.Д. (3.1)ориентирована Разработанная на грубую оценку степеней модель улавливания в различных технологических режимах, что подтверждается в ряде отклонениями результатов случаев существенными моделирования OT экспериментальных данных. На рисунке 3.2 приведен результат сопоставления экспериментальных данных полученных на опытно-промышленной установке АУ и результатов расчета на модели (3.2) при температуре 300 °С и скорости газа 15 см/с.



Рисунок 3.2 – Сравнение степеней улавливания полученных на экспериментальной установке и рассчитанных на математической модели

Приведенное среднее квадратическое отклонение экспериментальных

данных от результатов моделирования при улавливании F_2 HF UF₆ на ЗОУ составило 54,6, 5,7, 16,5 %, что является недостаточным для ее использования при синтезе систем автоматической стабилизации коэффициентов стехиометрического избытка ОУ над ценными фторсодержащими компонентами в аппаратах ВСУ обеих технологических линий.

3.3 Разработка модели аппарата улавливания

Единственным достоверным источником информации по кинетике химических реакций является натурный эксперимент. Наиболее полные экспериментальные исследования кинетики процессов улавливания F_2 , HF и UF₆ на ОУ приведены в работе Фролова [36].

Для обеспечения возможности использования результатов экспериментальных исследований Фролова, при моделировании АУ действующего ПГУ, были сформированы следующие требования к учету влияния различных факторов на результат моделирования:

– учет геометрии АУ;

 – учет влияния скорости технологического газа в реакционном пространстве на кинетику процессов улавливания;

- учет распределения температуры по высоте реакционного пространства;

– учет взаимного влияния процессов улавливания F_2 HF UF₆;

- учет гранулометрического состава ЗОУ;

- учет состава хвостового газа поступающего на улавливание;

– учет позонного охлаждения и обогрева вертикальной части АУ.

Таким образом, необходимо разработать новую математическую модель АУ, учитывающую вышеуказанные требования и описывающую с достаточной точностью экспериментальные данные полученные Фроловым на лабораторной установке [36].

3.3.1 Выбор структуры модели аппарата улавливания

Для реализации динамической пространственно-распределенной модели АУ возможно использовать несколько различных типов моделей: идеального вытеснения, ячеечную, диффузионную [43].

Описание процессов, протекающих в реакционной зоне АУ, с помощью модели идеального вытеснения предполагает принятие допущения о постоянстве объемного расхода технологического газа и взвеси в АУ. Проведенный анализ результатов исследования кинетики улавливания на лабораторной установке показал, что пренебрежение распределением объемного расхода газа и его температуры по высоте недопустимо, ввиду их существенного влияния на кинетику улавливания.

Использование модели основанной на уравнениях диффузии приводит к следующим проблемам:

 – сложность составления функции описывающей процессы позонного охлаждения и обогрева вертикальной части АУ;

- необходимость эмпирического определение коэффициента диффузии;

– ограничения на граничные и начальные условия, что затрудняет использование модели в пусковых режимах аппарата;

 невозможность ее использования совместно с цифровой системой управления построенной по принципу обратной связи.

 невозможность ограничения величин технологических параметров с целью сохранения их физического смысла.

Таким образом, решено отказаться от диффузионной структуры модели в пользу ячеечной (рисунок 3.3), позволяющей представить АУ по высоте в виде последовательности ячеек, каждая из которых описывается моделью идеального смешения.

Тогда задача моделирования АУ сводится к последовательному расчету ячеек модели в направлении движения технологического газа.



Рисунок 3.3 – Структурная схема ячеечной модели вертикальной части АУ

При разработке ячеечной модели АУ были приняты следующие допущения, согласующиеся с предъявляемыми требованиями:

– пренебрежение распределением параметров процесса улавливания по радиусу аппарата;

пренебрежение формой распределения температуры внутри стенки (линейный закон);

– диоксид и триоксид урана реагируют с F₂, HF и UF₆ пропорционально их содержанию в ЗОУ;

 составляющие взвеси твердофазных компонентов перемещаются только сверху вниз;

- составляющие технологического газа перемещаются только снизу наверх.

Принятое допущение о взаимодействии диоксида и триоксида урана с F_2 , HF и UF₆ пропорционально их содержанию в ЗОУ обосновано недостаточным количеством результатов экспериментальных исследований по улавливанию ценных компонентов на ОУ разного состава.

79

Каждая ячейка модели АУ описывается моделью идеального смешения, то есть принимается допущение о полном и мгновенном перемешивании поступающего в ячейку вещества с уже находящимся в ее объеме. Такое допущение позволяет описать процесс изменения концентрации *i*-го вещества внутри ячейки уравнением вида:

$$\frac{\mathrm{d}C_i}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{V_{\mathrm{sr}}} \left(\upsilon^{\mathrm{BX}} \cdot S^{\mathrm{BX}} \cdot C_i^{\mathrm{BX}} - \upsilon \cdot S \cdot C_i \right) + W_i^{\mathrm{KHH}}, \qquad (3.3)$$

где $C_i^{\text{вх}}, C_i$ – концентрации *i*-го вещества на входе и выходе ячейки, моль/м³; $V_{\text{яч}}$ – объем ячейки, м³;

 $v^{\text{вх}}$, v – скорости веществ на входе и выходе ячейки, м/с;

 $S^{\text{вх}}$, S – площади горизонтального сечения ячейки на входе и на выходе, м². $W_i^{\text{кин}}$ – скорость накопления *i*-го вещества в ячейке в результате химической реакции, моль/(м³ с);

С учетом того, что улавливание F_2 , НF и UF₆ на OУ описывается уравнениями (3.4) и принятых ранее допущений, была составлена система уравнений (3.5), описывающая изменение концентраций компонентов технологического газа и взвеси внутри ячейки при стационарных условиях по температуре [11].

$$UO_{2} + 4HF \rightarrow UF_{4} + 2H_{2}O,$$

$$UO_{3} + 2HF \rightarrow UO_{2}F_{2} + H_{2}O,$$

$$2UO_{3} + 2F_{2} \rightarrow 2UO_{2}F_{2} + O_{2},$$

$$UO_{2} + F_{2} \rightarrow UO_{2}F_{2},$$

$$UO_{2} + UF_{6} \rightarrow UO_{2}F_{2} + UF_{4},$$

$$2UO_{3} + UF_{6} \rightarrow 3UO_{2}F_{2}.$$
(3.4)

$$\begin{split} \frac{dC_{F_{5}}}{dt} &= \frac{1}{V_{sq}} \left(\upsilon_{r}^{sx} \cdot S^{sx} \cdot C_{F_{2}}^{sx} - \upsilon_{r} \cdot S \cdot C_{F_{2}} \right) - W_{F_{2}}^{UO_{2}} - W_{F_{2}}^{UO_{3}}, \\ \frac{dC_{UF_{6}}}{dt} &= \frac{1}{V_{sq}} \left(\upsilon_{r}^{sx} \cdot S^{sx} \cdot C_{UF_{6}}^{sx} - \upsilon_{r} \cdot S \cdot C_{UF_{6}} \right) - W_{UF_{6}}^{UO_{2}} - W_{UF_{6}}^{UO_{3}}, \\ \frac{dC_{O_{2}}}{dt} &= \frac{1}{V_{sq}} \cdot \left(\upsilon_{r}^{sx} \cdot S^{sx} \cdot C_{O_{2}}^{sx} - \upsilon_{r} \cdot S \cdot C_{O_{2}} \right) + \frac{W_{F_{2}}^{UO_{3}}}{2}, \\ \frac{dC_{H_{2}O}}{dt} &= \frac{1}{V_{sq}} \cdot \left(\upsilon_{r}^{sx} \cdot S^{sx} \cdot C_{O_{2}}^{sx} - \upsilon_{r} \cdot S \cdot C_{H_{2}O} \right) + \frac{W_{HF}^{UO_{2}} + W_{HF}^{UO_{3}}}{2}, \\ \frac{dC_{H_{2}O}}{dt} &= \frac{1}{V_{sq}} \cdot \left(\upsilon_{r}^{sx} \cdot S^{sx} \cdot C_{H_{2}O}^{sx} - \upsilon_{r} \cdot S \cdot C_{H_{2}O} \right) + \frac{W_{HF}^{UO_{2}} + W_{HF}^{UO_{3}}}{2}, \\ \frac{dC_{UO_{2}}}{dt} &= \frac{1}{V_{sq}} \cdot \left(\upsilon_{rs}^{sx} \cdot S \cdot C_{UO_{2}}^{sx} - \upsilon_{r} \cdot S \cdot C_{N_{2}} \right), \\ \frac{dC_{UO_{2}}}{dt} &= \frac{1}{V_{sq}} \left(\upsilon_{rs}^{sx} \cdot S \cdot C_{UO_{2}}^{sx} - \upsilon_{r} \cdot S \cdot C_{N_{2}} \right) - \frac{W_{HF}^{UO_{2}}}{4} - W_{F_{2}}^{UO_{2}} - W_{UF_{6}}^{UO_{2}}, \\ \frac{dC_{UO_{3}}}{dt} &= \frac{1}{V_{sq}} \left(\upsilon_{rs}^{sx} \cdot S \cdot C_{UO_{3}}^{sx} - \upsilon_{rs} \cdot S^{sx} \cdot C_{UO_{3}} \right) - \frac{W_{HF}^{UO_{3}}}{2} - W_{E_{2}}^{UO_{3}} - 2 \cdot W_{UF_{6}}^{UO_{3}}, \\ \frac{dC_{UO_{2}F_{3}}}{dt} &= \frac{1}{V_{sq}} \left(\upsilon_{rs}^{sx} \cdot S \cdot C_{UO_{3}}^{sx} - \upsilon_{rs} \cdot S^{sx} \cdot C_{UO_{3}} \right) - \frac{W_{HF}^{UO_{3}}}{2} - W_{F_{2}}^{UO_{3}} + W_{UF_{6}}^{UO_{3}}, \\ \frac{dC_{UO_{2}F_{5}}}{dt} &= \frac{1}{V_{sq}} \left(\upsilon_{rs}^{sx} \cdot S \cdot C_{UO_{2}F_{2}}^{sx} - \upsilon_{rs} \cdot S^{sx} \cdot C_{UO_{2}F_{2}} \right) + \frac{W_{HF}^{UO_{3}}}{2} + W_{F_{2}}^{UO_{3}} + W_{E_{2}}^{UO_{3}}, \\ \frac{dC_{UF_{4}}}}{dt} &= \frac{1}{V_{sq}} \left(\upsilon_{rs}^{sx} \cdot S \cdot C_{UF_{4}}^{sx} - \upsilon_{rs} \cdot S^{sx} \cdot C_{UO_{2}F_{2}} \right) + \frac{W_{HF}^{UO_{2}}}{4} + W_{UF_{6}}^{UO_{3}}, \\ \frac{dC_{UF_{4}}}}{dt} &= \frac{1}{V_{sq}} \left(\upsilon_{rs}^{sx} \cdot S \cdot C_{UF_{4}}^{sx} - \upsilon_{rs} \cdot S^{sx} \cdot C_{UF_{4}} \right) + \frac{W_{HF}^{UO_{2}}}{4} + W_{UF_{6}}^{UO_{3}}, \\ \end{array}$$

где

 v_{Γ}^{BX} , v_{Γ} – скорости технологического газа на входе и выходе ячейки, м/с;

 W_m^n – скорость притока *m*-того вещества в ячейку в результате химического взаимодействия *m*-того и *n*-того элементов, моль/(m^3 c);

 $v_{_{TB}}^{_{BX}}$, $v_{_{TB}}$ – скорости взвеси на входе и выходе ячейки, м/с.

3.3.2 Гидродинамика технологического процесса улавливания

Для нахождения составляющей модели АУ, описывающей скорость твердых частиц в вертикальной реторте, требуется проанализировать характер их взаимодействия с встречным потоком технологического газа.

Согласно источнику [44], характер движения взвеси мелкодисперсных частиц в большей мере определяется их геометрией, плотностью и скоростью движения встречного потока газа.

В случае малой скорости газа наблюдается свободное падение частиц. При достижении газом скорости, называемой скоростью псевдоожижения, частицы твердого образуют «кипящий слой» – по аналогии с прохождением газа через кипящую жидкость. А при скорости, называемой скоростью уноса, частицы твердого уносятся потоком газа вверх.

При обзоре литературы было выявлено множество эмпирических критериальных соотношений определяющих скорости начала псевдоожижения $\upsilon_{\text{тв}}^{\text{псевд}}$ и уноса $\upsilon_{\text{тв}}^{\text{уноса}}$ [45, 46, 47, 48, 49, 50]. Предпочтение было отдано методике, изложенной Овчинниковым [51], согласно которой, скорости псевдоожижения $\upsilon_{\text{тв}}^{\text{псевд}}$ и уноса $\upsilon_{\text{тв}}^{\text{уноса}}$ рассчитываются по следующим выражениям:

$$\upsilon_{\rm \tiny TB}^{\rm \tiny ICCBBJ} = \frac{{\rm Re}_{\rm \tiny Kp1} \cdot \mu_{\rm \tiny \Gamma}}{d_{\rm \tiny TB} \cdot \rho_{\rm \tiny \Gamma}}, \, \Gamma \exists e \, {\rm Re}_{\rm \tiny Kp1} = \frac{{\rm Ar}}{1400 + 5,22\sqrt{{\rm Ar}}}, \quad (3.6)$$

$$\upsilon_{\rm TB}^{\rm yhoca} = \frac{{\rm Re}_{{\rm kp2}} \cdot \mu_{\rm r}}{d_{{\rm TB}} \cdot \rho_{\rm r}}, \, {\rm гдe} \, {\rm Re}_{{\rm kp2}} = \frac{{\rm Ar}}{18 + 0.575 \sqrt{{\rm Ar}}},$$
(3.7)

где Ar – критерий Архимеда;

 $\rho_{\rm r}$ – плотность технологического газа, кг/м³;

*d*_{тв} – диаметр твердой частицы, м;

Критерий Архимеда определяется выражением (3.8).

$$\operatorname{Ar} = \frac{\left(d_{_{\mathrm{TB}}}\right)^{3} \cdot g \cdot \rho_{_{\mathrm{\Gamma}}} \cdot \left(\rho_{_{\mathrm{TB}}} - \rho_{_{\mathrm{\Gamma}}}\right)}{\left(\mu_{_{\mathrm{\Gamma}}}\right)^{2}},$$
(3.8)

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

 $ho_{_{\mathrm{TB}}}$ – плотность трердофазных компонентов взвеси, кг/м³;

 $\mu_{\rm r}$ – динамическая вязкость технологического газа, (H·c)/м².

Ситовый анализ ОУ, использованных в экспериментальных исследованиях на лабораторной установке, а также на действующей установке, показал, что диаметр частиц колеблется в диапазоне (5–300) мкм. Рассчитанные скорости газа, соответствующие началу псевдоожижения и уносу частиц для различных размеров частиц, приведены на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Зависимость скорости уноса и псевдоожижения от диаметра частиц

С учетом того, что скорость газа (υ_r) в АУ варьируется в диапазоне 0,02÷0,6 м/с, а диаметр преобладающей части твердых частиц равен 84 мкм, можно сделать вывод о том, что большинство частиц, двигаясь по реторте АУ, находятся в псевдоожиженном состоянии. Из графика 3.4 так же видно, что, находясь в псевдоожиженном состоянии, основная часть частиц не уносятся потоком газа.

Обзор методик расчета скорости осаждения взвеси выявил три принципиальных направления. Первое направление основано на определении скорости осаждения (отстаивания) твердых частиц в неподвижной среде [44, 49]. Данный подход не согласуется с условиями эксплуатации АУ, где газовая среда движется снизу наверх. Второй подход основан на расчете скорости движения твердых частиц в условиях пропускания газа через неподвижный слой твердых частиц [44, 47, 48]. Приложением данного подхода является расчет фильтров химической и пищевой промышленностей. Данный метод применим для существенных степеней заполнения, что отличается от режима работы АУ. Третий подход, используемый в дальнейшем, предполагает расчет скорости осаждения твердых частиц, находящихся в состоянии витания, как разность скорости уноса частиц и текущей скорости газа [50]:

$$\nu_{\rm TB} = \nu_{\rm TB}^{\gamma Hoca} - \nu_{\rm \Gamma}. \tag{3.9}$$

При моделировании гидродинамики вязкой ньютоновской жидкости принято использовать модель Навье-Стокса, представляющую собой систему двух уравнений в частных производных [48, 50]. Однако в рамках рассматриваемой задачи, предполагающей описание процессов алгебраическими и обыкновенными дифференциальными уравнениями, использование модели Навье-Стокса затруднительно.

Для решения практических задач при моделировании поведения ньютоновской жидкости широко применяются статические, эмпирические модели. Данные модели согласуются с моделью Навье-Стокса и позволяют рассчитывать потери давления на вертикальном участке высоты *h* по следующему выражению [44]:

$$\Delta p_{\rm pac4} = \Delta p_{\rm TP} + \Delta p_{\rm rudp.} + \Delta p_{\rm comp.seph.}, \qquad (3.10)$$

где ∆*p*_{сопр.зерн.} – потеря давления на трение с взвесью (сопротивление зернистого слоя), Па;

 $\Delta p_{\text{гидр.}} = \rho_{\text{г}} \cdot g \cdot h$ – гидростатический перепад давления, Па;

 $\Delta p_{\rm тp}$ – сопротивление, вызванное трением газа о стенку, Па.

Из выражения (3.10) видно, что при движении газа по вертикальной трубе происходит потеря давления, которая вызвана трением газа о стенки, сопротивлением зернистого слоя, а также гидростатическим перепадом давления.

Экспериментально доказано, что в псевдоожиженном состоянии частицы оказывают постоянное, не зависящее от скорости газа, сопротивление, определяемое весом частиц [44]:

$$\Delta p_{\text{conp.3eph.}} = \frac{m_{\text{тв}} \cdot g}{S_{\text{nonep}}},$$
(3.11)

где *m*_{тв} – масса взвешенных частиц твердого, кг;

 $S_{\text{попер}}$ – площадь горизонтального сечения АУ, м³.

Сопротивление, вызванное трением технологического газа о стенку АУ, рассчитывается по выражению (3.12).

$$\Delta p_{\rm rp} = \lambda \cdot \frac{h \cdot \rho_{\rm r} \cdot v_{\rm c}^2}{2 \cdot d_{\rm l}},\tag{3.12}$$

где λ –коэффициент гидравлического сопротивления, отн. ед.

 d_1 – диаметр реторты АУ, м²;

В условиях ламинарного движения газа (Re < 2300) по трубе коэффициент λ определяется только силами вязкости, а при турбулентном движении (Re > 2300) проявляется зависимость от шероховатости стенки:

$$\lambda = \begin{cases} \frac{64}{\text{Re}}, & \text{если Re} < 2300, \\ -2 \cdot \lg \left(\frac{\varepsilon}{3,7} + \left(\frac{64}{\text{Re}}\right)^{0,9}\right), & \text{если Re} > 2300, \end{cases}$$
(3.13)

где $\operatorname{Re} = \frac{\nu_{\Gamma} \cdot d_{1} \cdot \rho_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma}}$ – критерий Рейнольдса, отн. ед.;

$$\varepsilon = \frac{k}{\Delta}$$
 – относительная шероховатость стенок реторты АУ, отн. ед.;
 k – абсолютная шероховатость стенок реторты АУ;
 $\Delta = 1$ – высота выступов на стенке реторты АУ, мм.

Разница между текущим Δp_i и рассчитанным $\Delta p_{_{\mathrm{pacy}}}$ перепадами давления

на участке реторты АУ создает движущую силу, инициирующую движение технологического газа вплоть до установления перепада на рассматриваемом участке равном $\Delta p_{\text{расч}}$.

Как показали экспериментальные вычислительные исследования, использование статической модели (3.10) для описания скорости движения газа по высоте реторты сопряжено с снижением устойчивости решения системы уравнений описывающих ТП в АУ. Для устранения данного эффекта, было принято допущение об установлении рассчитанного давления $\Delta p_{\rm pac4}$ за период $\Delta t_{\rm ycr}$, равный 0,1 с. Тогда уравнение определяющее скорость газа, обеспечивающую выравнивание текущего Δp_i и рассчитанного $\Delta p_{\rm pac4}$ перепадов давления за период $\Delta t_{\rm ycr}$ будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{dp_i}{dt} = 3 \cdot \frac{\Delta p_{\text{pacy}} - \Delta p_i}{\Delta t_{\text{vcr}}}.$$
(3.14)

Скорость изменения давления в ячейке согласно закону Дальтона определяется скоростями изменения парциальных давлений. Динамику изменения парциальных давлений в ячейке описывает система уравнений (3.5), следовательно, $\frac{dp_i}{dt}$ описывается следующим выражением:

$$\frac{dp_i}{dt} = R \cdot T \cdot \left(\sum_j \frac{dC_j^{\text{BX}}}{dt} - \upsilon_{\Gamma} \cdot \frac{S}{V_{\text{gq}}} \cdot \sum_j C_i^{\text{TEK}} + \sum_j W_j^{\text{TEK}} \right) + R \cdot \frac{dT}{dt} \cdot \sum_j C_j^{\text{TEK}}, \quad (3.15)$$

где R = 8,31 – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К)

Т – температура технологического газа в *i*-ой ячейке, К;

$$\sum_{j} \frac{dC_{j}^{\text{вх}}}{dt}$$
 – суммарный молярны расход газовых компонентов приходящих

поступающих на вход *i*-ой ячейки, моль/с;

 $\sum_{j} C_{i}^{\text{тек}}$ – суммарная молярная концентрация газовых компонентов в *i*-ой

ячейке, моль/м³;

 $\sum_{j} W_{j}^{\text{тек}}$ – суммарная скорость образования газовых компонентов в *i*-ой ячейке в результате протекания химических реакций, моль/(м³ с);

Разрешая систему уравнений (3.14) и (3.15) относительно v_{r} , получаем выражение описывающее скорость газа ячейке:

$$\upsilon_{\Gamma} = \frac{\sum_{j} \frac{dC_{j}^{BX}}{dt} - \frac{3 \cdot \frac{\Delta p_{pacy} - \Delta p_{i}}{\Delta t_{ycr}} - R \cdot \frac{dT}{dt} \cdot \sum_{j} C_{j}^{TeK}}{R \cdot T}}{\frac{S}{V_{gy}} \cdot \sum_{j} C_{j}^{TeK} + \sum W_{i}^{TeK}}.$$
(3.16)

Текущий перепад давления Δ*p_i* на одной ячейке рассчитывался по выражению (3.17).

$$\Delta p_i = R \cdot T \sum_j C_j - R \cdot T^{\text{cneg}} \sum_j C_j^{\text{cneg}}, \qquad (3.17)$$

где $T^{\text{след}}$ – температура технологического газа в (*i*+1)-ой ячейке, К;

 $\sum_{j} C_{j}^{cлед}$ – суммарная молярная концентрация газовых компонентов в (*i*+1)-ой ячейке, моль/м³;

3.3.3 Кинетика технологического процесса улавливания ценных компонентов на закиси-окиси урана

При математическом описании кинетики химических реакций наибольшее распространение получил закон действующих масс [52, 53, 54]. Его суть заключается в том, что скорость химической реакции прямо пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ возведенных в степени их стехиометрических коэффициентов. Тогда, с учетом протекания реакции в прямом и обратном направлениях, выражение определяющее скорость реакции примет вид:

$$W = k_{\rm np} \cdot \left[C_{A1}\right]^{n_1} \cdot \dots \cdot \left[C_{Am}\right]^{n_m} - k_{\rm of} \cdot \left[C_{B1}\right]^{k_1} \cdot \dots \cdot \left[C_{B3}\right]^{k_z}, \qquad (3.18)$$

где k_{np} – константа скорости прямой химической реакции;

*С*_{*Ai*} – концентрация *i*-го исходного вещества;

n_i – стехиометрический коэффициент для *i*-го исходного вещества;

т – количество исходных веществ;

*k*_{об} – константа скорости обратной химической реакции;

С_{ві} – концентрация *і*-го продукта реакции;

k_i – стехиометрический коэффициент для *i*-го продукта реакции;

z – количество продуктов реакции.

Для гетерогенных химических реакций улавливания в уравнение (3.18) входят концентрации только тех веществ, которые находятся в газовой фазе. Концентрация вещества, находящегося в твердой фазе, обычно представляет собой постоянную величину и поэтому входит в константу скорости реакции.

Улавливание ценных компонентов технологического газа в аппаратах ПСУ происходит в результате их реакции с ЗОУ (U_3O_8), представляющей собой соединение диоксида и триоксида урана, где на один моль UO_2 приходится *n* молей UO_3 :

$$U_3 O_8 = UO_2 \cdot n UO_3 \tag{3.19}$$

Согласно принятых в п. 3.3.1 допущений, кинетика взаимодействия триоксида урана с фторсодержащими компонентами будет описываться выражением (3.20).

$$W_{\rm UO_2} = n \cdot W_{\rm UO_2} \tag{3.20}$$

В работе [36] показано, что процесс улавливания F_2 HF и UF₆ на ОУ происходят в несколько стадий, что существенно затрудняет аналитическое определение коэффициентов кинетического уравнения (3.18). Ввиду этого константы скоростей прямой и обратной реакций F_2 HF и UF₆ с ОУ определялись путем аппроксимации экспериментальных данных накопленных в работе [36] моделью (3.18).

Экспериментальные данные, полученные на лабораторной установке, содержат результаты исследования кинетики улавливания F_2 HF и UF₆ и их смеси на ОУ при следующих условиях:

– скорость технологического газа изменялась в пределах от 5 см/с до 20 см/с;

 объемная концентрация улавливаемых компонентов технологического газа на входе аппарата изменялась от 5 до 20 % об;

- стехиометрический избыток ОУ над улавливаемыми компонентами изменялся от 1 до 2;

 температура реакционной зоны АУ, поддерживаемая постоянной по высоте, изменялась от 250 до 400 °C;

 переменный состав ОУ. На один моль диоксида урана приходилось от 0,263 до 1,69 молей триоксида урана.

Проведенный анализ экспериментальных данных показал, что наибольше влияние на коэффициенты кинетического уравнения (3.18) оказывают: скорость газа, температура газа, концентрации твердофазных компонентов. Поэтому целью аппроксимации экспериментальных данных являлось описание коэффициентов $k_{\rm np}$, n_i , $k_{\rm o6}$ и k_i аналитическими выражениями являющихся функциями скорости газа, температура газа, концентрации твердофазных компонентов.

Результатом проведенных работ послужили выражения (3.21), определяющие зависимость скоростей химических реакций ОУ с ценными фторсодержащими компонентами от величин технологических параметров.

$$W_{\rm HF}^{\rm UO_2} = (206, 7 \cdot \upsilon_{\rm r}^{3} - 52, 86 \cdot \upsilon_{\rm r}^{2} + 6, 06 \cdot \upsilon_{\rm r} + 7 \cdot 10^{-4}) \cdot (2, 83 - 3 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\rm r}) \cdot e^{\frac{-C_{\rm F_{2}}^{0.3}}{-29 \cdot \upsilon_{\rm r} + 7, 43}}.$$

$$(3.21)$$

$$\cdot C_{\rm HF}^{(0,517 \cdot n_{\rm UO_{3}} + 1, 03)} \cdot C_{\rm UO_{2}}^{1/4} - (7, 2 - 0, 01 \cdot T_{\rm r}) \cdot (C_{\rm UF_{4}} + 10^{-3})^{1/3} \cdot C_{\rm H_{2}O}^{0.8} \cdot (-0, 77 \cdot n_{\rm UO_{3}} + 1, 41),$$

$$W_{\rm F_{2}}^{\rm UO_{2}} = (10^{-3} \cdot T_{\rm r} + 0, 277) \cdot (5, 29 \cdot \upsilon_{\rm r} - 0, 044) \cdot C_{\rm UO_{2}}^{0.05} \cdot C_{\rm F_{2}}^{1},$$

$$W_{\rm UF_{6}}^{\rm UO_{2}} = (1, 2 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\rm r}^{2} - 0, 01135 \cdot T_{\rm r} + 3, 315) \cdot C_{\rm UO_{2}}^{1/20} \cdot C_{\rm UF_{6}}^{1} \cdot e^{\frac{-C_{\rm F_{2}}^{0.3}}{(-0, 77 \cdot n_{\rm UO_{3}} + 1, 41)}.$$

Шаг моделирования по времени Δt определен исходя из условия преодоления газовыми и твердофазными компонентами, за период Δt , расстояния не большего, чем высота одной ячейки.

$$\Delta t = \frac{\Delta h}{\nu_{\text{max}}},\tag{3.22}$$

где Δh – высота ячейки, м;

*U*_{max} – максимальная скорость движения газовых и твердофазных
 компонентов, м/с.

С целью определения оптимального, с точки зрения точности описания экспериментальных данных, шага разбиения по высоте Δh , был проведен ряд экспериментов на математической модели (3.5). Осуществлялось сопоставление результатов моделирования и экспериментальных данных Фролова по улавливанию смеси F₂ HF и UF₆ на ОУ при различных шагах разбиения Δh . Для повышения достоверности исследований, сопоставление проводилось при различных скоростях и температурах технологического газа. На рисунке 3.5 приведена зависимость среднего квадратического отклонения (3.23) результатов моделирования от экспериментальных данных при температуре 350 °C.



Рисунок 3.5 – Зависимость среднего квадратического отклонения экспериментальных данных по кинетике улавливания F₂ HF и UF₆ от данных полученных на модели при различных шагах разбиения AУ на ячейки

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{3n} (X_{_{3KC\Pi}} - X_{_{MOR}})^2}{3 \cdot n - 1}},$$
(3.23)

где $X_{_{
m эксп}}, X_{_{
m мод}}$ – степени улавливания ценных компонентов достигнутые на лабораторной установе и полученные на модели, масс. доли;

n – число экспериментов проведенных на лабораторной установке.

Различия в характере зависимостей представленных на рисунке 3.5 затрудняет выбор оптимального шага разбиения по высоте Δh . Предложен комплексный критерий оценки точности описания экспериментальных данных моделью (3.21), определяемый выражением (3.24).

$$\Delta = \frac{\delta_{0,05} + \delta_{0,1} + \delta_{0,15} + \delta_{0,2}}{4} \tag{3.24}$$

где δ_i – среднее квадратическое отклонение экспериментальных данных по кинетике улавливания F₂ HF и UF₆ от данных полученных на модели при скорости газа равной *i*.

Из приведенной зависимости, представленной на рисунке 3.6 видно, что минимальное значение критерия Δ наблюдается при шаге разбиения Δh равном 0,20 м/с.



Рисунок 3.6 – Зависимость средней погрешности описания экспериментальных данных от величины шага разбиения АУ на ячейки

Максимальная погрешность описания экспериментальных данных моделью (3.21) составила менее 10 %, а средняя погрешность – 4 %. Достигнутый результат является приемлемым для использования модели при синтезе систем автоматической стабилизации коэффициентов стехиометрического избытка ОУ над ценными улавливаемыми компонентами в аппаратах ВСУ ПГУ.

3.3.4 Тепловые процессы

В разработанной кинетической модели процесса улавливания (3.21) принимались стационарные условия по температуре реакционной зоны. Данное допущение было приемлемо на этапе разработки модели (3.21) ввиду того, что равномерный профиль температуры по высоте лабораторной установки обеспечивала локальная САУ. На промышленной установке данное условие не соблюдается.

Профиль температуры по высоте и изменение его во времени является следствием неравномерного протекания химических реакций, теплообмена с позонными тепловыми контурами нагрева и охлаждения, а также взаимодействия взвеси с встречным потоком газа.

Для выбора способа описания теплообменных процессов между взвесью и технологическим газом были рассчитаны время нагрева газа (3.25) при неизменной температуре твердой фазы и время нагрева твердой фазы (3.26) при неизменной температуре газа [50]:

$$t_{\rm r} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \cdot \frac{c_{\rm r} \cdot \rho_{\rm r} \cdot d_{\rm mex}}{6 \cdot \alpha_{\rm mex}}, \qquad (3.25)$$

$$t_{\rm TB} = \frac{c_{\rm TB} \cdot \rho_{\rm TB} \cdot d_{\rm TB}}{6 \cdot \alpha_{\rm M^{0}K}}, \qquad (3.26)$$

где *є* – порозность ячейки, об. доли;

 $c_{\rm r}, c_{\rm тв}$ – удельные теплоемкости технологического газа и взвеси, Дж/(кг·К); $\alpha_{\rm меж} = \frac{\lambda_{\rm r} \cdot {\rm Nu}}{d_{\rm тв}}$ – коэффициент межфазного теплообмена, Вт/(м² К); λ_{Γ} – теплопроводность технологического газа, Дж/кг;

Nu = 0,01
$$\cdot \frac{\text{Re}}{\varepsilon} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}}$$
 – критерий Нуссельта;

$$\Pr = \frac{\mu_r \cdot c_r}{\lambda_r}, -$$
критерий Прандтля.

Рассчитав времена нагрева взвеси (t_{TB}) и газа (t_r) в условиях близким к режиму эксплуатации АУ получены следующие результаты: $t_{TB} = 40,6$ с и $t_r = 1,3$ с. Сопоставимость времени межкомпонентного выравнивания температур с временем нахождения взвеси в реторте, приводит к необходимости расчета как температуры газа, так и температуры взвеси.

Экзотермичность гетерогенных реакций улавливания протекающих на границе раздела фаз позволяет судить о том, что:

 теплообмен стенки реторты с реакционным пространством происходит преимущественно через технологический газ;

 приемником выделяющееся в результате химической реакции тепла является взвесь.

Тогда суммарное количество тепла, затрачиваемое на нагрев газа и взвеси в ячейке, определяется выражениями (3.27):

$$\begin{cases} \frac{dQ_{i}^{ra3}}{dt} = \frac{dQ_{i-1}^{ra3}}{dt} + \frac{dQ_{j}^{rr}}{dt} + \frac{dQ_{TB}^{ra3}}{dt}, \\ \frac{dQ_{i}^{TB}}{dt} = \frac{dQ_{i+1}^{TB}}{dt} + \frac{dQ_{x.p.}}{dt} - \frac{dQ_{TB}^{ra3}}{dt}, \end{cases}$$
(3.27)

где $\frac{\mathrm{d}Q_{i}^{_{\mathrm{ras}}}}{\mathrm{d}t}, \frac{\mathrm{d}Q_{i}^{_{\mathrm{rb}}}}{\mathrm{d}t}$ – скорости притока тепла, затрачиваемого на нагрев

технологического газа и взвеси в *i*-ой ячейке, Дж/с;

 $\frac{\mathrm{d}Q_{i-1}}{\mathrm{d}t}$ – скорость притока тепла от технологического газа приходящего из

нижестоящей ячейки, Дж/с;

$$\frac{dQ_{j}^{e^{T}}}{dt}$$
 – скорости притока тепла в ячейку от *j*-ого теплового контура, Дж/с;

$$\frac{\mathrm{d}Q^{_{\mathrm{TB}}}}{\mathrm{d}t}$$
 – скорости притока тепла от газа к взвеси, Дж/с

$$\frac{\mathrm{d}Q_{i+1}}{\mathrm{d}t}$$
 – скорость притока тепла от взвеси приходящей из вышестоящей

ячейки, Дж/с;

$$\frac{\mathrm{d}Q_{\mathrm{x.p.}}}{\mathrm{d}t}$$
 – тепловой эффект химических реакций улавливания, Дж/с

Опираясь на закон сохранения энергии для термодинамических систем, была сформирована система дифференциальных уравнений, описывающих изменение температур технологического газа и взвеси:

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}T_{_{\mathrm{T}}}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{c_{_{\mathrm{T}}} \cdot m_{_{\mathrm{T}}}} \cdot \frac{\mathrm{d}Q_{i}^{_{\mathrm{F}33}}}{\mathrm{d}t}, \\ \frac{\mathrm{d}T_{_{\mathrm{TB}}}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{c_{_{\mathrm{TB}}} \cdot m_{_{\mathrm{TB}}}} \cdot \frac{\mathrm{d}Q_{i}^{_{\mathrm{TB}}}}{\mathrm{d}t}, \end{cases}$$
(3.28)

где $T_{\rm r}, T_{\rm tb}$ – температуры газа и взвеси в реторте, К;

 $c_{_{\Gamma}}, c_{_{TB}}$ – удельные теплоемкости технологического газа и взвеси, Дж/(кг·К); $m_{_{\Gamma}}, m_{_{TB}}$ – массы технологического газа и взвеси, кг.

3.3.4.1 Теплообмен взвеси и технологического газа

Количество теплоты, передаваемое технологическому газу от взвеси определяется формулой (3.29) [44, 55, 54].

$$\frac{\mathrm{d}Q^{_{\mathrm{TB}}}}{\mathrm{d}t} = \alpha_{_{\mathrm{ME}\mathcal{H}}} \cdot S_{_{\mathrm{TEIII}}} \cdot (T_{_{\mathrm{TB}}} - T_{_{\mathrm{F}}}), \qquad (3.29)$$

где $S_{\text{тепл}}$ – площадь теплообмена взвеси и газа, м²;

Так как площадью теплообмена является поверхность твердых частиц, то величина $S_{\text{тепл}}$ определяется выражением (3.30):

$$S_{\text{TERLT}} = \frac{C_{\text{UO}_3} \cdot M_{\text{UO}_3} + C_{\text{UO}_2} \cdot M_{\text{UO}_2} + C_{\text{UO}_2\text{F}_2} \cdot M_{\text{UO}_2\text{F}_2} + C_{\text{UF}_4} \cdot M_{\text{UF}_4}}{\rho_{\text{TB}} \cdot d_{\text{TB}}}, \qquad (3.30)$$

где M_i – молярная масса *i*-го компонента, кг/моль.

3.3.4.2 Тепловой эффект химических реакций улавливания

Химические реакции улавливания (3.4) являются экзотермическими и сопровождаются выделением большого количества тепла. Тепловой эффект реакции оценивается с использованием интегральной формы закона Кирхгофа [56, 57, 58].

$$\Delta H_i^T = \Delta H_i^{298} + \int_{298}^{1} \Delta C_i^p dT, \qquad (3.31)$$

где ΔC_i^p – изменение молярной теплоемкости *i*-ой реакции, Дж/(моль·К); ΔH_i^{298} – тепловой эффект *i*-ой реакции при температуре 298 К, Дж/моль.

$$\Delta H_{i}^{298} = \sum V_{\rm npod} \Delta_{f} H_{\rm npod}^{298} - \sum V_{\rm ucx} \Delta_{f} H_{\rm ucx}^{298}, \qquad (3.32)$$

где $\Delta_f H_{\text{прод}}^{298}$ и $\Delta_f H_{\text{исх}}^{298}$ – теплоты образования продуктов реакции и исходных веществ, Дж/моль; $v_{\text{прод}}$ и $v_{\text{исх}}$ – стехиометрические коэффициенты продуктов реакции и исходных веществ.

Уравнение Кирхгофа (3.31) позволяет определить тепловой эффект, численно равный изменению теплоемкости в результате реакций улавливания (3.4) по выражению (3.33).

$$\Delta H = \sum V_{\text{прод}} C_{\text{прод}}^{p} - \sum V_{\text{исх}} C_{\text{исх}}^{p}, \qquad (3.33)$$

где $C_{\text{прод}}^{p}$ и $C_{\text{исх}}^{p}$ – молярные теплоемкости продуктов реакции и исходных веществ, Дж/(моль·К).

Эмпирически доказано, что молярные теплоемкость веществ является функцией температуры, и определяется выражением (3.34) с коэффициентами представленными в таблице 3.1 [59].

$$C_i(T) = a + \frac{b \cdot T}{1000} + \frac{c}{T^2}, \qquad (3.34)$$

где *а, b, с* – коэффициенты полиномиальной зависимости;

Таблица 3.1 – Коэффициенты выражений, описывающих теплоёмкости различных веществ в диапазоне температур от 300 до 1200°С.

Вещество	a	b	с
HF	26,9	3,43	1,09·10 ⁵
F ₂	34,56	2,51	$-3,51\cdot10^{5}$
UF ₆	151,04	5,44	$-20,38\cdot10^{5}$
H ₂ O	30	10,71	0,33.10 ⁵
O ₂	29,98	4,19	$-1,67 \cdot 10^5$
U ₃ O ₈	282,42	36,94	-49,96·10 ⁵
UO ₂ F ₂	104,17	44,59	$-10,38 \cdot 10^5$
UF ₄	107,53	29,29	$-0,25 \cdot 10^5$
N ₂	27,88	4,27	0
UO ₂	80,33	6,78	$-16,57\cdot10^{5}$

Коэффициенты уравнения (3.34) для триоксида урана в справочной информации отсутствуют. Ввиду этого, молярная теплоемкость триоксида урана, с учетом состава ЗОУ и известных молярных теплоемкостей триоксида и ЗОУ, определялась по выражению (3.35).

$$C_{\rm UO_3} = \frac{C_{\rm U_3O_8} - C_{\rm UO_2}}{2}.$$
 (3.35)

Тепловые эффекты реакции (3.4) рассчитанные по выражению (3.33), для диапазона температур от 300 до 1200°С, были аппроксимированы с погрешностью менее 0,1 % аналитическими выражениями (3.36).

$$\Delta H_{\text{UO}_{3}}^{\text{HF}}(T) = -0,0073 \cdot T^{2} + 8,436 \cdot T + 6,011 \cdot 10^{4},$$

$$\Delta H_{\text{UO}_{2}}^{\text{HF}}(T) = -2,158 \cdot 10^{-6} \cdot T^{3} + 0,002 \cdot T^{2} - 0,4341 \cdot T + 5,655 \cdot 10^{4},$$

$$\Delta H_{\text{UO}_{3}}^{\text{UF}_{6}}(T) = -3,442 \cdot 10^{4} \cdot e^{0,001T} + 4,02 \cdot 10^{5} \cdot e^{0,0001T},$$

$$\Delta H_{\text{UO}_{3}}^{\text{UF}_{6}}(T) = -1094 \cdot e^{0,002T} + 3,519 \cdot 10^{5} \cdot e^{-3,852 \cdot 10^{-5} \cdot T},$$

$$\Delta H_{\text{UO}_{3}}^{\text{F}_{2}}(T) = -2641 \cdot e^{0,0016T} + 4,256 \cdot 10^{5} \cdot e^{1,76 \cdot 10^{-5} \cdot T},$$

$$\Delta H_{\text{UO}_{2}}^{\text{F}_{2}}(T) = -5142 \cdot e^{0,001T} + 5,904 \cdot 10^{5} \cdot e^{5,699 \cdot 10^{-6} \cdot T}.$$
(3.36)

3.3.4.3 Теплообмен со смежными ячейками

Для расчета скорости притока тепла $\frac{dQ_{i-1}^{ras}}{dt}$ в *i*-ую ячейку из нижестоящей, было принято допущение о том, что приходящая порция газовой смеси мгновенно остывает до текущей температуры в *i*-ой ячейке. Тогда скорость притока тепла от приходящего из нижестоящей ячейки технологического газа двигающегося со скоростью $v_{r}^{\text{вх}}$ и остывающего с температуры $T_{\text{вх}}$ до T вычисляется по следующей формуле:

$$\frac{\mathrm{d}Q_{i-1}}{\mathrm{d}t} = \upsilon_{\mathrm{r}}^{\mathrm{BX}} \cdot S^{\mathrm{BX}} \cdot \sum_{j} C_{j}^{\mathrm{BX}} \cdot \left(H_{j}^{T_{\mathrm{BX}}} - H_{j}^{T}\right), \ j = \mathrm{HF}, \mathrm{F}_{2}, \mathrm{UF}_{6},$$
(3.37)

 $H_{i}^{T_{\text{mx}}}$, H_{i}^{T} –энтальпии одного моля *j*-го компонента технологического газа где при температурах $T_{\rm BX}$ и T, Дж;

Аналогичным образом было получено выражение (3.38) определяющее скорость притока тепла от приходящей из вышестоящей ячейки взвеси твердофазных компонентов двигающегося со скоростью $v_{_{\rm TB}}^{_{\rm BX}}$.

$$\frac{\mathrm{d}Q_{i+1}^{\mathrm{\tiny TB}}}{\mathrm{d}t} = \upsilon_{\mathrm{\tiny TB}}^{\mathrm{\tiny BX}} \cdot S \cdot \sum_{j} C_{j}^{\mathrm{\tiny BX}} \cdot \left(H_{j}^{T_{\mathrm{\tiny BX}}} - H_{j}^{T}\right), j = \mathrm{UO}_{2}, \mathrm{UO}_{3}, \mathrm{UO}_{2}\mathrm{F}_{2}, \mathrm{UF}_{4}$$
(3.38)

3.3.4.4 Теплообмен с контурами охлаждения и нагрева

По высоте реторты расположены 3 тепловых контура, обеспечивающих нагрев центральной и верхней зон и охлаждение нижней зоны реторты АУ. Поверх тепловых контуров расположен теплоизоляционный материал, ввиду чего теплообмен с цеховым пространством не рассматривался. Обогрев центральной и верхней зоны осуществляется с помощью ТЭН, что дает основание считать $\frac{\mathrm{d}Q_1^{\mathrm{cr}}}{\mathrm{d}t}, \frac{\mathrm{d}Q_2^{\mathrm{cr}}}{\mathrm{d}t}$ равных их мощности.

Нижний тепловой контур представляет собой водяную рубашку, обновление воды в которой происходит с расходом G_{волы}. Тогда, количество отводимого от реторты тепла $\frac{\mathrm{d}Q_3^{\mathrm{cr}}}{\mathrm{d}t}$ контуром охлаждения определяется теплопередачей через стенку аппарата.

При расчете теплопередачи через тонкостенные $\left(\frac{d_2}{d_1} \le 2\right)$ трубы пользуются выражением (3.39), где под параметром d^* подразумевается диаметр трубы, со стороны которой коэффициент теплоотдачи имеет меньшее значение [44, 60].

$$\frac{\mathrm{d}Q_3^{\mathrm{cr}}}{\mathrm{d}t} = K_{\mathrm{cr}} \cdot \pi \cdot d^* \cdot h \cdot (\Theta - T)$$
(3.39)

где K_{cr} – коэффициент теплопередачи через стенку цилиндра, Bt/(м·К);

d^{*} –диаметр теплообменной поверхности, м;

В случае теплообмена между водяной рубашкой и реакционным пространством, процесс лимитируется теплопередачей от стенки к технологическому газу, следовательно, параметр d^* равен внутреннему диаметру (d_1) реторты АУ. Коэффициент теплопередачи через стенку определялся по выражению (3.40) [44].

$$K_{\rm cr} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\rm pn}} + \frac{d_2 - d_1}{\lambda_{\rm cr}} + \frac{1}{\alpha_{\rm x}}},$$
(3.40)

где $\alpha_{\rm pn}$ – коэффициент теплоотдачи реакционного пространства, Вт/(м2·К); $\alpha_{\rm x}$ – коэффициент теплоотдачи хладагента, Вт/(м²·К); d_2 –внешний диаметр реторты АУ, м;

 $\lambda_{\rm cr}$ – теплопроводность стенки реторты АУ, Вт/(м·К);

Коэффициент теплообмена между потоком и стенкой противоточной реторты определяется по следующему выражению [44]:

$$\alpha_{\rm pn} = \frac{\lambda_{\rm r}}{d_{\rm 1}} \cdot \rm Nu_{\rm cr}, \qquad (3.41)$$

где Nu_{ст} – критерий Нуссельта, определяемый по выражению (3.42).

$$\operatorname{Nu}_{cr} = 2,15 \cdot \frac{\operatorname{Re}^{0,39}}{\left[\frac{\varepsilon^{3}}{\left(1-\varepsilon\right)^{2}}\right]^{0,61}}.$$
(3.42)

Коэффициент теплообмена между стенкой и хладагентом, движущимся с малой скоростью в кольцевом канале между двумя трубами, рассчитывается по выражению (3.43).

$$\alpha_{\rm x} = \frac{\lambda_{\rm x}}{d_2} \cdot {\rm Nu}_{\rm x}, \qquad (3.43)$$

где λ_x – теплопроводность хладагента, Дж/кг;

Nu_x – критерий Нуссельта.

Ввиду низкой скорости движения хладагента в нижнем тепловом контуре АУ рассматривалась теплопередача от стенки с хладагенту посредствам свободной конвекции. В этом случае критерий Нуссельта определяется выражением (3.44).

$$Nu_{x} = \begin{cases} 0,135 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/3}, Gr \cdot Pr > 2 \cdot 10^{7}, \\ 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/4}, Gr \cdot Pr > 2 \cdot 10^{7}, \end{cases}$$
(3.44)

где Gr – критерий Грасгофа, определяемы по выражению (3.45).

$$Gr = \frac{h^3 \cdot g \cdot \rho_x^2 \cdot \beta_x \cdot (T - \Theta)}{\mu_x^2}, \qquad (3.45)$$

где $\rho_{\rm x}$ – плотность хладагента, кг/м³;

 $\beta_{\rm x}$ – коэффициент объемного расширения теплоносителя или хладагента, К⁻¹;

 $\mu_{\rm x}$ – динамическая вязкость хладагента, Па·с;

Pr_x – критерий Прандтля, который находятся из соотношения:

$$\Pr_{x} = \frac{\mu_{x} \cdot c_{x}}{\lambda_{x}}, \qquad (3.46)$$

где c_x – теплоемкость хладагента, Дж/(кг·К);

Итогом работ послужила пространственно-распределенная ячеечная модель АУ описывающая гидродинамику, кинетику и термодинамику ТП протекающих в аппарате ВСУ. Математическое описание ячейки модели АУ представляет собой систему управления (3.47) [61].

$$\begin{cases} \frac{dC_{\text{HF}}}{dt} = \frac{1}{V_{\text{set}}} \left(v_{r}^{\text{ss}} \cdot S^{\text{ss}} \cdot C_{\text{HF}}^{\text{ss}} - v_{r} \cdot S \cdot C_{\text{HF}} \right) - W_{\text{HF}}^{\text{UO}_{1}} - W_{\text{HF}}^{\text{UO}_{1}} \\ \frac{dC_{\text{F}_{2}}}{dt} = \frac{1}{V_{\text{set}}} \left(v_{r}^{\text{ss}} \cdot S^{\text{ss}} \cdot C_{\frac{r_{s}}{2}}^{\text{ss}} - v_{r} \cdot S \cdot C_{\text{F}_{2}} \right) - W_{\text{U}_{2}}^{\text{UO}_{2}} - W_{\text{U}_{2}}^{\text{UO}_{2}} \\ \frac{dC_{\text{U}_{2}}}{dt} = \frac{1}{V_{\text{set}}} \left(v_{r}^{\text{ss}} \cdot S^{\text{ss}} \cdot C_{\frac{r_{s}}{2}}^{\text{ss}} - v_{r} \cdot S \cdot C_{\text{U}_{2}} \right) - W_{\text{U}_{2}}^{\text{UO}_{2}} - W_{\text{U}_{2}}^{\text{UO}_{2}} \\ \frac{dC_{\text{O}_{2}}}{dt} = \frac{1}{V_{\text{set}}} \left(v_{r}^{\text{ss}} \cdot S^{\text{ss}} \cdot C_{\frac{r_{s}}{2}}^{\text{ss}} + v_{r} \cdot S \cdot C_{\text{O}_{2}} \right) + \frac{W_{\text{H}}^{\text{UO}_{2}}}{2} \\ \frac{dC_{\text{H}_{10}}}{dt} = \frac{1}{V_{\text{set}}} \left(v_{r}^{\text{ss}} \cdot S^{\text{ss}} \cdot C_{\frac{r_{s}}{2}}^{\text{ss}} + v_{r} \cdot S \cdot C_{\text{H}_{2}} \right) + \frac{W_{\text{H}}^{\text{UO}_{2}}}{2} \\ \frac{dC_{\text{N}_{2}}}{dt} = \frac{1}{V_{\text{set}}} \left(v_{r}^{\text{ss}} \cdot S^{\text{ss}} \cdot C_{\frac{r_{s}}{2}}^{\text{ss}} + v_{r} \cdot S \cdot C_{\text{N}_{2}} \right) \\ \frac{dC_{\text{UO}_{2}}}{dt} = \frac{1}{V_{\text{set}}} \left(v_{r}^{\text{ss}} \cdot S \cdot S^{\text{cs}} - v_{1s} \cdot S \cdot S \cdot C_{\text{N}_{2}} \right) \\ \frac{dC_{\text{UO}_{2}}}{dt} = \frac{1}{V_{\text{set}}} \left(v_{r}^{\text{ss}} \cdot S \cdot C_{\frac{r_{N}}{2}} - v_{1s} \cdot S \cdot S \cdot C_{\text{U}_{2}} \right) - \frac{W_{\text{H}}^{\text{UO}_{2}}}{2} - W_{\text{H}}^{\text{UO}_{2}} - W_{\text{U}_{0}}^{\text{UO}_{2}} \\ \frac{dC_{\text{UO}_{2}}}{dt} = \frac{1}{V_{\text{set}}} \left(v_{r}^{\text{ss}} \cdot S \cdot C_{\frac{r_{N}}{2}} - v_{1s} \cdot S \cdot S \cdot C_{\text{U}_{2}} \right) - \frac{W_{\text{H}}^{\text{UO}_{2}}}{2} - W_{\text{H}}^{\text{UO}_{2}} - W_{\text{U}_{0}}^{\text{UO}_{2}} \\ \frac{dC_{\text{U}_{2}}}{dt} = \frac{1}{V_{\text{set}}} \left(v_{r}^{\text{ss}} \cdot S \cdot C_{\frac{r_{U}}{2}} - v_{1s} \cdot S \cdot S \cdot C_{\text{U}_{2}} \right) - \frac{W_{\text{H}}^{\text{UO}_{2}}}{2} - W_{\text{H}}^{\text{UO}_{2}} - 2 \cdot W_{\text{U}_{0}}^{\text{U}_{2}} \\ \frac{dC_{\text{U}}}{dt} + \frac{1}{V_{\text{set}}} \left(v_{r}^{\text{ss}} \cdot S \cdot C_{\frac{U}_{2}} - v_{1s} \cdot S \cdot S \cdot C_{\text{U}_{2}} \right) + \frac{W_{10}^{\text{U}_{2}}}{2} + W_{\text{H}}^{\text{U}_{2}} + W_{\text{H}}^{\text{U}_{2}} + 3 \cdot W_{\text{U}_{0}}^{\text{UO}_{2}} \\ \frac{dC_{\text{U}}}}{dt} + \frac{1}{V_{\text{ss}}} \left(\frac{dC_{\text{U}}}{r_{1}} + \frac{dQ_{\text{c}}^{\text{cr}}}{dt} + \frac{dQ_{2}^{\text{cr}}}{dt} + \frac{dQ_{1}^{\text{cr}}}{dt} \right) \\ \frac{dC_{1}}}{dt} = \frac{1}{V_{\text$$

где m_x – 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;

3.3.5 Проверка адекватности математической модели аппарата улавливания

Проверка адекватности разработанной модели АУ производилась путем сопоставления результатов моделирования с производственными данными СЗ СХК при прочих равных условиях. При этом сопоставлялись температуры в трех точках (T_4 , T_5 , T_6), соответствующих расположению датчиков по высоте вертикальной реторты.

Необходимым условием для моделирования АУ в производственных условиях является достоверное измерение состава технологического газа и величины загрузки ЗОУ. Существующие средства контроля параметров ТП ПГУ не обеспечивают определение состава газа, что потребовало его восстановления с помощью разработанной в подразделе 2.1 динамической модели ПГУ и результатов прямых измерений расхода технического фтора и частоты вращения шнека загрузки ПР. Результаты сопоставления температур рассчитанных на модели (3.47) и полученных из производственных данных приведены на рисунке 3.7.

Для проверки адекватности модели АУ рассчитывалось среднеквадратическое отклонение для температур каждой из зон, измеренных на реальном производстве и рассчитанных по модели (3.47). На интервале времени 5,5 ч отклонение составило для температуры T_4 19 °C или 7,8 %, приведенное к среднему значению (245 °C), для T_5 – 29 °C или 5,6 %, приведенное к среднему значению (522 °C), для T_6 – 21 °C или 5,2 %, приведенное к среднему значению (410 °C).

Аналогично выше описанному способу были обработаны еще 4 участка производственных данных, результаты исследований сведены в таблицу 3.2.

Достигнутая точность описания составленной моделью АУ производственных данных по температурам реакционной зоны составила менее 10 % (таблица 3.2), что является достаточным для использования модели (3.47) при синтезе систем автоматической стабилизации коэффициентов





Таблица 3.2 – Сводные данные о результатах сравнения значений температур реакционных зон АУ, рассчитанных в модели и выбранных из производственных данных

Номер эксперимента -	Приведенное с среднему среднее квадратическое отклонение			
	данных полученных на модели от производственных данных, %			
	T_4	T_5	T_6	
1	7,8	5,6	5,2	
2	3,2	6,5	2,2	
3	1,7	3,5	7,0	
4	4,5	5,1	4,7	
5	5,9	4,3	2,8	
Среднее	4,6	5,0	4,4	

стехиометрического избытка ОУ над ценными улавливаемыми компонентами в аппаратах ВСУ каждой из двух технологических линий.

3.4 Синтез системы автоматической стабилизации коэффициента стехиометрического избытка

Основное возмущение в ТП улавливания ценных компонентов из хвостового газа в аппарат ВСУ вносит нестабильность массового расхода фтора на выходе ПР. Это влечет за собой изменение коэффициента стехиометрического избытка ($K_{из6}$) в аппарате ВСУ, снижая тем самым степень улавливания фторсодержащих компонентов. Причиной этого, как правило, являются просыпь шнекового питателя ПР, изменение состава технического фтора, либо изменение степени фторирования полупродукта поступающего из бункера загрузки ПР. Все перечисленные факторы могут носить как инерционный, так и ступенчатый характер.

С целью оценки влияния изменения массового расхода фтора на входе АУ на коэффициент $K_{\mu_{35}}$ были произведены вычислительные экспериментальные исследования на модели (3.47), заключающиеся в анализе реакции АУ на импульсное изменение количества фтора на выходе ПР (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – График изменения коэффициента стехиометрического избытка в оксидной и тетрафторидной линиях при трехминутном импульсном изменении расхода технического фтора на выходе ПР

Из данных представленных на рисунке 3.8 видно, что при изменении концентрации фтора в технологическом газе на выходе ПР с 10 % об. до 20 % об. избыток ОУ ($K_{изб}$) на обеих технологических линиях уменьшается с 1,66 до 1,11. Единственным доступным способом компенсации вносимого возмущения является коррекция частоты вращения шнека загрузки АУ пропорционально изменению массового расхода фтора на входе аппарата. Однако существующие на C3 СХК средства контроля параметров ТП не позволяют измерять количество фтора поступающего на стадию улавливания, ввиду чего были проведены работы по поиску измеряемых технологических переменных, косвенно оценивающих количество фтора на входе АУ.

Повышение количества фтора в хвостовом газе оказывает влияние на кинетику улавливания, что проявляется в изменении температурного профиля по высоте аппарата. На рисунке 3.9 изображены реакции расхода фтора на входе АУ и показаний термопар (T_4 , T_5 , T_6) на импульсное изменение расхода фтора на выходе ПР.



Рисунок 3.9 – Реакция расхода фтора на входе АУ и показаний термопар, установленных по высоте аппарата, на импульсное изменение расхода фтора на выходе ПР

Из данных, приведенных на рисунке 3.9, видно, что изменение количества фтора на входе АУ с малой инерционностью отражается на показаниях термопар T_4 , T_5 и T_6 , причем наибольшая чувствительность проявляется через температуру T_5 .

Исходя из этого, а также в результате анализа проведенного в первой главе, было принято решение включить в состав АСУ ТП ПГУ систему автоматической стабилизации *К*_{изб} структурная схема которой представлена на рисунке 3.10.



*T*_{уст} – уставка системы автоматической стабилизации *K*_{изб}, °C; Δ*N*^{AДУ}_{осн} – корректирующее управляющее воздействие на шнек загрузки аппарата BCУ рассчитываемое системой автоматической стабилизации *K*_{изб}, об/мин; *T*^{AДУ} – температура реакционной зоны аппарата BCУ, °C Рисунок 3.10 – Структурная схема системы автоматической стабилизации

коэффициента стехиометрического избытка ОУ над ценными улавливаемыми

компонентами хвостового газа в аппарате ВСУ

3.4.1 Алгоритм функционирования системы автоматической стабилизации коэффициента стехиометрического избытка

Как уже описывалось в первой главе, условиями выбора управляющего воздействия на шнек загрузки аппарата ВСУ являются:

 обеспечение согласованности загрузок твердофазных компонентов в аппараты оксидной и тетрафторидной технологических линий;

 обеспечение максимального улавливания ценных компонентов из хвостового газа.

Лимитирующим фактором, влияющим на качество улавливания ценных компонентов из хвостового газа, является величина создаваемого стехиометрического избытка $K_{изб}$ ОУ над F_2 , НF и UF₆ поступающих на вход аппарата ПСУ. Однако требование к согласованности загрузок твердофазных компонентов в аппараты фторирования и улавливания двух технологических линий, исключает возможность стабилизации значения $K_{изб}$ на определенном заданном уровне.

Компромиссным вариантом, отвечающим предъявленным требованиям к выбору управляющего воздействия на шнек загрузки аппарата ВСУ, является организация следящей системы управления, где в качестве уставки выступает текущее сглаженное значение температуры реакционной зоны.

В качестве алгоритма сглаживания использовалась формула экспоненциального сглаживания [62, 63]:

$$U_{k} = \alpha_{T_{5}} X_{k} + (1 - \alpha_{T_{5}}) U_{k-1}, \qquad (3.48)$$

где *U_k*, *U_{k-1}* – текущий и предыдущий результаты фильтрации;

 α_{T_5} –безразмерный коэффициент сглаживания;

X_k – текущий результат измерения.

Коэффициент сглаживания определялся по выражению (3.49).

$$\alpha_{T_5} = 1 - e^{-\frac{\Delta t_{auc}}{T_{cra6}}},$$
(3.49)

где $\Delta t_{\text{пис}}$ – шаг дискретизации измерения T_5 , с;

 $T_{\rm cra6}$ – постоянная времени фильтра, с.

С целью минимизации взаимного влияния системы автоматической стабилизации $K_{\rm изб}$ и автоматизированной системы согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты ПГУ постоянная времени $T_{\rm стаб}$, была выбрана равной 10 % от минимального времени переходного процесса выявленного в подразделе 2.5 [64, 65].

Пример расчета уставки (T_{ycr}) системы автоматической стабилизации K_{usb} по производственным данным температуры T_5 приведен на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – Сравнение производственных данных температуры T_5 и рассчитываемой уставки ($T_{\rm vcr}$) системы автоматической стабилизации $K_{\rm изб}$

3.4.2 Параметрический синтез регулятора системы автоматической стабилизации коэффициента стехиометрического избытка

Представленные на рисунке 3.9 результаты исследований подтверждают чувствительность температуры реакционной зоны к массовому расходу фтора, поступающему в АУ, а низкая инерционность зависимости температуры реакционной зоны от массового расхода фтора на входе АУ доказывает достаточность использования пропорционального закона регулирования в системах автоматической стабилизации $K_{\rm из6}$ в аппаратах ВСУ двух технологических линий.

Для параметрического синтеза регулятора системы автоматической стабилизации $K_{\mu_{35}}$ требуется аналитическое определение зависимости температуры реакционной зоны от массового расхода фтора на входе АУ, с целью чего были проведены вычислительные экспериментальные исследования на

107

компьютерной модели АУ (3.47), результаты которых приведены на рисунках 3.12÷3.13.







Рисунок 3.13 – Зависимость показаний температур *T*₄, *T*₅ и *T*₆ рассчитанных на модели от расхода фтора на входе АУ тетрафторидной линии
Результаты экспериментов для оксидной линии (рисунок 3.12) подтверждают линейную зависимость температур T_4 , T_5 , T_6 от массового расхода фтора (G_{F2}) на входе АУ, приведенного к регламентному диапазону изменения. Наибольшая корреляция G_{F2} , в приращениях, прослеживается с температурой T_5 , что делает управление по температуре T_5 более предпочтительным.

При исследовании тетрафторидной линии (рисунок 3.13) выявлено, что изменение G_{F2} оказывает наибольшее влияние на температуры нижней (T_4) и центральной (T_5) зон аппарата ВСУ. Датчик температуры T_4 расположен вблизи стыковки вертикальной и горизонтальных частей АУ, что создает условия сильной зависимости показаний датчика от условий эксплуатации ГЧ АУ. Таким образом, стабилизацию $K_{из6}$ в аппаратах ВСУ оксидной и тетрафторидной линий целесообразно производить по температуре T_5 .

Выявленные зависимости T_5 от G_{F2} для оксидной и тетрафторидной линий были описаны выражениями (3.50) и (3.51) с погрешностью менее 0,2 %.

$$T_5 = 175, 5 + 1, 2 \cdot G_{\rm E}. \tag{3.50}$$

$$T_5 = 158, 1 + 0, 45 \cdot G_{\rm E_5}. \tag{3.51}$$

Изменение массового расхода фтора на входе АУ приводит к отклонению $K_{\rm изб}$ относительно величины, определяемой автоматизированной системой согласования загрузок в аппараты ПГУ. С учетом того, что взаимодействие ОУ с фтором описывается уравнениями (3.4), корректирующее воздействие $\Delta N_{\rm och}^{\rm AY}$ рассчитывается по формуле (3.52).

$$\Delta N_{\rm och}^{\rm AV} = \frac{1}{60 \cdot k_{\rm rpaq}^{\rm AV}} \cdot \frac{1}{1+n} \cdot \frac{M_{\rm F_2}}{M_{\rm UO_2} + n \cdot M_{\rm UO_3}} \cdot \Delta m_{\rm F2}, \qquad (3.52)$$

где $k_{\text{град}}^{\text{АУ}}$ – градуировочный коэффициент шнека загрузки АУ, кг/об.

Выражая из (3.50) (3.51) зависимость приращения массового расхода фтора G_{F2} от приращения температуры T_5 и подставив ее в выражение (3.52), получаем формулы расчета управляющих воздействий регуляторов систем автоматической стабилизации $K_{\mu_{35}}$ оксидной и тетрафторидной линий:

$$\Delta N_{\rm och}^{\rm AV-1-2} = \frac{1}{60 \cdot k_{\rm rpag}^{\rm AV}} \cdot \frac{1}{1+n} \cdot \frac{M_{\rm F_2}}{M_{\rm UO_2} + n \cdot M_{\rm UO_3}} \cdot \frac{1}{1,2} \cdot \Delta T_5^{\rm AV-1-2}.$$
(3.53)

$$\Delta N_{\rm och}^{\rm AY-2-2} = \frac{1}{60 \cdot k_{\rm rpag}^{\rm AY}} \cdot \frac{1}{1+n} \cdot \frac{M_{\rm F_2}}{M_{\rm UO_2} + n \cdot M_{\rm UO_3}} \cdot \frac{1}{0,45} \cdot \Delta T_5^{\rm AY-2-2}.$$
(3.54)

3.5 Анализ эффективности системы автоматической стабилизации коэффициента стехиометрического избытка

Анализ работоспособности разработанной системы автоматической стабилизации коэффициента стехиометрического избытка проводился путем вычислительных экспериментальных исследований на компьютерной модели АУ. При этом величины загрузки ЗОУ определялись выражениями (3.53) и (3.54). Результаты моделирования приведены на рисунках 3.14÷3.15.



Рисунок 3.14 – График изменения коэффициента стехиометрического избытка в аппарате ВСУ оксидной линии при трехминутном импульсном изменении расхода технического фтора на выходе ПР



Рисунок 3.15 – График изменения коэффициента стехиометрического избытка в аппарате ВСУ тетрафторидной линии при трехминутном импульсном изменении расхода технического фтора на выходе ПР

Сопоставляя динамику изменения коэффициента $K_{\mu_{36}}$ в условиях наличия и отсутствия системы автоматической стабилизации (рисунки 3.14÷3.15), можно сделать вывод о том, что в случае использования САУ существенно снижается отклонение $K_{\mu_{36}}$ от требуемого значения: в оксидном аппарате ВСУ с 0,57 до 0,27 (на 53 %); в тетрафторидном аппарате ВСУ с 0,53 до 0,15 (на 72 %).

Указанный эффект достигается за счет изменения частот вращения шнеков загрузки аппаратов ВСУ обеих технологических линий, временные характеристики которых представлены на рисунке 3.16.

Из приведенных на рисунке 3.16 данных видно, что рассчитываемые управляющие воздействия на шнеки загрузки аппаратов ВСУ близки к требуемым по стехиометрии, расчет которых производился по формуле (3.52), используя разницу первоначального и текущего массовых расходов фтора на входе аппаратов ВСУ. Реализация алгоритма функционирования системы

111



а) аппарат ВСУ оксидной технологической линии; б) аппарат ВСУ тетрафторидной технологической линии Рисунок 3.16 – Временные характеристики рассчитанного системой автоматической стабилизации $K_{\rm изб}$ и требуемого по стехиометрии управляющих воздействий на шнеки загрузки аппаратов ВСУ

автоматической стабилизации Кизб на основе фильтрации текущего измеренного значения T₅ позволила обеспечивать цель управления с учетом минимизации влияния последствий регулирования (изменения количества накопленного полупродукта в узле выгрузки аппарата ВСУ) на автоматизированную систему согласования загрузок в аппараты двух технологических линий. В качестве подтверждения минимального взаимного влияния систем автоматической стабилизации К_{изб} и автоматизированной системы согласования загрузок в аппараты ПГУ были рассчитаны различия количестве накопленного В полупродукта в узлах выгрузки аппаратов ВСУ с системой автоматической стабилизации Кизб и без нее. За период переходного процесса (30 минут), использование системы автоматической стабилизации Кизб привело к увеличению количества накопленного полупродукта на 3,1 % в оксидной линии и 1,2 % в

112

тетрафторидной. Незначительные изменения в количестве накопленного полупродукта свидетельствуют о низком взаимном влиянии автоматизированной системы согласования загрузок, разработанной в разделе 2, и системы автоматической стабилизации *К*_{изб.}

Проведенные исследования доказывают, что ввод в состав САУ ПГУ систем автоматической стабилизации $K_{\mu_{35}}$ позволяет за счет коррекции массового расхода ЗОУ в аппаратах ВСУ, рассчитанных по рассогласованию сглаженного и текущего измеренного значения температуры $T_{5,}$ сократить потери F₂, HF и UF₆ на обеих технологических линиях, не нарушая согласованность в загрузках твердофазных компонентов в аппараты ПГУ.

3.6 Выводы по главе

Для синтеза систем автоматической стабилизации стехиометрических коэффициентов избытка ОУ над ценными улавливаемыми в аппаратах ВСУ компонентами требуется формализация зависимости температуры реакционной зоны от массового расхода фтора на входе АУ. С этой целью была разработана динамическая пространственно-распределенная модель АУ.

Гидродинамический режим взаимодействия технологического газа и взвеси твердофазных продуктов оказывает существенное влияние на процесс улавливания. Проведенные исследования доказали, что преобладающая часть твердофазных частиц в аппаратах ВСУ оксидной и тетрафторидной линий находятся в псевдоожиженном 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 %.

Исследование термодинамики химических реакций улавливания позволило выявить функциональную зависимость тепловых эффектов реакций от температуры реакционной зоны и состава газа, поступающего на улавливание.

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.

Проверка адекватности модели АУ действующей установке проводилась путем расчета приведенного среднеквадратического отклонения рассчитываемых по модели и измеренных на АУ температур реакционной зоны на высотах установки термопар 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 температуры каждой из контролируемых зон погрешности адекватности, рассчитанные на пяти интервалах времени, не превысили 5 %.

Путем экспериментальных исследований на модели АУ были выявлены зависимости температур реакционной зоны аппаратов ВСУ двух технологических линий от массового расхода фтора на их входе, на основе которых были разработаны автоматической стабилизации коэффициентов системы стехиометрического избытка $(K_{\mu_{3}6})$ ОУ над ценными улавливаемыми компонентами оксидной и тетрафторидной линий.

Анализ эффективности систем автоматической стабилизации $K_{\mu_{36}}$ производился путем вычислительных экспериментальных исследованиях на модели АУ. Проведенные исследования доказали, что в случае нестабильности массового расхода фтора на входе аппаратов ВСУ, использование предлагаемых систем управления существенно снижает отклонение коэффициентов $K_{\mu_{36}}$ от

114

требуемых значений: в оксидном аппарате ВСУ на 53 %; а в тетрафторидном аппарате ВСУ на 72 %. Достигнутый результат свидетельствует о повышении эффективности улавливания ценных компонентов из хвостового газа и целесообразности внедрения систем автоматической стабилизации коэффициентов стехиометрического избытка ОУ над ценными улавливаемыми компонентами хвостового газа двух технологических линий ПГУ на C3 СХК.

4 Система автоматического управления пламенным реактором

4.1 Оценка качества работы исходной САУ пламенным реактором

Оценку качества работы САУ на действующем производстве осуществляют при помощи статистических характеристик. Основными статистическими оценками качества работы САУ служат среднее квадратичное отклонение регулируемой величины от ее математического ожидания (σ) и смещение математического ожидания регулируемой величины от уставки САУ [66, 62, 67].

Регламент работ по ведению процесса фторирования на C3 CXK предполагает поддержание концентрации фтора на выходе ПР в диапазоне 5÷15 % об.

Вероятность того, что разность между случайной, величиной распределенной по нормальному закону, и ее математическим ожиданием по абсолютной величине превысит 2,58 σ , менее 1 % [68, 62, 67]. Для того, чтобы, при уставке САУ ПР равной 10 % об., управляемая координата не выходила за регламентный диапазон, максимальное отклонение концентрации фтора на выходе ПР от уставки не должно превышать 5 % об. Следовательно, в качестве требования к САУ ПР выступает удержание среднего квадратического отклонения концентрации фтора на выходе ПР σ_C в диапазоне 0÷1,94 % об.

Анализ эффективности разработанной ранее САУ ПР выявил недостаточное качество управления ПР, что подтверждается регулярным превышением параметра σ_C допустимого диапазона. Так, например, 15.06.2012 г. на временном участке с 00:00 до 14:00 среднее квадратичное отклонение концентрации фтора составило 4,04 % об. (рисунок 4.1).

Аналогичные исследования были проведены на других участках производственных данных, результаты сведены в таблицу 4.1.

Нестабильность концентрации фтора на выходе ПР вносит дополнительные возмущения в процессы фильтрации газа, и улавливания ценных компонентов, что приводит к снижению эффективности всего ПГУ.



Таблица 4.1 – Результаты анализа качества работы исходной САУ ПР

№ п/п	Дата	σ _{<i>C</i>,} % об
1	10.05.2011	3,70
2	15.06.2011	4,04
3	12.08.2011	4,51
4	21.08.2011	2,33
5	03.09.2011	2,81

Анализ причин недостаточного качества управления исходной САУ ТП протекающими в ПР выявил следующие факторы:

а) Технологические:

 неоднородность физико-химических и механических характеристик полупродукта, загружаемого в ПР;

- нестабильностью разряжения на хвосте схемы;

- нестабильность расхода технического фтора на входе ПР;

б) Приборные:

нестабильность калибровочных коэффициентов масс-спектрометра при измерении концентрации фтора;

– нестабильность градуировочных характеристик шнеков загрузки ПР и АУ.

в) Недостаточное качество управления, обеспечиваемое САУ ПР, и не обновляемая нормативно-справочная информация в действующих условиях работы производства:

 отсутствие прямого канала компенсации влияния нестабильности расхода технического фтора на концентрацию фтора на выходе ПР;

отсутствие алгоритма адаптации параметров настроек регулятора САУ
 ПР к нестабильности параметров модели ПР;

- завышенный цикл управления САУ ПР, равный 10 с;

– отсутствие систем автоматического управления шнеками загрузки аппаратов первой и второй ступеней улавливания двух технологических линий.

Для решения указанных проблем были проведены работы по модернизации исходной САУ ПР:

 модернизирован существующий алгоритм адаптации параметров регулятора к изменяющемуся коэффициенту передачи модели ПР;

– разработан алгоритм определения величины запаздывания и постоянной времени модели ПР, используемых в алгоритме адаптации параметров регулятора САУ ПР;

 модернизирован контур компенсации влияния нестабильности расхода технического фтора на концентрацию фтора на выходе ПР;

– изменен цикл управления САУ ПР с 10 с на 2 с.

 проведена замена в ПИД-законе управления контура стабилизации концентрации фтора на выходе ПР дифференцирующего звена на инерционнодифференцирующее;

Структурная схема САУ ПР, включающая контура стабилизации по отклонению концентрации фтора и компенсации влияния изменения расхода технического фтора, а также алгоритм адаптации параметров настройки регуляторов САУ ПР к изменяющимся параметрам модели ПР приведена на рисунке 4.2 [69, 70, 71, 72, 73].



 W_{R} – ПИД-регулятор контура стабилизации; $W_{\Pi P}^{f}$, $W_{\Pi P}^{u}$ – модели ПР по каналам возмущения и управления; W_{K} – П-регулятор контура компенсации; $C_{F_{2}ycr}$ – уставка на концентрацию фтора САУ ПР, % об.; ε – сигнал рассогласования уставки ($C_{F_{2}ycr}$) и измеренной ($C_{F_{2}}$) величины концентрации фтора на выходе ПР, % об.; $N_{\Pi U A}$ – управляющее воздействие рассчитанное контуром стабилизации, об/мин; ΔN

– управляющее воздействие рассчитанное контуром компенсации, об/мин; N^{ПР} – управляющее воздействие на шнек загрузки ПР, об/мин; C_{F₂} - измеренное значение концентрации фтора на выходе ПР, % об.; K^u_{ΠP}, T^u_{ΠP}, τ^u_{ΠP}, коэффициент передачи, постоянная времени и время запаздывания модели ПР; K_R, T_U, T_Д – коэффициент передачи, постоянные времени интегрирования и дифференцирования

регулятора контура стабилизации; $C_{\rm U}, C_{\rm U4}, C_{\rm F}$ – массовые доли урана, четырехвалентного урана и растворимого фтора в полупродукте загружаемом в ПР, масс. доли

Рисунок 4.2 – Структурная схема адаптивной комбинированной САУ ПР

4.2 Идентификация технологического объекта в замкнутом контуре управления

Качественная работа локальных систем автоматического управления – основа промышленной безопасности, долговечности и достижимости экономических показателей, обеспечиваемых АСУ ТП в целом. Однако, зачастую, изменение физико-механических характеристик сырья, переменная нагрузка производства и разного рода переключения изменяют характеристики ТОУ, что приводит к необходимости перенастройки систем управления. Проблема обеспечения высокой динамической точности локальных САУ для объектов с переменными параметрами может быть решена путем адаптации параметров настройки регулятора САУ к изменению характеристик ТОУ.

Поэтому очень важной и актуальной является задача разработки эффективных и надежных методов автоматической настройки САУ. Типовой подход в обеспечении автоматической настройки САУ предполагает наличие двух принципиально важных этапов, это идентификация объекта управления и расчет параметров настройки регулятора.

Задача идентификации заключается в определении структуры и параметров математической модели ТОУ активными, либо пассивными методами. Пассивные методы идентификации используют случайные, естественные колебания входных и выходных сигналов ТОУ, а активные используют реакцию ТОУ на тестовые воздействия специального типа (ступенчатые, импульсные, гармонические и т. д.) [74, 75, 76].

Пассивные методы идентификации основаны на статистических методах, требующих для анализа больших временных интервалов. Высокая точность и быстродействие активных методов идентификации актуализирует их использование в адаптивных САУ.

Идентификация в разомкнутом контуре управления долгое время являлась наиболее предпочтительной, однако в этом случае нарушается режим нормальной эксплуатации ТП [77]. Размыкание контура управления ПР нежелательно, что объясняется большим количеством возмущений, способных вывести управляемую координату за регламентный диапазон. Ввиду этого, для идентификации параметров модели ПР, необходимо применение активных методов идентификации в замкнутом контуре управления.

Среди специалистов бытует мнение о невозможности использования методов идентификации для определения параметров ТОУ в замкнутом контуре управления [78]. Однако, в специальных исследованиях была доказана возможность идентификации в замкнутом контуре управления при наличии запаздывания в модели ТОУ [79]. Следовательно, необходимо определить

условия, при которых возможно применение активных методов идентификации в замкнутом контуре управления.

4.2.1 Аналитическое доказательство идентифицируемости технологического объекта в замкнутом контуре управления

При синтезе одноконтурной САУ по отклонению (рисунок 4.3) для расчета параметров настройки регулятора необходимо знание передаточной функции модели ТОУ по каналу управления ($W_{ob}^{u}(s)$), которая определяется как отношение изображений управляемого Y(s) и управляющего U(s) сигналов [80].



 $W_R(s)$ – передаточная функция регулятора; $W_{ob}^u(s), W_{ob}^f(s)$ – передаточные функции объекта по ко каналам управления и возмущения; F(s) – изображение возмущающего воздействия; G(s) – изображение уставки САУ; E(s) - изображение сигнала рассогласования; R(s) – изображение сигнала на выходе регулятора; $\Delta U(s)$ – изображение дополнительного корректирующего управляющего воздействия; U(s) - изображение управляющего воздействия на входе объекта; Y(s) – изображение выходной координаты объекта

Рисунок 4.3 – Структурная схема одноконтурной САУ по отклонению

Рассмотрим варианты внесения возмущений в САУ, представленную на рисунке 4.3, и их влияние на свойства, проявляемые каналом управления $W_{ob}^{u}(s)$:

а) Изменение величины возмущения (f(t)) вызывает следующую реакцию u(t) и y(t):

$$U(s) = -\frac{W_{ob}^{f}(s) \cdot W_{R}(s)}{1 + W_{R}(s) \cdot W_{ob}^{u}(s)} \cdot F(s); Y(s) = \frac{W_{ob}^{f}(s)}{1 + W_{R}(s) \cdot W_{ob}^{u}(s)} \cdot F(s).$$
(4.2)

В этом случае отношение изображений выходного и входного сигналов ТОУ $\frac{Y(s)}{U(s)}$ принимает вид:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = -\frac{W_{ob}^{f}(s) \cdot \left(1 + W_{R}(s) \cdot W_{ob}^{u}(s)\right) \cdot F(s)}{\left(1 + W_{R}(s) \cdot W_{ob}^{u}(s)\right) \cdot W_{ob}^{f}(s) \cdot W_{R}(s) \cdot F(s)} = -\frac{1}{W_{R}(s)}.$$
(4.3)

Таким образом, при изменении возмущающего воздействия (f(t)) и стабильности остальных внешних воздействий (g(t) = 0; $\Delta u(t) = 0$), на основании измеренных сигналов y(t) и u(t) на выходе и входе ТОУ согласно (4.3), можно определить передаточную функцию регулятора, а не модель ТОУ по каналу управления.

б) Изменение величины уставки (g(t)) вызывает следующую реакцию u(t) и y(t):

$$U(s) = \frac{W_R(s)}{1 + W_R(s) \cdot W_{ob}^u(s)} \cdot G(s); Y(s) = \frac{W_R(s) \cdot W_{ob}^u(s)}{1 + W_R(s) \cdot W_{ob}^u(s)} \cdot G(s).$$
(4.4)

В этом случае отношение изображений выходного и входного сигналов объекта $\frac{Y(s)}{U(s)}$ принимает вид:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{W_R(s) \cdot W_{ob}^u(s) \cdot \left(1 + W_R(s) \cdot W_{ob}^u(s)\right) \cdot G(s)}{\left(1 + W_R(s) \cdot W_{ob}^u(s)\right) \cdot W_R(s) \cdot G(s)} = W_{ob}^u(s).$$
(4.5)

Выражение (4.5) свидетельствует о идентифицируемости канала управления ТОУ по реакции замкнутой САУ на изменение уставки (g(t)).

в) Изменение величины управляющего воздействия (u(t)), посредствам дополнительной коррекции $\Delta u(t)$, вызывает следующую реакцию u(t) и y(t):

$$U(s) = \frac{1}{1 + W_R(s) \cdot W_{ob}^u(s)} \cdot \Delta U(s); Y(s) = \frac{W_{ob}^u(s)}{1 + W_R(s) \cdot W_{ob}^u(s)} \cdot \Delta U(s).$$
(4.6)

Отношение изображений выходного и входного сигналов объекта $\frac{I(s)}{U(s)}$ принимает вид:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{W_{ob}^{u}(s) \cdot \left(1 + W_{R}(s) \cdot W_{ob}^{u}(s)\right) \cdot \Delta U(s)}{\left(1 + W_{R}(s) \cdot W_{ob}^{u}(s)\right) \cdot \Delta U(s)} = W_{ob}^{u}(s).$$
(4.7)

Из выражения (4.7) следует, что прямая идентификация ТОУ в замкнутом контуре по измеренным сигналам на его входе и выходе возможна так же и при изменении дополнительного корректирующего управляющего воздействия ($\Delta u(t)$).

Таким образом, прямая идентификация объекта по измеренным сигналам на его входе и выходе позволяет найти передаточную функцию модели ТОУ по каналу управления, если в качестве искусственно созданного тестового воздействия использовать изменение сигнала уставки (g(t)), либо непосредственное изменение управляющего воздействия на входе ТОУ ($\Delta u(t)$).

Приведенные выше исследования доказывают возможность идентификации в замкнутом контуре ТОУ по каналу управления без ограничений на его свойства и форму тестового воздействия, что подтверждается экспериментальными данными, приведенными в работе [81].

Проведенный анализ литературы не выявил аналитических методов идентификации ТОУ в замкнутом контуре управления. Данная задача решается путем применение численных методов оптимизации. Однако, для обеспечения эффективности данного подхода идентификации, требуется определиться со структурой модели ТОУ и начальными значениями оптимизируемых параметров.

В работе [82] показано, что для параметрического синтеза регулятора одноконтурной САУ по отклонению инерционными объектами с самовыравниванием, достаточным является их описание моделью (4.8).

$$W_{ob}(s) = \frac{K_{ob}}{T_{ob} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_{ob} \cdot s}$$
(4.8)

Для исследований способов нахождения начальных значений оптимизируемых параметров модели (4.8) рассмотрим одноконтурную систему стабилизации ПР. Ввиду того, что канал управления САУ ПР описывает динамику изменения концентрации газа в технологическом газе проходящем последовательно через ПР, теплообменник и фильтр, модель ПР была описана передаточной функций инерционного звена 3-го порядка с запаздыванием (4.9).

$$W = \frac{-1.1 \cdot e^{-0.5s}}{(44s+1)(22s+1)(11s+1)}$$
(4.9)

Реакции замкнутой и разомкнутой САУ ПР на ступенчатое и импульсное изменения уставки и управляющего воздействия приведены на рисунках 4.4 и 4.5.



Рисунок 4.4 – Реакция САУ ПР на ступенчатые воздействия

Из рисунков 4.4 и 4.5 видно, что на интервале времени от момента подачи возмущения до двух времен запаздывания, реакции замкнутой и разомкнутой САУ ПР идентичны только в случае изменения управляющего воздействия. Данное обстоятельство упрощает процедуру нахождения стартовых значений для оптимизируемых параметров ввиду того, что на данном участке поведение объекта приближенно может быть описано уравнением вида (4.10).



Рисунок 4.5 – Реакция САУ ПР на импульсные воздействия

$$y(t) = K_{ob} \cdot (1 - e^{-\frac{t - \tau_{ob}}{T_{ob}}}) \cdot \Delta x, \qquad (4.10)$$

где Δx – величина ступенчатого изменения управляющего воздействия.

4.2.2 Идентификация по ступенчатому изменению управляющего воздействия

На рисунке 4.6 приведены временные характеристики входного и выходного сигналов ТОУ в замкнутом контуре управления при ступенчатом изменении управляющего воздействия.

В случае описания поведения ТОУ моделью (4.8), коэффициент передачи с достаточной точностью определяется выражением (4.11), представляющим собой отношение площадей под временными характеристиками управляемой y(t) и управляющей x(t) переменных САУ [40, 67].



Рисунок 4.6 – Временные характеристики входного и выходного сигналов ТОУ в замкнутом контуре управления при ступенчатом изменении управляющего воздействия

$$K_{ob} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{\int_{0}^{t_{\text{per}}} y(t)dt}{\int_{0}^{t_{\text{per}}} x(t)dt},$$
(4.11)

где *t*_{рег} – время регулирования, с.

Приняв допущение о том, что модель (4.10) проходит через две произвольно выбранные точки переходной функции y(t), можно составить систему двух уравнений, единственным решением которых являются значения параметров T_{ob} и τ_{ob} . В результате экспериментальных исследований были выбраны точки y_2 и y_7 соответствующие моментам времени, при котором y(t) достигает 20 % и 70 % от максимального отклонения управляемой координаты от начального уровня (y_{max}). Подставляя координаты выбранных точек в уравнение (4.10) получим систему уравнений (4.12).

$$\begin{cases} y_2 = K_{ob} \cdot \Delta x \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_2 - \tau_{ob}}{T_{ob}}}\right) \\ y_7 = K_{ob} \cdot \Delta x \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_7 - \tau_{ob}}{T_{ob}}}\right) \end{cases}$$
(4.12)

Решением системы уравнений (4.12) являются аналитические выражения (4.13) позволяющие рассчитывать параметры T_{ob} и τ_{ob} .

$$\tau_{ob} = \frac{t_2 \cdot \ln\left(1 - \frac{y_7}{K_{ob} \cdot \Delta x}\right) - t_7 \cdot \ln\left(1 - \frac{y_2}{K_{ob} \cdot \Delta x}\right)}{\left(\ln\left(1 - \frac{y_7}{K_{ob} \cdot \Delta x}\right) - \ln\left(1 - \frac{y_2}{K_{ob} \cdot \Delta x}\right)\right)}$$
(4.13)
$$T_{ob} = \frac{t_2 - \tau_{ob}}{-\ln\left(1 - \frac{y_2}{K_{ob} \cdot \Delta x}\right)}$$

Применяя выражения (4.11) и (4.13) для идентификации параметров модели (4.8) описывающей поведение ПР в замкнутом контуре управления, к временным характеристикам представленным на рисунке 4.6, были получены следующие параметры:

$$K_{ob} = -1,0988,$$

 $T_{ob} = 64,58,$ (4.14)
 $\tau_{ob} = 86,67.$

Для оценки точности идентификации использовалось приведенное среднее квадратическое отклонение, рассчитываемое по формуле (4.15).

$$\delta = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - y_i^{\text{MOR}})^2}{n-1}}}{y_{\text{max}}} \cdot 100$$
(4.15)

Составленная модель ПР описывает исходные данные с приведенным средним квадратическим отклонением равным 2,5 %. График сравнения

поведения исходного объекта (модель (4.9)) и составленной модели (4.8) с параметрами (4.14), при ступенчатом изменении управляющего воздействия приведен на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7 – Реакция ТОУ в замкнутом контуре управления на ступенчатое изменение управляющего воздействия

Недостатком описанного выше метода расчета параметров модели ТОУ является существенная зависимость точности идентификации от отношения времени запаздывания (τ_{ob}) и постоянной времени (T_{ob}). Это объясняется тем, что снижение данной величины приводит к уменьшению интервала времени, на котором ТОУ в замкнутом контуре управления реагирует на тестовое воздействие идентично разомкнутой САУ.

Повысить точность идентификации возможно применив численные оптимизационные методы, позволяющие при произвольном входном сигнале оптимизировать параметры модели ТОУ по всему переходному процессу управляемой координаты. Применив метод Левенберга-Марквардта, с целью оптимизации параметров (4.14), минимизируя при этом расхождение исходных данных и реакцию модели (4.8), при идентичных условиях, были получены следующие параметры [83, 84]:

$$K_{ob} = -1,0988,$$

 $T_{ob} = 57,5,$ (4.16)
 $\tau_{ob} = 91,8.$

Приведенная среднеквадратичная погрешность аппроксимации моделью (4.8) с параметрами (4.16) исходных данных составила 1,86 %.

Таким образом, предлагаемая методика идентификации, заключающаяся в последовательном выполнении следующих операций:

— подачу тестового ступенчатого воздействия на вход ТОУ, с целью отслеживая поведения его входной x(t) и выходной y(t) координат в замкнутом контуре управления;

– расчет параметров модели (4.8) описывающей ТОУ на основании сигналов x(t) и y(t) по формулам (4.11) и (4.13);

— оптимизацию параметров модели ТОУ по методу Левенберга-Марквардта путем минимизации расхождения y(t) и реакции модели на входной сигнал x(t).

Для выявления области применения предлагаемой методики идентификации были проведены исследования по идентификации в замкнутом контуре ТОУ описываемого моделью (4.9) с переменным запаздыванием, варьируемым в диапазоне от 0 до 240 секунд.

Из рисунка 4.8 видно, что разработанная методика идентификации позволяет описывать ТОУ инерционным звеном первого порядка с запаздыванием с погрешностью менее 4 % на всем исследуемом диапазоне варьирования τ_{ab}/T_{ab} .



Рисунок 4.8 – Зависимость погрешности идентификации от отношения времени запаздывания и постоянной времени модели ТОУ

4.3 Алгоритм адаптации параметров модели ПР4.3.1 Идентификация ПР по производственным данным

Для применения разработанной в подразделе 4.2 процедуры идентификации требуется активное вмешательство в ТП в виде ступенчатого изменения управляющего воздействия в замкнутом контуре управления.

Эксплуатируемая ранее САУ ПР предусматривает ручную коррекцию оперативно-технологическим персоналом частоты вращения шнека загрузки. Данное обстоятельство позволило без дополнительных вмешательств в ТП, выбрать участки производственных данных, отражающих реакцию узла фторирования на ступенчатое изменение частоты вращения шнека загрузки в замкнутом контуре управления.

Требованием к выбираемым для идентификации участкам производственных данных являлась стабильность основных технологических переменных узла фторирования в течении 3 минут до и после подачи ступенчатого воздействия.

Анализу подверглись 1320 часов производственных данных за 2011 и 2012 года, в результате чего было отобрано 9 участков времени удовлетворяющих

условиям выбора. Пример отобранного участка пригодного для проведения процедуры идентификации представлен на рисунке 4.9.



Рисунок 4.9 – Участок производственных данных, отражающий реакцию ПР в замкнутом контуре управления на ступенчатое изменение управляющего сигнала

Результаты применения разработанной процедуры идентификации к отобранным участкам производственных данных сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты идентификации в замкнутом контуре управления параметров модели ПР по производственным данным

Дата	$K^{u}_{\Pi \mathrm{P}}, rac{\% ext{ об.}}{ ext{ об/мин}}$	$T^u_{\Pi \mathrm{P}}, c$	$ au_{\Pi ext{P}}^{u}, c$	δ, %
12.05.2011	-0,86	43,6	110,5	4,3
07.06.2012	-1,1	43,9	99,4	1,9
10.06.2012	-0,97	30,7	102,5	5,9
10.07.2012	-0,88	78,6	90,7	7,7
11.07.2012	-1,43	93,0	83,7	6,8

12.07.2012	-0,87	20	119,3	8,2
12.07.2012	-0,86	34,3	101,0	9,8
13.08.2012	-0,57	39,9	108,5	9,9
15.08.2012	-0,99	75,5	84,4	4,1

Эффективность идентификации оценивалась путем расчета приведенного среднего квадратического отклонения б измеренной и рассчитанной по модели концентрации фтора на выходе ПР. Результаты расчетов сведены в таблицу 4.2. Пример сопоставления переходных процессов рассчитанных на модели и производственных данных приведен на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10 – Рассчитанные по модели и отобранные из производственных данных концентрации фтора на выходе ПР

Составленные модели, описывают выбранные участки производственных данных с погрешностью менее 10 %, что доказывает применимость разработанной методики идентификации в производственных условиях. Однако, использование данного активного метода идентификации в составе алгоритма

132

адаптации параметров настройки регулятора САУ ПР затруднительно, что объясняется сложностью выбора момента подачи тестового воздействия. Подача тестового воздействия В момент переходного процесса, вызванного возмущений САУ ПР, существенным изменением одного ИЗ снижает информативность управляемой координаты о свойствах канала управления.

Альтернативным путем решения задачи является использование пассивного метода идентификации параметров ПР, основанного на выявлении зависимости статических и динамических характеристик узла фторирования от его конструктивных и эксплуатационных особенностей.

4.3.2 Алгоритм расчета динамических характеристик модели ПР

Динамические характеристики узла фторирования, как объекта управления, определяются объемом технологической линии от точки загрузки сырьевых продуктов, до точки измерения объемной концентрации фтора и объемным расходом технологического газа на выходе ПР. Если объем технологической линии в процессе эксплуатации производства остается постоянным, то объемный расход газа на выходе ПР нестабилен. Это связано с переменными составом и массовым расходом сырьевых продуктов ПР (технический фтор, полупродукт).

Существующие на C3 CXK средства контроля параметров ТП не позволяют отслеживать состав сырьевых продуктов, что исключает возможность аналитического определения объемного расхода технологического газа на выходе ПР используя прямые измерения.

Решением задачи определения динамических характеристик узла фторирования является составление регрессионной модели, описывающей зависимость величин времени запаздывания и постоянной времени модели ПР от измеряемых факторов влияющих на объемный расход технологического газа на выходе ПР.

Определение коэффициентов регрессионной модели проводится, как правило, на основании результатов эксперимента, проведенного на реальной

установке согласно плану, учитывающему варьирование всех факторов, влияющих на значение функции отклика. Ввиду того, что проведение полного факторного эксперимента на действующем узле фторирования невозможно, требуется разработка его математической модели.

4.3.2.1 Динамическая математическая модель ПР

Аппаратурная схема узла фторирования приведена на рисунке 4.11 [1].



1 – бункер загрузки; 2 – ГЧ ПР; 3 – вертикальная реторта ПР; 4 – расширительная камера; 5 – трубопровод технологической линии; 6 – теплообменник; 7 – электростатический фильтр; 8 - масспектрометр

Рисунок 4.11 – Аппаратурная схема узла фторирования

Взаимодействие полупродукта с фтором в ПР происходит по всей высоте аппарата. Интенсивность фторирования зависит от большого количества факторов, что доказывается низкой стабильностью концентрации фтора, измеряемой на выходе ПР. Однако учет влияния температуры, давлений, концентраций компонентов в составе технического фтора и полупродукта на кинетику процессов фторирования, описываемой реакциями (1.1), невозможен. Это объясняется отсутствием экспериментальных исследований, сопровождаемых изменением основных технологических параметров по высоте аппарата. В связи с этим, в разрабатываемой модели кинетика процесса фторирования описывалась статической моделью, разработанной ранее сотрудниками кафедры ЭАФУ [18, 85]:

$$\begin{cases} G_{\mathrm{UF}_{6}}^{\mathrm{IIP}} = \left(\frac{m_{\mathrm{UO}_{2}F_{2}} \cdot Z_{\mathrm{UO}_{2}F_{2}}^{\mathrm{IIP}}}{M_{\mathrm{UO}_{2}F_{2}}} + \frac{m_{\mathrm{UE}_{4}} \cdot Z_{\mathrm{UF}_{4}}^{\mathrm{IIP}}}{M_{\mathrm{UE}_{4}}} + \frac{m_{\mathrm{UO}_{2}} \cdot Z_{\mathrm{UO}_{2}}^{\mathrm{IIP}}}{M_{\mathrm{UO}_{2}}} + 3 \cdot \frac{m_{\mathrm{U}_{3}\mathrm{O}_{8}} \cdot Z_{\mathrm{U}_{3}\mathrm{O}_{8}}^{\mathrm{IIP}}}{M_{\mathrm{U}_{3}\mathrm{O}_{8}}} \right) \cdot M_{\mathrm{UF}_{6}} \cdot G_{\mathrm{III}}, \\ G_{\mathrm{O}_{2}}^{\mathrm{IIP}} = \left(\frac{m_{\mathrm{UO}_{2}F_{2}} \cdot Z_{\mathrm{UO}_{2}F_{2}}^{\mathrm{IIP}}}{M_{\mathrm{UO}_{2}}} + \frac{m_{\mathrm{UO}_{2}} \cdot Z_{\mathrm{UO}_{2}}^{\mathrm{IIP}}}{M_{\mathrm{UO}_{2}}} + 4 \cdot \frac{m_{\mathrm{U}_{3}\mathrm{O}_{8}} \cdot Z_{\mathrm{U}_{3}\mathrm{O}_{8}}^{\mathrm{IIP}}}{M_{\mathrm{U}_{3}\mathrm{O}_{8}}} \right) \cdot M_{\mathrm{O}_{2}} \cdot G_{\mathrm{III}}, \\ \begin{cases} G_{\mathrm{O}_{2}}^{\mathrm{IIP}} = \left(1 - C_{\mathrm{HF}}^{\mathrm{IIP}} - C_{\mathrm{N}_{2}}^{\mathrm{IIP}} \right) \cdot \frac{p_{\mathrm{F}_{2}}^{\mathrm{IIP}} \cdot M_{\mathrm{F}_{5}}}{R \cdot T_{\mathrm{F}_{2}}^{\mathrm{IIP}}} \cdot G_{\mathrm{A}} - \left(2 \cdot \frac{m_{\mathrm{UO}_{2}F_{2}} \cdot Z_{\mathrm{UO}_{2}F_{2}}^{\mathrm{IIP}}}{M_{\mathrm{U}\mathrm{F}_{4}}} + \frac{m_{\mathrm{U}_{3}} \cdot Z_{\mathrm{U}_{9}}^{\mathrm{IIP}}}{M_{\mathrm{U}\mathrm{F}_{4}}} + \right) \\ + 3 \cdot \frac{m_{\mathrm{U}_{2}} \cdot Z_{\mathrm{U}_{2}}^{\mathrm{IIP}}}{M_{\mathrm{U}\mathrm{F}_{4}}} + 9 \cdot \frac{m_{\mathrm{U}_{3}} \cdot Z_{\mathrm{U}_{9}}^{\mathrm{IIP}}}{M_{\mathrm{U}\mathrm{F}_{4}}} + \left(3 \cdot \frac{m_{\mathrm{U}_{2}} \cdot Z_{\mathrm{U}_{2}}^{\mathrm{IIP}}}{M_{\mathrm{U}\mathrm{U}\mathrm{G}_{4}}} + \frac{m_{\mathrm{U}_{2}} \cdot Z_{\mathrm{U}\mathrm{U}_{9}}^{\mathrm{IIP}}}{M_{\mathrm{U}\mathrm{G}_{4}}} \right) \cdot M_{\mathrm{F}_{2}} \cdot G_{\mathrm{IIII}}, \\ \\ G_{\mathrm{HF}}^{\mathrm{IIP}} = C_{\mathrm{HF}}^{\mathrm{IIP}} \cdot \frac{p_{\mathrm{HF}}^{\mathrm{IIP}} \cdot M_{\mathrm{HF}}}{R \cdot T_{\mathrm{HF}}^{\mathrm{IIP}}} \cdot G_{\mathrm{A}}, \\ \\ C_{\mathrm{HF}}^{\mathrm{IIP}} = \frac{G_{\mathrm{HF}}^{\mathrm{IIP}} \cdot \frac{m_{\mathrm{H}}}{R \cdot T_{\mathrm{HF}}^{\mathrm{IIP}}} \cdot G_{\mathrm{A}}, \\ \\ C_{\mathrm{F}_{2}}^{\mathrm{IIP}} = \frac{G_{\mathrm{HF}}^{\mathrm{IIP}} \cdot \frac{G_{\mathrm{O}}^{\mathrm{IIP}}}{M_{\mathrm{U}_{6}}} + \frac{G_{\mathrm{U}_{6}}^{\mathrm{IIP}}}{M_{\mathrm{U}_{6}}} + C_{\mathrm{HF}}^{\mathrm{IIP}} \cdot G_{\mathrm{A}}, \\ \\ \end{array} \right$$

(4.17)

Отсутствие адекватной кинетической модели процесса фторирования обуславливает невозможность построения пространственно-распределенной процесса термодинамической модели, описывающей газодинамику распространения технологического газа в ПР. После аппарата фторирования технологический газ движется по трубопроводу, разные участки которого термоизоляцией И обогревом. He идеальность используемых оснащены технических решений, а также наличие большого количества возмущений (переменная температура цеха, вентиляция, местные сопротивления трубной арматуры и т.д.) обосновывает невозможность построения распределенной термодинамической модели адекватной действующей установке. Ввиду этого принято допущение о стационарности условий по температуре на различных участках технологической линии узла фторирования. Для дальнейших расчетов приняты следующие температурные условия: в вертикальной реторте ПР – 1000 °C, от ГЧ до теплообменника – 400 °C, после теплообменника 100 °C.

Для учета эффекта расширения/сжатия технологического газа по мере его движения по технологической линии принято решение о нормировании объемного расхода к нормальной температуре, при этом объемы участков корректируются согласно выражению (4.18).

$$\tilde{V}_i = V_i \cdot \frac{T_{273}}{T_i} \tag{4.18}$$

 T_{273} – абсолютная температура при нормальных условиях, °С;

 T_i – температура на *i*-ом участке технологической линии, °С.

Проводя декомпозицию узла фторирования по характеру движения технологического газа можно выделить участки, где происходит его перемешивание и участки, где наблюдается поршневое движение.

Перемешивание технологического газа происходит на участках узла фторирования обладающих большим поперечным сечением: расширительная камера, теплообменник, электростатический фильтр. Тогда, принимая допущение о идеальном перемешивании в рамках выделенного объема, математическое описание расширительной камеры, теплообменника и электростатического фильтра примет следующий вид [86]:

$$\begin{cases} \frac{dC_{\rm HF}}{dt} = \frac{1}{V_{\rm gq}} \left(\upsilon_{\rm r}^{\rm BX} \cdot S^{\rm BX} \cdot C_{\rm HF}^{\rm BX} - \upsilon_{\rm r} \cdot S \cdot C_{\rm HF} \right), \\ \frac{dC_{\rm F_2}}{dt} = \frac{1}{V_{\rm gq}} \left(\upsilon_{\rm r}^{\rm BX} \cdot S^{\rm BX} \cdot C_{\rm F_2}^{\rm BX} - \upsilon_{\rm r} \cdot S \cdot C_{\rm F_2} \right), \\ \frac{dC_{\rm UF_6}}{dt} = \frac{1}{V_{\rm gq}} \left(\upsilon_{\rm r}^{\rm BX} \cdot S^{\rm BX} \cdot C_{\rm UF_6}^{\rm BX} - \upsilon_{\rm r} \cdot S \cdot C_{\rm UF_6} \right), \end{cases}$$

$$(4.19)$$

$$\frac{dC_{\rm O_2}}{dt} = \frac{1}{V_{\rm gq}} \cdot \left(\upsilon_{\rm r}^{\rm BX} \cdot S^{\rm BX} \cdot C_{\rm O_2}^{\rm BX} + \upsilon_{\rm r} \cdot S \cdot C_{\rm O_2} \right), \\ \frac{dC_{\rm N_2}}{dt} = \frac{1}{V_{\rm gq}} \cdot \left(\upsilon_{\rm r}^{\rm BX} \cdot S^{\rm BX} \cdot C_{\rm N_2}^{\rm BX} + \upsilon_{\rm r} \cdot S \cdot C_{\rm N_2} \right), \end{cases}$$

На остальных участках узла фторирования движение технологического газа описано моделью идеального вытеснения (4.20).

$$\frac{dC_{\rm HF}}{dt} = -V \frac{dC_{\rm HF}^{\rm BX}}{dx},$$

$$\frac{dC_{\rm F_2}}{dt} = -V \frac{dC_{\rm F_2}^{\rm BX}}{dx},$$

$$\frac{dC_{\rm UF_6}}{dt} = -V \frac{dC_{\rm UF_6}^{\rm BX}}{dx},$$

$$\frac{dC_{\rm O_2}}{dt} = -V \frac{dC_{\rm O_2}^{\rm BX}}{dx},$$

$$\frac{dC_{\rm N_2}}{dt} = -V \frac{dC_{\rm N_2}^{\rm BX}}{dx},$$

$$(4.20)$$

где V – линейная скорость технологического газа, м/с;

х – пространственная координата (длина моделируемого участка), м.

В итоге, узел фторирования был описан ячеечной моделью, где кинетика фторирования описывается статической моделью ПР (4.17), а участки технологической линии моделями идеального смешения (4.19) и идеального вытеснения (4.20).

Адекватность модели проверялась путем сопоставления концентраций фтора на выходе узла фторирования, рассчитанных на модели и выбранных из производственных данных (рисунок 4.12).

В качестве критерия оценки адекватности модели ПР использовалось приведенное среднее квадратическое отклонение концентраций фтора на выходе узла фторирования, рассчитанных на модели и взятых из производственных данных. Результаты расчетов на трех участках времени представлены в таблице 4.3.

Погрешность аппроксимации моделью производственных данных не превысила 7 %, что является достаточным для ее использования при разработке алгоритма расчета динамических характеристик модели ПР.



Рисунок 4.12 – Временные характеристики входной и выходной координаты узла фторирования

Таблица 4.3 – Результаты проверки адекватности модели узла фторирования

№ п/п	Приведенное среднее квадратическое отклонение реакции модели
	от производственных данных, %
1	6,9
2	2,3
3	5,7

4.3.2.2 Составление аналитических зависимостей динамических характеристик модели ПР от измеряемых технологических переменных

В качестве факторов, влияющих на динамические характеристики узла фторирования приняты:

объемный расход технического фтора, изменяемый в диапазоне 28÷100 %;

– состав полупродукта, выраженный в массовых долях UO_2 , UO_3 , UO_2F_2 и UF_4 ;

 – частота вращения шнека загрузки ПР, при которой обеспечивается требуемый по технологии стехиометрический избыток фтора над фторируемым агентом.

Величины частот вращения шнека загрузки, обеспечивающих среднее регламентное значение концентрации фтора на выходе ПР равное 10 % об., для плана эксперимента определялись с помощью «ОПМ ПГУ», при заданных объемном расходе технического фтора и составе полупродукта.

С целью сокращения числа экспериментов было принято допущение о фиксированных пропорциях содержания диоксида и триоксида урана в полупродукте совпадающих с составом ЗОУ. С учетом выбора 3 уровней для каждого из факторов, в области их допустимых значений, был сформирован план эксперимента, представленный в таблице 4.4 [87, 88, 89].

С помощью разработанной в подпункте 4.3.2.1 математической модели узла фторирования были произведены, согласно плану эксперимента, расчеты процессов объемной концентрации переходных фтора при ступенчатом изменении частоты вращения шнека загрузки. Используя разработанный в 4.2 подразделе идентификации, были метод переходные процессы аппроксимированы инерционным звеном первого порядка с запаздыванием, результаты сведены в таблицу 4.4.

Единственными измеряемыми факторами, влияющими на концентрацию фтора на выходе ПР являются объемный расход технического фтора и частота вращения шнека загрузки ПР. Тогда время запаздывания и постоянная времени модели ПР могут быть описаны следующим полиномом [87, 88, 89]:

$$\Pi = b_0 + b_1 \cdot V_A + b_2 \cdot N^{\Pi P} + b_{12} \cdot V_A \cdot N^{\Pi P} + b_{11} \cdot (V_A)^2 + b_{22} \cdot (N^{\Pi P})^2$$
(4.21)

где П – целевая функция;

b_i – коэффициенты уравнения регрессии.

План эксперимента						Результаты аппроксимации инерционным звеном с			
№ п/п	<i>V_A</i> ,%	m_UO2 масс.доли	m_UO3 масс.доли	m_UO2F2 масс.доли	m_UF4 масс.доли	Частота вращения шнека ПР, об/мин	<i>К</i> ^{<i>u</i>} _{ПР} , <u>% об.</u> об/мин	T_{IIP}^{u}, c	$ au_{\Pi extsf{P}}^{u}, extsf{c}$
1	28	0	0	0	1	58,7	-0,64	135,0	62,3
2	28	0	0	0,5	0,5	38,7	-0,98	135,1	62,3
3	28	0	0	1	0	28,8	-1,31	135,2	62,3
4	28	0,1667	0,3333	0	0,5	27,4	-1,62	159,8	86,7
5	28	0,1667	0,3333	0,5	0	22,1	-1,94	154,5	67,1
6	28	0,3333	0,6667	0	0	17,9	-2,62	170,6	70,5
7	64	0	0	1	0	65,6	-0,57	57,3	43,3
8	64	0,1667	0,3333	0	0,5	62,5	-0,70	67,6	45,5
9	64	0,1667	0,3333	0,5	0	50,3	-0,84	66,0	44,5
10	64	0,3333	0,6667	0	0	40,8	-1,13	71,9	45,6
11	100	0,1667	0,3333	0,5	0	78,5	-0,53	41,5	39,2
12	100	0,3333	0,6667	0	0	63,6	-0,72	45,3	40,0

Таблица 4.4 – План эксперимента и результаты расчета

Для определения коэффициентов регрессионного уравнения (4.21) был использован метод наименьших квадратов в матричной форме [90].

$$\overline{B} = (\overline{X}^T \cdot \overline{X})^{-1} \cdot (\overline{X}^T \cdot \overline{Y}); \qquad (4.22)$$

 \overline{X} - исходная матрица факторов;

 \overline{X}^{T} - транспонированная матрица \overline{X} ;

 \overline{Y} - матрица столбец опытных значений функции отклика;

 \overline{B} - матрица столбец искомых коэффициентов уравнения регрессии.

Применяя выражения (4.22) к данным представленным в таблице 4.4, были получены выражения (4.23), описывающие зависимость постоянной времени и времени запаздывания модели ПР от измеряемых на производстве частоты вращения шнека загрузки ПР и расхода технического фтора.

$$T_{ob}^{u} = 281 - 0.87 \cdot V_{A} - 3.00 \cdot N^{\Pi P} - 0.007 \cdot V_{A} \cdot N^{\Pi P} + 0.002 \cdot (V_{A})^{2} + 0.03 \cdot (N^{\Pi P})^{2},$$

$$\tau_{ob}^{u} = 105 - 0.38 \cdot V_{A} - 0.27 \cdot N^{\Pi P} + 0.001 \cdot V_{A} \cdot N^{\Pi P} + 0.0004 \cdot (V_{A})^{2} - 0.001 \cdot (N^{\Pi P})^{2}.$$
(4.23)

Точность составленных регрессионных моделей проверялась путем расчета относительных погрешностей аппроксимации экспериментальных данных. Результаты расчетов сведены в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 – Сравнительная таблица результатов аппроксимации экспериментальных данных регрессионными моделями

26	Динамическая модель		Регрессионная модель		Относительная	
<u>№</u> п/п	узла фтор	ирования	узла фтор	ирования	погрешность	
11/11	T^u_{ob}, c	$ au^u_{ob}, c$	T^u_{ob}, c	$ au^u_{ob}, c$	T^u_{ob}, c	$ au_{ob}^{u}, c$
1	135,0	62,3	135,1	61,1	0,02	1,94
2	135,0	62,3	135,1	66,9	0,02	7,33
3	135,2	62,3	146,4	69,2	8,29	11,04
4	159,8	86,7	148,5	69,6	7,11	19,84

5	154,5	67,1	158,2	70,6	2,38	5,24
6	170,6	70,5	167,3	71,4	1,89	1,37
7	57,3	43,3	62,1	41,4	8,33	4,28
8	67,6	45,5	61,2	41,9	9,45	7,95
9	66,1	44,5	64,8	43,4	1,96	2,51
10	72,0	45,6	75,4	44,1	4,77	3,27
11	41,5	39,2	43,2	35,0	4,01	10,70
12	45,3	40,0	44,0	34,6	2,97	13,52
Средн.	-	-	-	-	4,27	7,42

Средние погрешности аппроксимации постоянной времени и времени запаздывания модели ПР (таблица 4.4) уравнениями (4.23) составили 4,3 % и 7,4 % соответственно.

4.3.3 Алгоритм адаптации коэффициента передачи модели ПР к изменению физико-механических характеристик полупродукта

Коэффициент передачи $K_{\Pi P}^{u}$ модели ПР является статической мерой чувствительности управляемой координаты САУ ПР (концентрации фтора на выходе ПР) к управляющей (частоты вращения шнека загрузки).

В исходной САУ ПР, алгоритм адаптации К^и_{ПР} основан на статической модели ПР, где градуировочный коэффициент шнека загрузки ПР и состав полупродукта были приняты постоянными величинами [18]. В действующем ПГУ стабильность указанных возмущений не соблюдается, что оказывает существенное влияние на величину $K_{\Pi P}^{u}$, приводя к снижению качества управления ПР. Предлагаемым решением является алгоритм адаптации характеристики модели ПР к производственным статической условиям, включающий операции:

– расчет состава полупродукта загружаемого в ПР с помощью «ОПМ ПГУ»;

– перерасчет градуировочного коэффициента шнека загрузки ПР ($k_{\text{град}}$) на основании результатов прямых измерений расхода технического фтора, частоты вращения шнека загрузки ПР и концентрации фтора на выходе ПР;

– определение коэффициента передачи модели ПР по алгоритму, основанному на статической модели ПР с использованием вычисленных состава полупродукта и градуировочного коэффициента шнека загрузки ПР.

Потребность в адаптации состава полупродукта возникает в случае изменения величин массовых расходов технического фтора, ЗОУ или ТФУ, поступающих в аппараты двух технологических линий.

Программный модуль «ОПМ ПГУ» позволяет, используя массовые расходы ЗОУ, ТФУ, полупродукта и технического фтора по аппаратам производства, рассчитывать состав полупродукта, поступающего на стадии фторирования обеих технологических линий. Под составом подразумеваются массовые доли UO₂, UO₃, UO₂F₂ и UF₄ в полупродукте поступающем в бункер загрузки ПР из АУ.

На основании уравнений химических реакций фторирования (1.1), протекающих в ПР, были сформированы выражения (4.24), определяющие объемные расходы компонентов технологического газа на выходе узла фторирования.

$$\begin{split} V_{\rm UF_6} &= 22, 4 \cdot Z \cdot 10^{-3} \, m_{\rm nn} \cdot \left(\frac{C_{\rm U}}{M_{\rm U}}\right), \\ V_{\rm F_2} &= \left(1 - C_{\rm HF}^{\rm \Pi P}\right) \cdot V_A - 22, 4 \cdot 10^{-3} \cdot Z \cdot m_{\rm nn} \cdot \left(\frac{3 \cdot C_{\rm U}}{M_{\rm U}} - \frac{C_{\rm F}}{M_{\rm F_2}}\right), \\ V_{o_2} &= 22, 4 \cdot 10^{-3} \cdot Z \cdot m_{\rm nn} \cdot \left(\frac{3C_{\rm U} - C_{\rm U4}}{2M_{\rm U}} - \frac{C_{\rm F}}{2M_{\rm F_2}}\right), \end{split}$$
(4.24)
$$V_{\rm HF} &= C_{\rm HF}^{\rm \Pi P} \cdot V_A, \end{split}$$

где Z – степень извлечения урана из полупродукта в ПР, масс. доли; $C_{\rm HF}^{\rm ПР}$ – объемная доля НF в техническом фторе, об. доли; *m*_{пп} – масса полупродукта загружаемого в ПР за час, кг;

 $M_{\rm U}, M_{\rm F_2}$ – молярные массы U и F₂, кг/моль.

Тогда, объемная концентрация молекулярного фтора в технологическом газе на выходе ПР определяется выражением (4.25).

$$C_{\rm F}^{\rm \Pi P} = \frac{\left(1 - C_{\rm HF}^{\rm \Pi P}\right) \cdot V_{A} - 22, 4 \cdot Z \cdot 10^{-3} m_{\rm nm} \cdot \left(\frac{3C_{\rm U}}{M_{\rm U}} - \frac{C_{\rm F}}{M_{\rm F_{2}}}\right)}{V_{A} + 22, 4 \cdot Z \cdot 10^{-3} m_{\rm nm} \cdot \left(\frac{C_{\rm F}}{2 \cdot M_{\rm F_{2}}} - \frac{C_{\rm U} + C_{\rm U4}}{2 \cdot M_{\rm U}}\right)},$$
(4.25)

Загрузка полупродукта в ПР осуществляется посредствам шнекового питателя, следовательно массовый расход полупродукта, поступившего в ПР, можно представить функцией числа оборотов шнека загрузки ПР:

$$m_{\rm nn} = k_{\rm rpag} \cdot N^{\rm IIP} \cdot 60. \tag{4.26}$$

Разрешая систему уравнений (4.25) и (4.26) относительно градуировочного коэффициента, получаем выражение (4.27), позволяющее вычислять текущее значение градуировочного коэффициента шнека загрузки ПР на основании результатов прямых измерений расхода технического фтора, частоты вращения шнека загрузки ПР и концентрации фтора на выходе ПР.

$$k_{\rm rpag} = \frac{\bar{V}_{A} \cdot \left(1 - C_{\rm HF}^{\Pi P} - \bar{C}_{\rm F}^{\Pi P}\right)}{22,4 \cdot 60 \cdot Z \cdot 10^{-3} \cdot \bar{N}^{\Pi P} \cdot \left(\bar{C}_{\rm F2}^{\Pi P} \cdot \left(\frac{C_{\rm F}}{2 \cdot M_{\rm F2}} - \frac{C_{\rm U} + C_{\rm U4}}{2 \cdot M_{\rm U}}\right) + \left(\frac{3 \cdot C_{\rm U}}{M_{\rm U}} - \frac{C_{\rm F}}{M_{\rm F2}}\right)\right)}$$
(4.27)

Коэффициент $K_{\Pi P}^{u}$ представляет собой отношение приращения концентрации фтора на выходе ПР в окрестности уставки САУ ПР, к приращению оборотов шнека загрузки, вызвавшему данное изменение:

$$K_{\Pi P}^{u} = \frac{C_{+}^{\Pi P} - C_{-}^{\Pi P}}{\Delta N}.$$
 (4.28)

Задаваясь приращением управляющего воздействия $\Delta N = 5$ об/мин, относительно текущего среднего, величины $C_{F+}^{\Pi P}$ и $C_{F-}^{\Pi P}$ рассчитываются по выражениям (4.29):
$$C_{\rm F+}^{\rm TIP} = \frac{\left(1 - C_{\rm HF}^{\rm TIP}\right)\bar{V_A} - 22, 4\cdot60\cdot k_{\rm rpag}\cdot Z\cdot10^{-3}\cdot\left(\bar{N}^{\rm TIP} + 2,5\right)\cdot\left(\frac{3C_{\rm U}}{M_{\rm U}} - \frac{C_{\rm F}}{M_{\rm F_2}}\right)}{\bar{V_A} + 22, 4\cdot60\cdot k_{\rm rpag}\cdot Z\cdot10^{-3}\cdot\left(\bar{N}^{\rm TIP} + 2,5\right)\cdot\left(\frac{C_{\rm F}}{2\cdot M_{\rm F_2}} - \frac{C_{\rm U} + C_{\rm U4}}{2\cdot M_{\rm U}}\right)}$$

$$C_{\rm F-}^{\rm TIP} = \frac{\left(1 - C_{\rm HF}^{\rm TIP}\right)\cdot\bar{V_A} - 22, 4\cdot60\cdot k_{\rm rpag}\cdot Z\cdot10^{-3}\cdot\left(\bar{N}^{\rm TIP} - 2,5\right)\cdot\left(\frac{3C_{\rm U}}{M_{\rm U}} - \frac{C_{\rm F}}{M_{\rm F_2}}\right)}{\bar{V_A} + 22, 4\cdot60\cdot k_{\rm rpag}\cdot Z\cdot10^{-3}\cdot\left(\bar{N}^{\rm TIP} - 2,5\right)\cdot\left(\frac{2C_{\rm F}}{2\cdot M_{\rm F_2}} - \frac{C_{\rm U} + C_{\rm U4}}{2\cdot M_{\rm U}}\right)}$$

$$(4.29)$$

Адаптация коэффициента передачи модели ПР по формуле (4.28) используя мгновенные значения измерительных устройств нецелесообразна, ввиду того, что точка измерения концентрации фтора отстранена от ПР. Это обстоятельство добавляет инерционность в измерительный канал концентрации фтора на выходе ПР. Решением данной проблемы является использование в расчетах сглаженных величин расхода технического фтора (\bar{V}_A), частоты вращения шнека загрузки ПР ($\bar{N}^{\Pi P}$) и концентрации фтора на выходе ПР ($\bar{C}_{F2}^{\Pi P}$).

Фильтрация измеренных данных осуществлялась по формуле экспоненциального сглаживания (3.48)÷(3.49), где постоянная времени была принята равной длительности переходного процесса (255 с.) по каналу управления САУ ПР, описываемого моделью (4.9):

4.4 Контур компенсации влияния нестабильности расхода технического фтора на концентрацию фтора

Фторирование урансодержащих продуктов в ПР представляет собой комплекс сложных физико-химических процессов, результат протекания которых зависит от множества технологических факторов: величины объемного расхода технического фтора, распределения давлений по технологической схеме ПГУ, гранулометрического и химического состава твердофазных компонентов и т.д. Одним из наиболее существенных возмущающих факторов, приводящих к нестабильности управляемой координаты САУ ПР, является изменение количества подаваемого технического фтора на вход ПР (рисунок 4.13).



Рисунок 4.13 – Временные зависимости расхода технического фтора и концентрации фтора на выходе ПР

Наглядная корреляция расхода технического фтора, поступающего на вход ПР, и концентрации фтора в технологическом газе на выходе ПР (рисунок 4.13) доказывает, что разработанная ранее САУ ПР не позволяет компенсировать данные возмущения без существенных отклонений управляемой координаты.

С целью снижения влияния нестабильности расхода технического фтора на концентрацию фтора на выходе ПР, был модернизирован контур компенсации САУ ПР, структурная схема которого представлена на рисунке 4.14 [18].

Предполагаемый контур компенсации состоит из:

а) блока вычисления сигнала рассогласования текущих измеренной и сглаженной величин расхода технического фтора по выражению (4.30).



 а) расчет сигнала рассогласования текущей измеренной и сглаженной величин расхода технического фтора; б) расчет корректирующего управляющего воздействия на шнек загрузки ПР по П-закону регулирования
 Рисунок 4.14 – Структурная схема контура компенсации влияния нестабильности

расхода технического фтора на концентрацию фтора на выходе ПР

$$X_{1i} = (1 - \alpha_V) \cdot (V_{Ai} - V_{Ai-1} + X_{1i-1})$$
(4.30)

где α_v – коэффициент экспоненциального сглаживания расхода технического фтора;

*X*_{1*i*} – сигнал рассогласования измеренной и сглаженной величин расхода технического фтора на *i*-ом такте управления;

 V_{Ai} – измеренное значение расхода технического фтора на *i*-ом такте управления.

Численное значение коэффициента α_v было определено путем проведения вычислительных экспериментальных исследований. Суть исследований заключалась в поиске численного значения коэффициента α_v , при котором наблюдалось наименьшее отклонение управляемой координаты САУ ПР относительно уставки. В качестве возмущения выступало изменение расхода технического фтора, представленное на рисунке 4.13.

б) блока формирования корректирующего управляющего воздействия на шнек загрузки ПР по П-закону регулирования:

$$\Delta N = K_{V_A} \cdot X_{1i}, \tag{4.31}$$

где K_{V_A} – коэффициент передачи регулятора контура компенсации САУ ПР.

Определение коэффициента K_{V_A} производилось из условия инвариантности управляемой координаты САУ ПР, представленной на рисунке 4.2, относительно возмущения:

$$C_{F_2}(s) = W_{\Pi P}^f(s) \cdot V_A(s) + W_K(s) \cdot W_{\Pi P}^u(s) \cdot V_A(s) = 0.$$
(4.32)

Условие (4.32) выполняется, если передаточная функция компенсирующего звена примет вид:

$$W_{K}(s) = -\frac{W_{\Pi P}^{f}(s)}{W_{\Pi P}^{u}(s)}.$$
(4.33)

Близость динамических свойств по каналам управления и возмущения объясняется тем, что ввод полупродукта шнеком загрузки и ввод технического фтора организуется в одну часть ПР. Ввиду этого, регулятор контура компенсации был представлен пропорциональным звеном, коэффициент передачи которого определяется выражением (4.34).

$$W_{K}(s) = K_{K} = -\frac{K_{\Pi P}^{f}}{K_{\Pi P}^{u}},$$
 (4.34)

где $K_{\Pi P}^{f}$ – коэффициент передачи моделей ПР по каналу возмущения.

Принципиальным отличием модернизированного алгоритма компенсации, от разработанного ранее является то, что входным сигналом П-регулятора является не прямая разность текущего и предыдущего измеренных значений расхода технического фтора, а разность между текущими измеренным и сглаженным значениями расхода технического фтора.

4.5 Контур стабилизации концентрации фтора на выходе ПР

Введение в САУ ПР контура компенсации влияния нестабильности расхода технического фтора предполагает оперативную коррекцию управляющего воздействия на шнек загрузки ПР, что ужесточает требования к выбору цикла управления. В инженерной практике синтеза САУ сформированы рекомендации, позволяющие рассчитать длительность цикла управления по формуле [91, 92, 93]:

$$\Delta t = \frac{T_{\Pi P}^{u}}{15 \div 50} = \frac{55}{15 \div 50} = 1,1 \div 3,67 \tag{4.35}$$

С учетом рекомендаций (4.35), а также технических возможностей САУ ПГУ цикл управления был изменен с 10 с на 2 с.

149

Снижения величины цикла управления САУ ПР, привело к существенной колебательности управляющего воздействия, рассчитываемого цифровым ПИДрегулятором. Это объясняется тем, что в законе регулирования использовалась идеальная Д-составляющая, являющаяся чувствительной к изменению цикла управления. Решением данной проблемы послужила коррекция ПИД-закона закона регулирования, заключающаяся в замене в его структуре идеального дифференцирующего звена инерционно-дифференцирующим звеном:

$$W_R(s) = K_R + \frac{K_R}{T_{\rm H} \cdot s} + \frac{K_R \cdot T_{\rm J} \cdot s}{T_{\rm \Phi} \cdot s + 1}$$
(4.36)

где K_R – коэффициент передачи регулятора САУ ПР, $\frac{\text{об/мин}}{\% \text{ об.}}$;

 $T_{\rm H}$ – постоянная времени интегрирования регулятора САУ ПР, с;

 $T_{\rm д}$ – постоянная времени дифференцирования регулятора САУ ПР, с;

 $T_{\rm \Phi}$ – постоянная времени инерционно-дифференцирующего звена.

С учетом модернизации Д-составляющей алгоритм цифрового управления ПР по отклонению принимает вид (4.37) [91, 92].

$$\begin{split} N_{\Pi H \square I i} &= q_{0} \cdot N_{\Pi H \square I i-1} + q_{1} \cdot N_{\Pi H \square I i-2} + q_{2} \cdot \varepsilon_{i} + q_{3} \cdot \varepsilon_{i-1} + q_{4} \cdot \varepsilon_{i-2}, \\ q_{0} &= 1 + e^{-\frac{\Delta t}{T_{\Phi}}}; \quad q_{1} = -e^{-\frac{\Delta t}{T_{\Phi}}}, \\ q_{2} &= K_{R} \cdot \left(1 + \frac{\Delta t}{2 \cdot T_{H}} + \frac{T_{\Pi}}{\Delta t} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_{\Phi}}}\right)\right), \\ q_{3} &= K_{R} \cdot \left(-1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_{\Phi}}} + \frac{\Delta t}{2 \cdot T_{H}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_{\Phi}}}\right) - 2\frac{T_{\Pi}}{\Delta t} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_{\Phi}}}\right)\right), \\ q_{4} &= K_{R} \cdot \left(e^{-\frac{\Delta t}{T_{\Phi}}} \left(1 - \frac{\Delta t}{2 \cdot T_{H}}\right) + \frac{T_{\Pi}}{\Delta t} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_{\Phi}}}\right)\right). \end{split}$$
(4.37)

В литературе известны различные способы определения T_{ϕ} , большая часть из которых сводится к тому, что величина T_{ϕ} есть некоторая доля от $T_{Д}$ (от 0,1 до 1) [91, 94, 95]. Для САУ ПР T_{ϕ} была принята равной 0,55 · $T_{Д}$. Ранее разработанный алгоритм перерасчета коэффициента передачи модели ПР выполнялся с периодом 1 час. Проведенные исследования динамики изменения статических и динамических параметров модели ПР, рассчитанных с использованием производственных данных по выражениям (4.28) и (4.23), выявили потребность адаптации параметров модели ПР с периодом не более 8

Период перерасчёта параметров настройки регуляторов контуров стабилизации и компенсации разработанной САУ ПР, был принят равным периоду перерасчёта параметров модели ПР. Расчет параметров настройки регулятора контура стабилизации производится по критерию оптимального модуля [39] согласно следующим выражениям:

мин [96]. В результате был выбран цикл равный 7 мин.

$$T_{\rm H} = \frac{180 \cdot \left(\frac{T_{ob}^{u}}{\tau_{ob}^{u}}\right)^{4} + 240 \cdot \left(\frac{T_{ob}^{u}}{\tau_{ob}^{u}}\right)^{3} + 135 \cdot \left(\frac{T_{ob}^{u}}{\tau_{ob}^{u}}\right)^{2} + 42 \cdot \left(\frac{T_{ob}^{u}}{\tau_{ob}^{u}}\right) + 7}{15 \cdot \left(2 \cdot \left(\frac{T_{ob}^{u}}{\tau_{ob}^{u}}\right) + 1\right) \cdot \left(6 \cdot \left(\frac{T_{ob}^{u}}{\tau_{ob}^{u}}\right)^{2} + 3 \cdot \left(\frac{T_{ob}^{u}}{\tau_{ob}^{u}}\right) + 1\right)} \right)$$

$$T_{\rm II} = \frac{60 \cdot \left(\frac{T_{ob}^{u}}{\tau_{ob}^{u}}\right)^{4} + 60 \cdot \left(\frac{T_{ob}^{u}}{\tau_{ob}^{u}}\right)^{3} + 27 \cdot \left(\frac{T_{ob}^{u}}{\tau_{ob}^{u}}\right)^{2} + 7 \cdot \left(\frac{T_{ob}^{u}}{\tau_{ob}^{u}}\right) + 1}{180 \cdot \left(\frac{T_{ob}^{u}}{\tau_{ob}^{u}}\right)^{4} + 240 \cdot \left(\frac{T_{ob}^{u}}{\tau_{ob}^{u}}\right)^{3} + 135 \cdot \left(\frac{T_{ob}^{u}}{\tau_{ob}^{u}}\right)^{2} + 42 \cdot \left(\frac{T_{ob}^{u}}{\tau_{ob}^{u}}\right) + 7}$$

$$K_{R} = \frac{1}{K_{\rm IIP}^{u}} \cdot \frac{1}{\frac{2 \cdot \tau_{ob}^{u}}{T_{\rm H}} \left(\frac{T_{ob}^{u}}{\tau_{ob}^{u}} + 1\right) - 2}.$$
(4.38)

4.6 Производственные испытания системы автоматического управления пламенным реактором

Проверка качества работы САУ ПР производилась согласно программы производственных испытаний № 60-05/1144 от 25.05.2012. Согласно плану

испытаний были проведены мероприятия по сопоставлению обеспечиваемого качества управления САУ ПР с контуром компенсации нестабильности расхода технического фтора и без него. Результаты сопоставления приведены на рисунках 4.15÷4.16.



Рисунок 4.15 – Экспериментальные данные реакции концентрации фтора на нестабильность расхода технического фтора без алгоритма компенсации

Из рисунков 4.15÷4.16 видно, что при близких к равным условиях, выраженных в импульсном изменении расхода технического фтора на 12 %, САУ ПР с контуром компенсации обеспечивает лучшую динамическую точность. Подтверждением этому служит рассчитанное среднее квадратическое отклонение σ, которое составило 2,75 % об. и 0,7 % об. для переходных процессов без контура компенсации и с ним.

Помимо этого, согласно плану испытаний, проверке подлежал модернизированный ПИД-регулятор с Д-составляющей, представляющей собой инерционно-дифференцирующее звено. Производственные данные отражающие





условия работы узла фторирования в момент переключения с исходного на модернизированный контур стабилизации концентрации фтора на выходе ПР приведен на рисунке 4.17.

Из графика 4.17 видно, что при переключении на модернизированный контур стабилизации, содержащий Д-составляющую в законе регулирования в виде инерционно-дифференцирующего звена, существенно сократились колебания частоты вращения шнека загрузки. При этом качество управления повысилось, о чем свидетельствует снижение среднего квадратического отклонения σ с 1,21 % об. до 0,83 % об.

Результаты предварительных и производственных испытаний, доказывающие положительный эффект от использования составляющих разработанной САУ ПР как в переходных режимах, так и при нормальной эксплуатации, представлены в следующих документах:

- протокол предварительных испытаний алгоритма и программного



t₁ – момент переключения с ПИД-регулятора содержащего идеальную Д-составляющую на модернизированный ПИД-регулятор

Рисунок 4.17 – Экспериментальные данные отражающие поведения технологических переменных в момент переключения с исходного на

модернизированный конур стабилизации САУ ПР

обеспечения управления аппаратом ПР с блоками адаптации к изменяющимся запаздыванию и коэффициенту передачи ПР, № 60-05/1120 от 23.05.2012;

– протокол производственных испытаний алгоритма и программного обеспечения управления аппаратом ПР с блоками адаптации к изменяющимся запаздыванию и коэффициенту передачи ПР, № 60-05/2084 от 05.0902012.

По результатам предварительных и производственных испытаний разработанная САУ ПР была включена в опытную эксплуатацию. Согласно программе проведения опытной эксплуатации (№ 60-05/1324 от 15.06.2012), испытывалось совместное включение контуров компенсации, адаптации и стабилизации в непрерывном режиме работы.

Результаты опытной эксплуатации отражены в протоколе № 60-05/2912 от 04.12.2012. Фрагменты экспериментальных исследований, проведенных на СЗ СХК, отражены на рисунках 4.18÷4.19.



t₁ – момент переключения с исходной на модернизированную САУ ПР; σ_C – среднее квадратическое отклонение концентрации фтора на выходе ПР от своего математического ожидания
 Рисунок 4.18 – Экспериментальные данные, отражающие момент переключения с

исходной САУ ПР на модернизированную

Как видно из рисунков 4.18÷4.19 использование модернизированной САУ ПР повысило стабильность ТП ПГУ, что подтверждается снижением средних квадратических отклонений концентрации фтора (σ_C) на выходе ПР и температуры реакционной зоны аппарата ВСУ (σ_T). Численные значения величин σ_C и σ_T приведены на рисунках 4.18÷4.19. Аналогичные исследования в рамках опытной эксплуатации САУ ПР были проведены на других временных участках. Результаты сведены в таблицы 4.6 и 4.7.

В качестве критериев оценки качества управления использовались рассчитанные на 6 часовом интервале следующие показатели: количество вмешательств оператора в процесс управления, количество переходов на ручной режим управления, средние квадратические отклонения концентрации фтора на выходе ПР и температуры центральной части реакционной зоны аппарата ВСУ.





с исходной САУ ПР на модернизированную

Таблица 4.6 – Показатели качества работы исходной САУ ПР, рассчитанные на интервале 6 часов

Дата	Ко-во ручных вмешательств, шт.	Ко-во переходов на ручной режим, шт.	σ _C , % об.	σ <i>τ</i> , °C	Статическая ошибка регулирования, % об.
19.04.12	14	3	4,96	68,1	1,21
20.04.12	21	2	2,30	79,4	0,43
21.04.12	30	3	1,18	30,9	-0,01
24.04.12	13	0	2,42	52,8	-0,23
25.04.12	14	2	2,12	40,6	0,06
26.04.12	24	6	3,20	62,3	0,50
Среднее	19	3	2,7	56,7	0,33

Таблица 4.7 – Показатели качества работы модернизированной САУ ПР, рассчитанные на интервале 6 часов

Дата	Ко-во ручных вмешательств, шт.	Ко-во переходов на ручной режим, шт.	σ _C , % οб.	σ <i>_T</i> , °C	Статическая ошибка регулирования, % об.
17.10.12	7	2	0,95	37,4	0,14
18.10.12	7	0	1,15	31,2	0,01
19.10.12	9	0	1,31	34,1	0,01
20.10.12	3	0	1,68	47,4	-0,03
21.10.12	2	1	1,60	36,2	0,06
22.10.12	6	0	1,55	41,0	0,12
23.10.12	5	0	1,69	46,2	-0,02
24.10.12	2	0	1,24	29,3	-0,02
25.10.12	6	0	1,30	34,9	0,03
26.10.12	7	0	0,86	21,0	-0,02
27.10.12	7	0	0,88	18,4	-0,04
29.10.12	2	0	1,45	25,0	-0,02
30.10.12	0	0	1,37	44,2	0,11
Средняя	5	0	1,31	34,3	0,03

Численные значения рассчитанных показателей доказывают положительный эффект от использование разработанной адаптивной комбинированной САУ ПР. Использование модернизированной САУ ПР существенно снизило участие оперативно-технологического персонала СЗ СХК, а также обеспечило соответствие предъявляемым требованиям к динамической точности, сформулированным в подразделе 4.1.

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

4.7 Выводы по главе

В результате проведенных исследований были 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 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.

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.

Задача адаптации динамических свойств ПР решалась путем разработки метода активной идентификации в замкнутом контуре управления. Разработанный метод идентификации позволяет по реакции объекта управления в замкнутом контуре на ступенчатое изменение управляющего воздействия, рассчитывать параметры модели, представляющей собой инерционное звено первого порядка с запаздыванием.

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

Исследования по идентификации параметров модели ПР по производственным данным выявили ограниченность его использования в

автоматическом режиме по причине необходимости выбора благоприятного момента времени для запуска процедуры идентификации, что требует дополнительных исследований.

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

Разработанный контур компенсации основного возмущающего воздействия обеспечивает расчет корректирующего управляющего воздействия на шнек загрузки ПР пропорционально сигналу рассогласования текущих измеренного и сглаженного величин расхода технического фтора.

Апробация модернизированной САУ ПР проводилась на СЗ СХК. Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований САУ ПР выявил соответствие обеспечиваемого ей 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 алгоритмы управления ПР вошедшие в состав модернизированной САУ ПР были приняты в промышленную эксплуатацию на СЗ СХК, что подтверждается актом внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа содержит результаты исследований возможности повышения эффективности действующего на СЗ СХК производства гексафторида урана за счет совершенствования АСУ протекающими в нем технологическими процессами.

СХК Действующее ПГУ на состоит ИЗ двух взаимозависимых технологических линий (оксидная и тетрафторидная), каждая из которых включает аппараты фторирования, десублимации и улавливания. Ввод в твердофазного технологическую схему исходного сырья (ТФУ. ЗОУ. полупродукт) осуществляется через шнеки загрузки аппаратов первой и второй ступеней улавливания двух технологических линий, а технический фтор распределяется аппаратами фторирования автономной АСУ. между Взаимозависимость технологических линий выражается в том, что выгружаемый из аппаратов ВСУ полупродукт распределяется между двумя технологическими линиями контейнерным способом.

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

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 послужил оптимизирующий программный модуль ПГУ «ОПМ адекватности «ОПМ ПГУ» подтвердила достоверность ПГУ». Проверка получаемых на нем результатов, отклонение результатов расчетов, «ОПМ ПГУ», произведенных на экспериментальных OT данных не превысило 6 %.

159

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

Разработана динамическая математическая модель ПГУ, состоящего из двух ПГУ технологических линий. Модель описывает системы импульсного пневмотранспорта, исполнительные и регулирующие органы, автоматическое переключение загрузи полупродукта бункеры, В дискретность пневмотранспортной передачи полупродукта из узла выгрузки аппарата ПСУ в бункер загрузки ПР, динамику перемещения полупродукта по 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 ПГУ. была модель 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 первой САУ 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. Вторая САУ обеспечивает стабилизацию на требуемом уровне суммарного количества полупродукта, накопленного в транспортных контейнерах, за счет коррекции управляющих воздействий на шнеки загрузки аппаратов ВСУ обеих линий. Третья САУ, 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. Анализ результатов исследований подтвердил, что поставленная перед автоматизированной системой согласования загрузок задача, удержания в допустимом диапазоне управляемых переменных, в условиях близких к производственным, выполняется. Максимальные динамические ошибки регулирования приведенные к допустимым диапазонам не превысили 20 %.

Для синтеза систем автоматической стабилизации стехиометрических коэффициентов избытка ОУ над ценными улавливаемыми в аппаратах ВСУ двух

технологических линий компонентами разработана динамическая пространственно-распределенная модель АУ.

Кинетика процессов улавливания ценных компонентов на ЗОУ описана законом действующих масс в кинетической форме, что позволило учесть влияние термо- и гидродинамических режимов работы АУ на скорость протекания химических реакций улавливания. Погрешность адекватности разработанной кинетической составляющей модели АУ данным, полученным на лабораторной установке, составила менее 10 %.

Исследование термодинамики химических реакций улавливания позволило выявить функциональную зависимость тепловых эффектов реакций от температуры реакционной зоны и состава газа, поступающего на улавливание.

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.

Проверка адекватности модели АУ действующей установке проводилась путем расчета приведенных среднеквадратических отклонений, рассчитываемых по модели и измеренных на аппарате ВСУ температур реакционной зоны на высотах установки термопар. Приведенные к средним значениям температур, каждой из контролируемых зон, погрешности адекватности, рассчитанные на пяти интервалах времени, не превысили 5 %, что является достаточным для ее 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 ОУ над ценными улавливаемыми компонентами обеих линий. Проведенные в программном комплексе Matlab исследования доказали, что в случае нестабильности массового расхода фтора на входе АУ, использование предлагаемых систем управления

существенно снижает отклонение коэффициентов избытка от требуемых значений: в оксидном аппарате ВСУ на 53 %; а в тетрафторидном аппарате ВСУ на 72 %. Достигнутый результат свидетельствует о повышении эффективности улавливания ценных компонентов из хвостового газа и целесообразности внедрения систем автоматической стабилизации коэффициентов стехиометрического избытка ОУ над ценными улавливаемыми компонентами хвостового газа на C3 CXK.

В результате проведенных исследований были 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 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.

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.

Задача адаптации динамических свойств ПР решалась путем разработки метода активной идентификации в замкнутом контуре управления. Разработанный метод идентификации позволяет по реакции объекта управления в

замкнутом контуре на ступенчатое изменение управляющего воздействия, рассчитывать параметры модели, представляющей собой инерционное звено первого порядка с запаздыванием. Вычислительные экспериментальные разработанного алгоритма идентификации исследования 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, описывающих зависимость постоянной времени и времени запаздывания модели ПР от измеряемых на производстве величин: частоты вращения шнека загрузки ПР, расхода технического фтора на входе ПР и концентрации фтора на выходе ПР.

Разработанный способ компенсации основного возмущающего воздействия, обеспечивает В отличие ОТ классического, 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 раза по сравнению с ранее используемым.

Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований САУ ПР выявил соответствие обеспечиваемого ей 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.

Внедрение модернизированной САУ ПР на СЗ СХК, позволило снизить количество урансодержащих оборотов требующих дополнительной переработки, сократить количество внеплановых остановок технологического оборудования, повысить качество управления всем производственным комплексом, а также увеличить межремонтный пробег аппаратов фторирования, десублимации и двух ступеней улавливания. Экономический эффект от внедрения системы составил 7,3 млн. руб. в год.

Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре ЭАФУ ТПУ, что подтверждается актом внедрения. Предложенный «Способ активной идентификации технологических объектов в замкнутом контуре управления» включен в раздел «Методы построения динамических моделей промышленных объектов» и в методические указания к 2-м лабораторным работам по учебному курсу «Статистические методы контроля и управления», а также в раздел «Методы математического описания элементов и систем автоматического управления» по курсам «Теория автоматического управления» и «Средства автоматизации и приборы контроля химического производства».

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»» и рекомендованы к производственным испытаниям на СЗ СХК.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Андреев, Г. Г. Фторидные технологии в производстве ядерного топлива [Текст] : монография / Г. Г. Андреев, А. Н. Дьяченко. – Томск : Изд-во Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 152 с. : ил.

2 Bacher W. Jacob E. Uranium hexafluoride - Chemistry and technology of a raw materials of the nuclear fuel cycle. - LA -tr - 85 - 86, 1986; 1982; Chem - Ztg. 1982, y. 106, №. 3, s 113 - 136.

3 Delannoy J., Faron R. Conversion of concentrates containing uranium hexafluoride. – For presentation at Uranium – 82 12-th Annual Hydrometallurgical Meeting, Toronto, Ontario, Canada, Aug. 29 – Sept. 1, 1982.

4 Атомная энергетика в России [Электронный pecypc] : tvel.ru. – URL : http://www.tvel.ru/wps/wcm/connect/tvel/tvelsite/about_atomic/atomic_in_rus/ (дата обращения : 21.04.2015).

5 Солонин, М. И. Состояние и перспективы развития ядерного топливного цикла мировой и российской ядерной энергетики [Текст] / М. И. Солонин // Атомная энергия. – 2005. – Т. 98. – № 6. – С. 448–451.

6 Международное состояние и перспективы ядерной энергетики [Электронный pecypc] : prad-media.ru. – URL : http://prad-media.ru/prospects-of-nuclear-power/ (дата обращения : 21.04.2015).

7 Конверсия – узкое горлышко ЯТЦ [Электронный ресурс] : atominfo.ru. – URL : http://www.atominfo.ru/news5/e0042.htm (дата обращения : 29.04.15).

8 Paзделительно-сублиматный комплекс [Электронный pecypc] : tvel.ru. – URL : http://www.tvel.ru/wps/wcm/connect/tvel/tvelsite/about/structure/ RS_complex/ (дата обращения : 21.04.2015).

9 Конверсия на СХК: новый завод по производству гексафторида урана [Электронный pecypc] : sdelanounas.ru. – URL : http://sdelanounas.ru/blogs/33956/ (дата обращения : 21.04.2015). 10 Маслов, А.А. Технология урана [Текст] : учебное пособие / А. А. Маслов, Г. В. Каляцкая, Г. Н. Амелина. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 98 с.

11 Галкин, Н. П. Технология урана [Текст] / Н. П. Галкин, Б. Н. Сударников, У. Д. Верятин. – М. : Атомиздат, 1964. – 310 с. : ил.

12 Маслов, А. А. Технология урана и плутония [Текст] : учебное пособие / А. А. Маслов [и др.]. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 144 с. : ил.

13 Зуев, В. А. Гексафториды актиноидов [Текст] / В. А. Зуев, В. Т. Орехов.
– М. : Энергоатомиздат, 1991. – 240 с. : ил.

14 Тураев, Н. С. Химия и технология урана [Текст] / Н. С. Тураев, И. И. Жерин. – М. : Издательский дом «Руда и металлы», 2006. – 396 с. : ил.

15 Моделирование аппарата улавливания с реактором комбинированного типа [Текст] : отчет о НИР (промежуточ.) : ТПИ ; рук. Дядик В. Ф. ; исполн.: Береза В. Н., Кузнецов А. И., Онищук А. Н. – Томск, 1976. – 105 с. – № ГР МФ 6392. – Инв. № 3331.

16 Автоматизированная система управления узлом улавливания II производства Сублиматного завода [Текст] : отчет о НИР (промежуточ.) : ТПИ ; рук. Дядик В. Ф. ; исполн.: Береза В. Н., Онищук А. Н., Росликова Н. Ю. – Томск, 1978. – 143 с. – № ГР МФ 9981. – Инв. № 3480.

17 Исследование статических и динамических характеристик пламенного реактора как объекта автоматизированного управления [Текст] : отчет о НИР (промежуточ.) : ТПИ ; рук. Дядик В. Ф. ; исполн.: Онищук А. Н, Ливенцов С. Н., Савосина О. Д. – Томск, 1981. – 68 с. – № ГР МФ 14289. – Инв. № 3608.

18 Разработка автоматизированной системы управления узлом фторирования производства гексафторида урана [Текст] : отчет о НИР (заключ.) : ТПИ ; рук. Дядик В. Ф. ; исполн.: Онищук А. Н., Ливенцов С. Н., Савосина О. Д. – Томск, 1980. – 191 с. – № ГР ???. – Инв. № 3610.

19 Разработка типовых алгоритмов управления технологическими процессами и АСУ качеством гексафторида урана с усовершенствованием отдельных стадий производства [Текст] : отчет о НИР (заключ.) : ТПИ ; рук.

Дядик В. Ф. ; исполн.: Тотьменинов М. Е. [и др.]. – Томск, 1989. – 120 с. – № ГР МФ 23483. – Инв. № 4097.

20 Вильнина, А. В. Разработка системы автоматизированного управления узлом десублимации [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Вильнина Анна Владимирована. – Томск, 2008. – 136 с.

21 Байдали, С. А. Система автоматизированного управления комплексом аппаратов фторирования и улавливания производства гексафторида урана [Текст]
: дис. ... канд. техн. наук / Байдали Сергей Анатольевич. – Томск, 2010. – 181 с.

22 Надеждин, И. С. Разработка математической модели производства гексафторида урана [Текст] / И. С. Надеждин, Н. С. Криницын, И. Р. Кубенский // Современные 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.

23 Куропаткин, П. В. Оптимальные и адаптивные системы [Текст] : Учеб. пособие для вузов. – М. : Высш. Школа, 1980. – 287 с. : ил.

24 Бесекерский, В. А. Робастные системы автоматического управления [Текст] / В. А. Бесекерский, А. В. Небылов. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 240 с. : ил.

25 Петров, Б. Н. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами [Текст] : Инженерные методы анализа и синтеза / Б. Н. Петров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1986. – 256 с. : ил.

26 Ротач, В. Я. Автоматизация настройки систем управления [Текст] / В. Я. Ротач [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 272 с. : ил.

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

28 Надеждин, И. 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.

29 Дядик, В. Ф. 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.

30 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.

31 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.

32 Козлов, В. Н., Управление энергетическими системами. Теория автоматического управления [Текст] / В. Е. Куприянов, В. Н. Шашихин ; под ред.
В. Н. Козлова. – СПб : Изд-во политехн. ун-та, 2008. – 255 с. : ил.

33 Чепелев, С. А. Методы синтеза систем автоматизированного управления технологическими процессами производства и переработки синтетических каучуков в нештатных ситуациях [Текст] : дис. ... д-р техн. наук / С.А. Чепелев. – Воронеж, 2003. – 366 с.

З4 Слинько, М. Г. Методы моделирования каталитических процессов на аналоговых и цифровых вычислительных машин [Текст] / М. Г. Слинько,
В. С. Бесков, В. Б. Скоморохов. – Новосибирск: Наука, 1972. – 150 с. : ил.

35 Дериглазов, А. А. 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.

36 Фролов, А. Г. Исследование процесса улавливания фтора, фтороводорода и гексафторида урана из хвостовых технологических газов сублиматного производства в реакторе комбинированного типа на окислах урана [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Фролов Александр Гаврилович. – Томск, 1973. – 197 с.

37 Дядик, В. Ф. Теория автоматического управления [Текст] : учебное пособие / В. Ф. Дядик, С. А. Байдали, Н. С. Криницын. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 196 с. : ил.

38 Шарков, А. А. Автоматическое регулирование и регуляторы [Текст] /
 А. А. Шарков, Г. А. Притыко, Б. В. Палюх. – М. : Химия, 1990. – 228 с. : ил.

З9 Гурецкий, Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием [Текст] / Х. Гурецкий ; перевод с польского А. Н. Дмитриев. – М. : Машиностроение, 1974. – 328 с.

40 Дубровный, В. А. Справочник по наладке автоматических устройств контроля и регулирования [Текст] : в 2 ч. : ч. 2 / В. А. Дубровный [и др.]. – М. : Химия, 1990. – 940 с.

41 Андреев, Г. Г. Разработка и внедрение аппаратов со свободной противоточной газовзвесью в технологии гексафторида урана [Текст] : дис. ... д-р техн. наук / Андреев Генрих Георгиевич. – Томск, 1997. – 408 с.

42 Береза, В. Н. Исследование аппарата улавливания фтористого водорода, фтора и гексафторида урана как объекта управления и разработка функционального обеспечения АСУ ТП узла улавливания сублиматного производства [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Береза Валентин Николаевич. – Томск, 1978. – 203 с.

43 Эйгенсон, Л. С. Моделирование [Текст] / Л. С. Эйгенсон. – М. : Советская наука, 1952 – 389 с. : ил. 44 Плановский, А. Н. Процессы и аппараты химической технологии [Текст] : учебник для техникумов / А. Н. Плановский, В. М. Рамм, С. З. Каган. – Изд. 5-е, стереотипное. – М. : Госхимиздат, 1962. – 848 с. : ил.

45 Пушнов, А. Аэродинамика воздухоочистительных устройств с зернистым слоем [Текст] : монография / Александр Пушнов [и др.] ; перевод с литовского Н. Гилите. – Вильнюс : Техника, 2010. – 348 с. – ISBN 978-9955-28-643-1.

46 Романков, П. Г., Гидромеханические процессы химической технологии [Текст] / П. Г. Романков, М. И. Курочкина. – перераб. и доп. – Ленинград : Химия, 1982. – 288 с. : ил.

47 Гельперин, Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] / Н. И. Гельперин, 1981. – 384 с. : ил. – (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии : в двух книгах / Н. И. Гельперин ; книга первая).

48 Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии государственное научно-техническое издательство химической литературы [Текст] / А. Г. Касаткин. – 7-е изд. – М. : Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1961. – 829 с. : ил.

49 Палов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии [Текст] : учеб. пособие для вузов / К.Ф.Палов, П. Г. Романков, А. А. Носков ; под ред. чл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л. : Химия, 1987. – 576 с. : ил.

50 Тодес, О. М. Аппараты с кипящим зернистым слоем [Текст] : гидравлические и тепловые основы работы / О. М. Тодес, О. Б. Цитович. – Л. : Химия, 1981. – 296 с. : ил.

51 Овчинников, Н. Л. Сушка и обжиг в кипящем слое [Текст] : учеб. пособие / Н. Л. Овчинников, Л. Н. Овчинников, С. В. Натареев. – Иваново : Издво ГОУВПО Иван. гос. хим.- технол. ун-та., 2009. – 106 с. : ил. – ISBN 978-5-9116-0326-2.

52 Семиохин, И. А. Физическая химия [Текст] : учебник / И. А. Семиохин.
 – М. : Изд-во МГУ, 2001. – 272 с. : ил. – ISBN 5-2110-3516-Х.

53 Панченков, Г. М. Химическая кинетика и катализ [Текст] : Учебное пособие для вузов / Г. М. Панченков, В. П. Лебедев. – М. : Химия, 1985. – 592 с.

54 Семиохин, И. А. Физическая химия [Текст] : Учебник / И. А. Семиохин. – М. : Изд-во МГУ, 2001. – 272 с. – ISBN 5-211-03516-Х.

55 Вейник, А. И. Техническая термодинамика и основы теплопередачи [Текст] / А. И. Вейник. – М. : Металлургиздат, 1956. – 502 с. : ил.

56 Годнев, И. Н. Физическая химия [Текст] : учеб. пособие для хим.-тех. спец. вузов / И. Н. Годнев [и др.] ; под ред. К. С. Краснова. – М. : Высшая школа, 1982. – 687 с. : ил.

57 Стромберг, А. Г. Физическая химия [Текст] : учебник для хим. спец. вузов / А. Г. Стромберг, Д. П. Семченко ; под ред. А. Г. Стромберга. – 4-е изд., испр. – М. : Высшая школа, 2009. – 527 с. : ил.

58 Даниэльс, Ф. Физическая химия [Текст] / Ф. Даниэльс, Р. Олберти ; перевод с англ. под ред. К. В. Топчиевой. – М. : Мир, 1978. – 645 с. : ил.

59 Барон, Н. М. Краткий справочник физико-химических величин [Текст]
/ Н. М. Барон [и др.]; под ред. А. А. Равделя и А. М. Пономаревой. – Изд. 10-е
испр. и доп. – СПб. : Иван Федоров, 2003. – 240 с. : ил. – ISBN 5-8194-0071-2.

60 Дытнерский, Ю. И. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты [Текст] / Ю. И. Дытнерский. – М. : Химия, 1995. – 400 с. : ил. – (Процессы и аппараты химической технологии : в 2-х книгах / Ю. И. Дытнерский ; ч. 1). – ISBN 5-7245-1006-5.

61 Криницын, Н. С. Математическая модель реактора улавливания фторсодержащих 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.

62 Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения [Текст] / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Наука, 1991. – 384 с. : ил. – ISBN 5-0600-3831-9.

63 Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных [Текст] / Дж. Бендат, А. Пирсол ; перевод с англ. В. Е. Привальского и А.И. Кочубинского под ред. акад. И. Н. Коваленко. – М. : Мир, 1989. – 540 с. : ил. – ISBN 5-0300-1071-8.

64 Хасмамедов, Ф. И. Автоматизация управления трубчатыми печами [Текст] / Φ. И. Хасмамедов. – М. : Химия, 1980. – 216 с. : ил.

65 Кулаков, Г. Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования [Текст] : спр. пособие / Г. Т. Кулаков. – Мн. : Выш. шк., 1984. – 192 с. : ил.

66 Дядик, В. Ф. Статистические методы контроля и управления [Текст] : учебное пособие / В. Ф. Дядик, С. А. Байдали, Т. А. Байдали. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 144 с. : ил.

67 Ицкович, Э. Л. Алгоритмы централизованного контроля и управления производством [Текст] / Э. Л. Ицкович, Э. А. Трахтенгерц. – М. : Советское радио, 1967. – 352 с. : ил.

68 Закс, Л. Статистическое оценивание [Текст] / Л. Закс ; под ред.
Ю. П. Адлера и В.Г. Горского. – М. : Статистика, 1976. – 598 с. : ил.

69 Байдали, С. А. 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.

70 Байдали, С. А. 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.

71 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.

72 Байдали, С. А. 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.

73 Янушевский, Р. Т. Серия «Теоретические основы технической кибернетики» [Текст] / Р. Т. Янушевский. – М. : Наука, 1978. – 416 с.

74 Дейч, А. М. Методы идентификации динамических объектов [Текст] /
 А. М. Дейч. – М. : Энергия, 1979. – 240 с. : ил.

75 Эйкхофф, П. Современные методы идентификации систем [Текст] / П. Эйкхофф ; перевод с англ. под ред. П. Эйкхоффа. – М. : Мир, 1983. – 400 с. : ил.

76 Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления [Текст] : оценивание параметров и состояния / П. Эйкхофф ; перевод с англ. под ред. Н. С. Райбмана. – М. : Мир, 1975. – 687 с. : ил.

77 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.

78 Штейнберг, Ш. Е. Адаптация стандартных регуляторов к условиям
эксплуатации в промышленных системах регулирования [Текст] /
Ш. Е. Штейнберг, И. Е. Залуцкий // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2003.
– № 4. – С. 11–14.

79 Штейнберг, Ш. Е. Идентификация в системах управления [Текст] / Ш. Е. Штейнберг. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 80 с. : ил.

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

81 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.

82 Николаев, А. В. Исследование необходимости описания ТОУ 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.

83 Jorge, N. Numerical optimization [Text] / Jorge Nocedal, Stephen J. Wright.
– New York : Springer Science+BusinessMedia, 2006. – 664 p. – ISBN 0-3873-0303-0.

84 Madsen, K. Methods for non-linear least squares problems [Text] / K. Madsen, H. B. Nielsen, O. Tingleff. – Kongens Lyngby : IMM, 2004. – 58 p.

85 Извекова, Ю. В. Разработка и исследование математической модели узла фторирования производства гексафторида урана [Текст] / Ю. В. Извекова, Н. С. Криницын // Современные 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.

86 Демченко, В А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. А. Демченко. – Одесса : Астропринт, 2001. – 305 с : ил. – ISBN 9-6654-9541-0.

87 Бондарь, А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии. Основные положения, примеры и задачи [Текст] / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – Киев : Высшая школа, 1976. – 183 с.

88 Бондарь, А. Г. Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии: алгоритмы и примеры [Текст] / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха, И. А. Потяженко. – Киев : Высшая школа, 1980. – 203 с.

89 Рузинов, Л. П. Планирование эксперимента в химии и химической технологии [Текст] / Л. П. Рузинов, Р. И. Слободчикова. – М. : Химия, 1980. – 280 с.

90 Зедгинидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем [Текст] / И. Г. Зедгинидзе. – М. : Наука, 1976. – 390 с.

91 Острём, К. Системы управления с ЭВМ [Текст] / К. Острём, Б. Виттенмарк ; перевод с англ. С. П. Чеботарева. – М. : Мир, 2014. – 480 с. : ил.

92 Изерман, Р. Цифровые системы управления [Текст] ; пер. с англ. С. П. Забродина, А. И. Титкова, А. В. Шалашова. – М. : Мир, 1984. – 541 с. : ил.

93 Гибшман, Е. А. Реализация оптимальных режимов эксплуатации систем регулирования в АСУТП [Текст] / Е. А. Гибшман // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – № 6. – С. 1–6.

94 Клюев, А. С. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования [Текст] : справочное пособие / А. С. Клюев [и др.] ; под ред. А. С. Клюева. – М. : Мир, 1989. – 368 с. : ил.

95 Денисенко, В. В. ПИД-регуляторы [Текст] : вопросы реализации / Виктор Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2008. – ч.2. – № 1. – С. 86–97.

96 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.

177 **ПРИЛОЖЕНИЕ А**

Акт внедрения на СХК

СИБИРСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ

Акционерное общество «СИБИРСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ» (AO «СХК») Курчатова ул., 1, г. Северск Томской обл., 636039 Телеграф: Северск, Иртыш, 128121 Факс: (3822) 72-44-46 E-mail: shk@seversk.tomsknet.ru, http://www.atomsib.ru ОКПО 07622928, ОГРН 1087024001965 ИНН/КПП 7024029499/702450001

23.06. d015 № 60-05 Ha № OT

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального

директора АО «СХК» по

операционной деятельности директор по производству Шинкарки 2015 OMCKO

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы Криницына Николая Станиславовича

Комиссия в составе:

Председатель

и.о. директора СЗ АО «СХК»

Члены комиссии:

глав. технолог СЗ АО «СХК»

нач. участка по эксплуатации КИПиА СЗ АО «СХК» и.о. нач. ц.51 СЗ АО «СХК» А.П. Мурлышев

А.И. Рудников А.И. Руль А.В. Дворянчиков

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Автоматизированная система управления технологическими процессами производства гексафторида урана», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены на сублиматном заводе АО «СХК», в виде:

систем автоматического управления пламенными реакторами;

 оптимизирующего программного модуля производства гексафторида урана «ОПМ ПГУ». Результаты кандидатской диссертационной работы получены в рамках выполнения хоздоговоров между ФГАОУ ВО НИ ТПУ и АО «СХК»:

— № 01С/09 от 01.08.09. на выполнение НИР «Создание автоматизированной системы управления комплексом аппаратов фторирования и улавливания производства гексафторида урана;

— № 0-325/11 от 01.09.2011 г. на выполнение НИР «Совершенствование системы автоматизированного управления схемой производства ГФУ на СЗ СХК», 01.09.2011–01.09.2012 г;

— № 12-464/14У от 12.11.2012 г. на выполнение НИР «Реконструкция АСУ ТП производства гексафторида урана», 12.11.2012–10.12.2012 г;

— № 0-36/13 от 19.09.13 на выполнение НИР «Совершенствование системы управления производством ГФУ при работе двух технологических линий и разного вида сырья на сублиматном заводе ОАО «СХК»», 19.09.2013-01.11.2014.

Итоги выполнения НИР по перечисленным договорам докладывались на научно-технических советах и совещаниях специалистов сублиматного завода АО «СХК» и изложены в ряде эксплуатационно-технических документах на разработанную систему управления и программного модуля.

Комиссия подтверждает, что разработан и используется программный модуль «ОПМ ПГУ», при помощи которого проводятся вычислительные экспериментальные исследования по выявлению оптимальных величин массовых расходов твердофазных и газообразных компонентов в аппараты двух технологических линий производства гексафторида урана, что подтверждает «АКТ об использовании результатов НИОКР на ОАО «СХК»»» №60-02/7896 от 26.12.2014.

Комиссия подтверждает, что в промышленную эксплуатацию приняты системы автоматического управления пламенными реакторами, что подтверждается следующими документами:

- «АКТ об использовании результатов НИОКР на ОАО «СХК»» №60-02/1455 от 25.02.2011г. - «АКТ об использовании результатов НИОКР на ОАО «СХК»» №60-02/10553 от 26.12.2012г.

- «АКТ об использовании результатов НИОКР на ОАО «СХК»»60-02/10541от 26.12.2012

- «АКТ об использовании результатов НИОКР на ОАО «СХК»» №60-02/7896 от 26.12.2014г.

приказ о вводе в постоянную эксплуатацию (№496 от 24.09.2014).

А так же комиссия подтверждает, что результаты разработки и исследовании автоматизированной системы согласования загрузок твердофазных компонентов в аппараты двух технологических линий использованы в проектной документации «Создание нового конверсионного производства в ОАО «СХК»».

Внедрение модернизированной системы управления пламенным реактором на C3 CXK, позволило снизить количество урансодержащих оборотов требующих дополнительной переработки, сократить количество внеплановых остановок технологического оборудования, повысить качество управления всем производственным комплексом, а также увеличить межремонтный пробег аппаратов фторирования, десублимации, улавливания и доулавливания. Экономический эффект от внедрения системы составил 7,3 млн. руб. в год.

Председатель

Члены комиссии:

А.П. Мурлышев

А.И. Рудников

А.И. Руль

А.В. Дворянчиков

Савитский О.П. (55-03-53 ос. 1. 22.06.2015

180 **ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

Акт внедрения в учебный процесс



Министерство образования и науки Российской Федерации федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

АКТ

OT 19.06. 2015 No 388/18

о внедрении в учебный процесс результатов диссертационного исследования Криницына Н.С.

Комиссия в составе:

Председателя Нач. учебного отдела ФТИ

Членов комиссии: Зав. кафедрой ЭАФУ Доцента кафедры ЭАФУ Доцента кафедры ЭАФУ УТВЕРЖДАЮ Директор физико-технического института ФГАОУ ВО-НИ ТПУ О.Ю. Долматов 2015 г

Д.С. Исаченко

А.Г. Горюнова
В.Ф. Дядика
Ю.А. Чурсина

рассмотрела результаты работ выполненных при непосредственном участии сотрудника кафедры «Электроника и автоматика физических установок» (ЭАФУ) ФГАОУ ВО НИ ТПУ Криницына Николая Станиславовича и составила настоящий акт об использовании в учебном процессе на кафедре ЭАФУ их результатов, вошедших в диссертационные исследования (далее Результаты).

Комиссия подтверждает, что Результаты используются в учебном процессе на кафедре ЭАФУ ФГАОУ ВО НИ ТПУ. Разработанный в диссертации «Способ активной идентификации технологических объектов в замкнутом контуре управления» включен в раздел «Методы построения динамических моделей промышленных объектов» и в методические указания к 2-м лабораторным работам по учебному курсу «Статистические методы контроля и управления», а также в раздел «Методы математического описания элементов и систем автоматического управления» по курсам «Теория автоматического управления» и «Средства автоматизации и приборы контроля химического производства».

Председатель

Члены комиссии:

А.В. Обходский вн. 2247

Д.С. Исаченко

А.Г. ГорюновВ.Ф. ДядикЮ.А. Чурсин
181 ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

