

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**



На правах рукописи

Ефремов Евгений Викторович

**СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ
ВЫПАРНЫМИ АППАРАТАМИ АФФИНАЖНОГО СТЕНДА
АО «СИБИРСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ»**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, профессор
Ливенцов Сергей Николаевич

Томск – 2017

Оглавление

Введение.....	5
1 Выпаривание в экстракционно-кристаллизационной схеме переработки ОЯТ 14	
1.1 Экстракционно-кристаллизационный аффинажный стенд АО «Сибирский химический комбинат».....	14
1.2 Выпарной аппарат экстракционно-кристаллизационного аффинажного стенда.....	17
1.3 Выпарной аппарат как объект управления	19
1.3.1 Анализ технологического процесса выпаривания.....	19
1.3.2 Особенности конструкции аппарата и условий протекания процесса выпаривания в экстракционно-кристаллизационном аффинажном стенде	22
1.3.3 Формальная информационная модель выпарного аппарата.....	28
1.4 Выводы по разделу	32
2 Моделирование выпарного аппарата.....	34
2.1 Математическая модель выпарного аппарата как объекта управления	34
2.1.1 Обзор существующих математических моделей выпарных аппаратов	34
2.1.2 Допущения при моделировании	37
2.1.3 Математическое описание модели	39
2.1.4 Результаты математического моделирования и проверка адекватности математической модели выпарного аппарата как объекта управления.....	40
2.2 Физическая модель выпарного аппарата	46
2.3 Выводы по разделу	49
3 Система автоматического управления выпарным аппаратом.....	51

3.1	Аналитический обзор в области систем контроля и управления выпарными аппаратами	51
3.1.1	Предпосылки разработки системы управления ВА ЭКАС.....	51
3.1.2	Теоретические исследования существующих САУ выпарными аппаратами	55
3.2	Разработка системы автоматического управления выпарным аппаратом ...	60
3.2.1	Структурный синтез возможных систем автоматического управления выпарным аппаратом.....	60
3.2.2	Параметрический синтез систем автоматического управления выпарным аппаратом.....	66
3.2.3	Исследование возможных вариантов САУ выпарным аппаратом на компьютерной модели	71
3.2.4	Экспериментальная проверка вариантов САУ на физической модели	82
3.3	Выводы по разделу	85
4	Реализация системы автоматизированного управления выпарным аппаратом	88
4.1	Разработка системы измерения технологических переменных в аппаратах ядерно-безопасного исполнения.....	88
4.2	Реализация системы автоматизированного контроля и управления выпарными аппаратами аффинажного стенда СХК.....	109
4.3	Реализация математической модели выпарного аппарата и системы управления в программном комплексе КОД ТП	124
4.4	Выводы по разделу	131
	Заключение	133
	Список сокращений и условных обозначений.....	137
	Список литературы	139

Приложение А Акт приемки-сдачи системы автоматизированного управления лабораторным аффинажным стендом.....	151
Приложение Б Акт о внедрении результатов диссертационного исследования в учебный процесс.....	152
Приложение В Акт о внедрении результатов диссертационного исследования ОАО «Манотомь».....	154
Приложение Г Акт о внедрении результатов диссертационного исследования АО «Сибирский химический комбинат»	155
Приложение Д Акт о внедрении результатов диссертационного исследования АО «ВНИИНМ»	156
Приложение Е Свидетельства о Государственной регистрации программ для ЭВМ	159

Введение

Основной целью Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 годов и на перспективу до 2020 года» является разработка технологий на базе реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым ядерным топливным циклом для атомных электростанций [1].

Для достижения поставленной цели Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (ГК «Росатом») реализует на территории промышленной площадки АО «Сибирский химический комбинат» (СХК) проект «Прорыв», направленный на создание новой технологической платформы атомной отрасли с замкнутым ядерным топливным циклом и решение проблем отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО). Одно из направлений проекта – строительство опытно-демонстрационного комплекса в составе реакторной установки с пристанционным ядерным топливным циклом и комплексом по производству смешанного уран-плутониевого (нитридного) топлива для реакторов на быстрых нейтронах [2].

АО «СХК» в рамках указанного проекта выполнило работы по созданию на Радиохимическом заводе (РХЗ СХК) экстракционно-кристаллизационного аффинажного стенда (ЭКАС), созданного для отработки технологии экстракционного и кристаллизационного аффинажа смеси U-Pu-Np. Данный стенд полностью копирует экстракционно-кристаллизационное отделение модуля переработки ОЯТ, создаваемого на АО «СХК» опытно-демонстрационного энергокомплекса [3].

В рамках хоздоговорной научно-исследовательской работы «Разработка системы автоматизированного управления лабораторным аффинажным стендом, предназначенным для отработки экстракционно-кристаллизационной технологии переработки ОЯТ РУ БРЕСТ-ОД-300» сотрудники кафедры электроники и автоматики физических установок (ЭАФУ) Томского политехнического

университета (ТПУ), среди которых автор настоящей работы, разработали и внедрили математическое и программное обеспечение АСУ ТП ЭКАС СХК, включающее среди прочего математическое и программное обеспечение систем автоматизированного контроля и управления выпарными аппаратами [4, 5].

Актуальность создания систем автоматизированного контроля и управления выпарными аппаратами ЭКАС СХК обусловлена:

- высокими требованиями к обеспечению безопасности организации технологического процесса;
- уникальностью конструкции выпарного аппарата в ядерно-безопасном исполнении малых размеров, с малой производительностью и большой энергонапряженностью и отсутствием типовых решений для создания системы контроля и управления;
- сложностью применения серийных приборов контроля технологических процессов;
- сложностью управления выпарными аппаратами, с точки зрения теории управления являющихся объектами без самовыравнивания.

Степень разработанности темы исследования можно оценить, ознакомившись с работами таких авторов, как Таубман Е.И. [6, 7], Гельперин Н.И. [8], Дытнерский Ю.И. [9], Романков П.Г. и Фролов В.Ф. [10], Minton P.E. [11] и др. Большинство из них предлагают способы управления выпарными аппаратами относительно большой производительности химических, пищевых, текстильных и др. производств. Определенный вклад в разработку способов управления выпарными установками радиохимического производства внесли сотрудники кафедры ЭАФУ ТПУ. Так, под руководством Ливенцова С.Н. были проведены работы по созданию систем управления выпарными аппаратами 1-го и 2-го циклов переработки облученного ядерного топлива РХЗ СХК, а под руководством Горюнова А.Г. – по созданию систем управления процессами выпаривания реэкстракта урана установки экстракционного аффинажа

концентратов природного урана. Новым же в настоящей работе является ее направленность на исследование, разработку и внедрение системы управления уникальным объектом – выпарным аппаратом ядерно-безопасного исполнения.

Совокупность технических решений, массогабаритные показатели, производительность и положение в технологической цепочке выделяют выпарной аппарат ЭКАС СХК из ряда выпарных аппаратов химической технологии. Кроме того, конструкция и место установки аппарата таковы, что не позволяют применить существующие серийно выпускаемые промышленностью контрольно-измерительные приборы, в частности уровнемеры и концентратомеры. Указанные особенности требуют разработки новых технических решений по контролю и управлению выпарными аппаратами циркуляционного типа с вынесенными греющими камерами с электрическим обогревом, имеющих крайне малые размеры и обеспечивающих малые производительности.

В настоящей работе на основе обобщения опубликованных научных работ и собственных исследований получены новые научно-обоснованные технические решения по созданию системы контроля и управления выпарными аппаратами ядерно-безопасного исполнения, реализация которых вносит существенный вклад в развитие ядерных энерготехнологий нового поколения, а, следовательно, – в экономическое развитие, повышение экологической безопасности и обороноспособности страны.

Цель диссертационной работы заключается в создании системы автоматизированного контроля и управления выпарными аппаратами ядерно-безопасного исполнения с обеспечением автоматической стабилизации технологических переменных процесса выпаривания.

Задачи, решение которых в настоящей работе необходимо для достижения поставленной цели, могут быть объединены следующим перечнем:

- анализ выпарных аппаратов ЭКАС СХК как объектов управления;

- математическое моделирование процессов выпаривания с выбором технических решений для контроля и управления выпарными аппаратами ядерно-безопасного исполнения;

- разработка система контроля уровня и плотности выпариваемого раствора в камере разделения выпарного аппарата;

- разработка алгоритма управления выпарным аппаратом;

- техническая реализация и внедрение системы автоматизированного контроля и управления выпарными аппаратами ЭКАС СХК.

Объектом исследования в работе является технологическое оборудование экстракционно-кристаллизационного аффинажного стенда СХК в части процесса выпаривания, контрольно-измерительные приборы, алгоритмы управления, программное обеспечение автоматизированной системы управления технологическими процессами стенда.

Предметом исследования являются технологические процессы выпаривания растворов, содержащих отработанное ядерное топливо и радиоактивные отходы; математические модели выпарных аппаратов; структурный и параметрический синтез систем автоматического управления, а также автоматизированные системы управления процессами выпаривания.

Научную новизну составляют следующие результаты диссертационного исследования:

- разработана математическая модель уникального выпарного аппарата ядерно-безопасного исполнения, отличающаяся учетом электрического обогрева греющей камеры и дискретного управления отводом кубового раствора и позволяющая решать задачи синтеза систем управления, оптимизации и диагностики работы технологического оборудования;

- разработана система автоматизированного контроля и управления, отличающаяся тем, что учитывает особенности уникального аппарата и

обеспечивающая автоматическую стабилизацию технологических переменных процесса выпаривания в аппарате малого объема и малой производительности;

- усовершенствован косвенный метод измерения уровня и плотности, отличающийся тем, что система сдвоенных дифференциальных манометров и капиллярных импульсных линий, интегрированных в гибкий чувствительный элемент, позволяет контролировать технологические переменные в требуемых точках аппарата ядерно-безопасного исполнения.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке методики контроля и управления выпарными аппаратами, отличающимися от известных математическим описанием, обеспечивающим учет уникальных свойств аппарата ядерно-безопасного исполнения.

Практическая значимость работы заключается:

- в разработке и внедрении результатов диссертационного исследования в автоматизированную систему управления технологическими процессами ЭКАС СХК с обеспечением существенного снижения отрицательного влияния человеческого фактора и автоматической стабилизации технологических переменных процесса выпаривания в аппаратах ядерно-безопасного исполнения;

- в создании компьютерной модели, методик расчета и моделирования алгоритмов и систем управления, программы имитации функционирования технологических схем и систем автоматизированного управления выпарными аппаратами аффинажного производства в среде КОД ТП в рамках проекта «Прорыв» ГК «Росатом», позволяющих решать практические задачи оптимизации и диагностики технологических процессов замкнутого ядерного топливного цикла при их конструировании и испытаниях;

- в создании системы контроля уровня и плотности растворов в аппаратах ядерно-безопасного исполнения, построенной на основе изделий отечественного производства, облегчающей эксплуатацию приборов в условиях плотной компоновки аппаратов в горячих камерах новых радиохимических производств,

обладающей существенно более низкой себестоимостью и позволяющей применить ее для серийного освоения комплекса новых приборов на базе ОАО «Манотомь»;

- в применении результатов диссертационного исследования при создании учебно-лабораторного стенда для исследования методов косвенного измерения уровня, плотности и определения границы раздела фаз, предназначенного для материально-технического обеспечения нескольких учебных дисциплин подготовки специалистов по специальности 14.05.04 «Электроника и автоматика физических установок» Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Методология и методы исследования, применяемые в работе:

- целенаправленный тематический поиск по теме исследования, позволивший усилить защищаемые положения и выводы;

- метод сравнительного анализа и сопоставления результатов исследований, позволивший синтезировать критерии и цели анализа, выбрать оптимальную структуру результата исследований;

- системный подход, позволивший раскрыть многообразие проявлений изучаемого объекта, определить место предмета исследования в отрасли науки;

- проектный метод, обеспечивший целостность исследования, стадии и порядок его разработки;

- метод математического моделирования, использованный для исследования структуры, основных свойств, законов развития и взаимодействия с окружающим миром объекта моделирования;

- метод компьютерного моделирования использован для проведения серии вычислительных экспериментов на компьютере, целью которых являлись анализ, интерпретация и сопоставление результатов моделирования с реальным поведением изучаемого объекта и прогнозирование поведения объекта с различными схемами контроля и управления.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель выпарного аппарата ядерно-безопасного исполнения, позволяющая решать задачи синтеза систем управления, оптимизации и диагностики работы технологического оборудования;

- система автоматизированного контроля и управления, выпарными аппаратами ядерно-безопасного исполнения, обеспечивающая автоматическую стабилизацию технологических переменных процесса выпаривания в регламентных границах.

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждена успешным испытанием систем автоматизированного контроля и управления выпарными аппаратами ЭКАС СХК, а принятые в работе авторские решения основаны на существующих проверенных методах и методиках разработки систем управления и контроля технологических процессов. Положения диссертации базируются на анализе практики, обобщении передового опыта в области теории математического моделирования и автоматического управления. Сопоставление авторских данных и данных, представленных в независимых источниках по рассматриваемой тематике, опубликованных ранее, позволило установить их качественное и количественное совпадение. В исследованиях использованы современные методики сбора и обработки исходной информации.

Апробацию представляемая работа прошла на:

- XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2007);

- VII Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» (Томск, 2015);

- VIII Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» (Томск, 2016);

- Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2017» (Томск, 2017);

- XIX Международной конференции «Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction» (Тяньцзинь, КНР, 2017 г.).

Публикации по теме диссертационного исследования составляют перечень из 22 работ, среди которых: 2 статьи в рецензируемых научных журналах, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук и рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации; 3 статьи в зарубежных изданиях, индексируемых международной базой данных Scopus; 1 статья в издании, не относящемся к перечисленным выше; 5 тезисов докладов на международных конференциях; 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ; 7 отчетов о НИР.

Реализация результатов диссертационной работы стала возможной благодаря финансовой поддержке российских предприятий:

- договор № 0-116/14 от 14.05.2014 между ТПУ и ВНИИНМ по теме «Разработка кода оптимизации и диагностики технологических процессов (КОД ТП). Этап 2014–2016 г.», в рамках которого разработаны и внедрены модели выпарного аппарата в программные модули имитации концентрирования жидких радиоактивных отходов и экстракционно-кристаллизационного аффинажа;

- договор № 0-119/14У от 06.06.2014 между ТПУ и СХК по теме «Разработка системы автоматизированного управления лабораторным аффинажным стендом, предназначенным для отработки экстракционно-кристаллизационной технологии переработки ОЯТ РУ БРЕСТ-ОД-300», в рамках которого разработан и внедрен алгоритм контроля и управления выпарными аппаратами ЭКАС СХК;

- Государственное задание № 8.3079.2017/ПЧ Министерства образования и науки Российской Федерации и договор с индустриальным партнером

ОАО «Манотомь» № 18.14-92/2017 от 17.04.2017 по теме «Разработка интеллектуального датчика дифференциального давления с улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками для серийного освоения комплекса новых приборов стратегических отраслей Российской Федерации», в рамках которых разработана система контроля уровня и плотности растворов в аппаратах ядерно-безопасного исполнения.

Структуру диссертации образуют введение, четыре раздела, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы и шесть приложений.

1 Выпаривание в экстракционно-кристаллизационной схеме переработки ОЯТ

1.1 Экстракционно-кристаллизационный аффинажный стенд АО «Сибирский химический комбинат»

Экстракционно-кристаллизационный аффинажный стенд предназначен для проведения исследований, отработки и испытаний режимов процесса экстракционно-кристаллизационной, а также цельноэкстракционной схемы очистки растворов-имитаторов U-Pu-Np-продуктов, получаемых на пироэлектрохимическом переделе комбинированной технологии переработки нитридного топлива реакторов на быстрых нейтронах «пироэлектрохимический передел – гидрометаллургический передел».

Стенд предназначен для отработки:

- режимов и схем экстракционно-кристаллизационной очистки U-Pu-Np-продуктов пироэлектрохимической переработки нитридного топлива (согласно схеме, предложенной ВНИИНМ);

- режимов цельноэкстракционной схемы очистки U-Pu-Np-продуктов пироэлектрохимической переработки нитридного топлива (согласно схеме, предложенной РИ);

- режимов и оборудования отдельных технологических операций (колонна жидкостной хроматографии, очистка U-Pu-Np-продукта от технеция, криогенная кристаллизация);

- элементов реагентной базы экстракционных процессов переработки ОЯТ.

В состав стенда входят следующие установки и вспомогательные (обеспечивающие) технологические узлы:

- узел приготовления «теплого» имитатора смеси U-Pu-Np;
- установка экстракции;

- установка подготовки U-Pu-Np-лигатуры для кристаллизационного аффинажа;
- установка кристаллизации;
- установка получения смешанных оксидов из конечного очищенного U-Pu-Np продукта гидрометаллургической переработки [12].

На рисунке 1.1 представлена укрупненная схема, поясняющая процесс переработки растворов-имитаторов ОЯТ реакторной установки (РУ) типа БРЕСТ-ОД-300 по экстракционно-кристаллизационной технологии.



Рисунок 1.1 – Укрупненная схема аффинажного стенда отработки экстракционно-кристаллизационной технологии переработки ОЯТ РУ БРЕСТ-ОД-300

Исходный раствор-имитатор (азотнокислый раствор урана, плутония, нептуния, америция и примесных элементов с суммарной концентрацией урана и

плутония до 310 г/л, азотной кислоты – до 3 моль/л) насосом подаётся в головной экстракционный блок. Экстракция целевых компонентов производится в центробежных экстракторах ЭЦР-33. Экстрагент – 30 %-ный раствор трибутилфосфата в изопарафиновом разбавителе или аналоге. На головной операции происходит извлечение урана, плутония, нептуния и большей части технеция (до 80 %) в экстракт. Основная часть америция и продуктов деления остаются в водном потоке операции. Экстракт содержит уран, плутоний и нептуний с суммарной концентрацией до 104 г/л. Рафинат – их же с суммарной концентрацией менее 10 мг/л, а также более 99,99 % поступивших продуктов деления и америция, и 3,4 моль/л азотной кислоты.

Технологическая схема аффинажного стенда предусматривает возможность очистки U-Pu-Np-продуктов 2 способами: по схеме, предложенной ВНИИНМ, или по схеме, предложенной РИ.

В первом случае полученный в головном блоке экстракт поступает на двухстадийную сепарацию, которую проводят последовательно в сепараторе (с инертной насадкой) и колоннах жидкостной хроматографии с активной химической насадкой.

Во втором случае полученный в головном блоке экстракт, проходя через ряд экстракционных ступеней, подвергается сильнокислотной промывке от технеция и слабокислотной промывке от цезия, стронция, циркония, редкоземельных элементов, америция и гамма-активных продуктов деления.

Выделение (формирование) U-Pu-Np-лигатуры из экстракта, очищенного по одной из технологических схем, производится на трех последовательно реализуемых операциях обработкой водными растворами:

- восстановительной реэкстракцией плутония, части нептуния и остатков технеция в экстракционном блоке;
- восстановительно-комплексующей промывкой экстракта урана от остатков плутония, нептуния (технеция) в экстракционном блоке;

- финишной сепарационно-хроматографической очисткой экстракта урана от следов плутония и технеция в колоннах жидкостной хроматографии.

Выходные водные потоки перечисленных операций, объединяясь, поступают на кристаллизационный аффинаж, который включает в себя три операции:

- упаривание до требуемых кондиций по урану и плутонию с корректировкой соотношения U:Pu;

- выдержку кубового раствора при необходимой температуре (для стабилизации Pu(VI) и Np(VI)) и корректировку его состава (по HNO₃);

- кристаллизацию гексагидрата уранил-, плутонил- нептунилнитрата с противоточной промывкой кристаллов.

Конечным продуктом кристаллизационного передела является смесь промытых кристаллов с насыщенным раствором (кристаллизатом) в объемном соотношении Т:Ж = 11:9 (U,Pu,Np)O₂(NO₃)₂·6H₂O. Промытый кристаллизат U-Pu-Np-лигатуры направляют на денитрацию или смешивают при нагревании со слабокислым раствором для перевода в водную фазу и повторно используют [12].

1.2 Выпарной аппарат экстракционно-кристаллизационного аффинажного стенда

В ЭКАС применяются два выпарных аппарата (ВА): один («основной») для выпарки реэктракта U-Pu-Np-лигатуры до заданной плотности (см. рисунок 1.1), второй для выпарки рафинатов, образовавшихся на прочих участках ЭКАС. Аппараты полностью идентичны и отличаются лишь схемой включения, а также отсутствием флегмового потока на орошение тарелок в верхней части основного ВА.

Выпарной аппарат (см. рисунок 1.2) представляет собой аппарат с естественной циркуляцией раствора, с вынесенной поверхностью нагрева и электрическим обогревом.

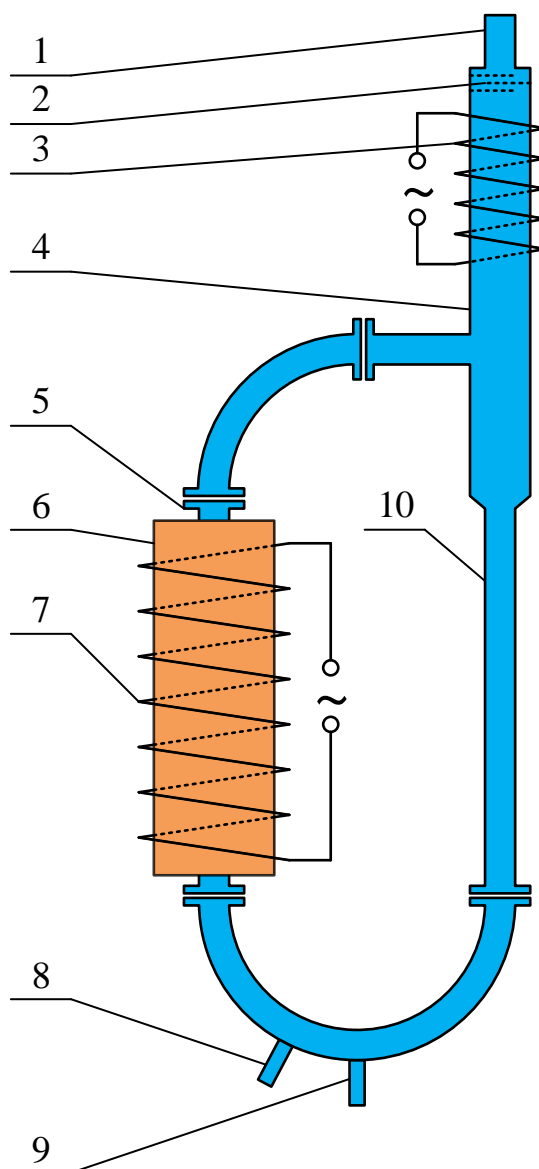


Рисунок 1.2 – Выпарной аппарат экстракционно-кристаллизационного аффинажного стенда

Упариваемый раствор подается через штуцер 8 в нижней части аппарата и увлекается движущимся раствором по направлению к греющей камере. Камера представляет собой отрезок стальной трубы 5, заключенный в медный цилиндр 6,

обогреваемый электрическим нагревателем 7. Медный цилиндр необходим для предотвращения перегрева поверхности нагрева раствора в случае аварийного опорожнения аппарата за счет существенной инерционности процессов теплопереноса. Естественная циркуляция раствора в аппарате достигается вследствие разности плотностей парожидкостной смеси в греющей камере и необогреваемой циркуляционной трубе 10, в которой парожидкостная смесь не образуется.

Пар и жидкость разделяются в обогреваемом электрическим нагревателем 3 сепараторе 4: пар отводится через патрубок 1 в верхней части, в которой для предотвращения капельного уноса упариваемого раствора с паром предусмотрены задерживающие тарелки 2, а жидкость попадает в циркуляционную трубу. По достижению необходимой плотности (кратности выпарки) упаренный раствор отводится через штуцер 9.

Отличием описанного выпарного аппарата от подобных промышленных аппаратов является его малые габаритные размеры вследствие относительно небольшого масштаба производства в защитном исполнении и обеспечения ядерной безопасности. Ниже (см. подраздел 1.3) будет показано, что это приводит к существенному осложнению процесса эксплуатации и управления ВА.

1.3 Выпарной аппарат как объект управления

1.3.1 Анализ технологического процесса выпаривания

Если раствор состоит из растворителя и растворенного в нем твердого вещества, то давление пара растворенного вещества ничтожно мало по сравнению с давлением пара растворителя. При кипении раствора испаряется практически только чистый растворитель, образуя мокрый пар. Растворенное же твердое вещество остается в растворе, повышая свою концентрацию. При этом

температура кипения растворов несколько превышает таковую у чистых растворителей [13].

Выпаривание – это процесс, заключающийся в частичном удалении растворителя путем его испарения при кипении. При этом растворитель испаряется во всем объеме кипящего раствора, что значительно интенсифицирует процесс удаления растворителя из раствора [9].

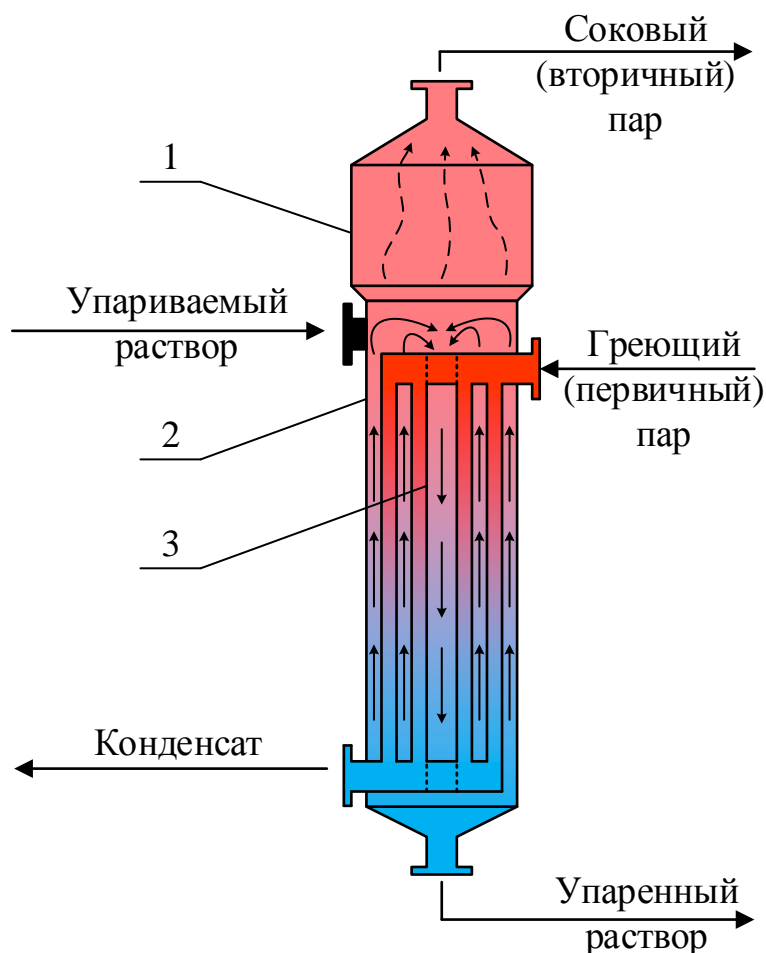
Обычно из раствора удаляют лишь часть растворителя, так как в применяемых для выпаривания аппаратах вещество должно оставаться в текучем состоянии. Для осуществления процесса выпаривания необходимо теплоту от теплоносителя передать кипящему раствору, что возможно лишь при наличии разности температур между ними (так называемая полезная разность температур) [9]. Наибольшее распространение в промышленности получили выпарные аппараты, обогреваемые конденсирующимся водяным (называемым греющим или первичным) паром, реже – топочными газами и высококипящими органическими теплоносителями, очень редко – электрическим током [8].

Основными отличиями процесса выпаривания, вследствие которых выпаривание в ряду тепловых процессов выделяют в самостоятельный раздел, заключается в особенностях его аппаратурного оформления и методе расчета выпарных установок [9].

Выпарные аппараты – это, в сущности, теплообменники, в которых раствор либо смесь жидкостей частично испаряется в результате подвода тепла. При этом образуется мокрый (называемый вторичным или соковым) пар и концентрированный раствор или, соответственно, жидкостная смесь, насыщенная компонентом с более высокой температурой кипения, – остаточная фракция. Теплопередача осуществляется у большей части выпарных аппаратов по принципу теплопроводности через разделительную стенку [13].

Отличие выпарных аппаратов от обычных теплообменников заключается в условном разделении на два узла: греющей камеры и сепаратора, предназначенного для улавливания капель раствора из пара, образующегося при

кипении раствора (см. рисунок 1.3). Для более полного улавливания в сепараторе могут быть установлены различные по конструкции брызгоуловители.



1 – сепаратор; 2 – греющая камера; 3 – циркуляционная труба

Рисунок 1.3 – Схема однокорпусной выпарной установки

Несколько отличается и расчет выпарного аппарата от расчета обычного теплообменника. Так, для определения полезной разности температур часто становится затруднительным определить температуру кипения раствора, которая зависит от концентрации раствора, давления над ним и размера греющих элементов. Кроме того, не всегда просто определить и температуру греющего пара, поскольку его давление не задается.

При расчете и моделировании работы выпарных аппаратов учитывают циркуляцию раствора, которая создается для снижения скорости отложения загрязнений (накипи) на стенках аппарата. Скорость движения раствора в трубах составляет 1–3 м/с [9].

1.3.2 Особенности конструкции аппарата и условий протекания процесса выпаривания в экстракционно-кристаллизационном аффинажном стенде

В химической и в смежных с ней отраслях промышленности применяется большое количество самых разнообразных конструкций выпарных аппаратов. Конструкция применяемого ВА зависит:

- от рода и физических свойств (вязкость, плотность, температура кипения, величина критического теплового потока и др.) упариваемого раствора и других его характеристик (кристаллизующиеся, пенящиеся, нетермостойкие растворы и др.) [14];

- от назначения ВА (получение растворенного вещества или выделение растворителя);

- от доступности теплоносителя;

- от положения ВА в технологическом процессе и пр.

Единой классификации выпарных аппаратов нет, и их обычно подразделяют по принципу действия, типу циркуляции, способу подвода тепла, характеру движения раствора и расположения зоны испарения, ориентации поверхности нагрева и другим параметрам [15].

В таблице 1.1 на основе анализа источников [6–11, 13–22] представлена информация о применяемых в промышленности ВА. Цветом выделены те из них, которые имеют для данной работы большее значение.

Таблица 1.1 – Конструкции выпарных аппаратов и особенности их применения

	Вид ВА	Достоинства и недостатки ВА, особенности его применения
Принцип действия	ВА периодического действия	<ul style="list-style-type: none"> - позволяют достичь более высоких коэффициентов теплопередачи и облегчают перекачку концентрированного вязкого раствора (после концентрирования); - используются при малых производительностях и необходимости упаривания раствора до существенно высоких концентраций;
	ВА непрерывного действия	<ul style="list-style-type: none"> - создаются условия для интенсивной циркуляции раствора (гидродинамическая структура потоков близка к идеальному смешению), поэтому концентрация раствора в них ближе к конечной, следовательно, больше вязкость и меньше коэффициент теплоотдачи от стенки к раствору; - применяются преимущественно при больших производительностях;
Вид первичного теплоносителя	ВА с паровым теплоносителем	<ul style="list-style-type: none"> - наиболее распространены; обеспечивают высокий коэффициент теплоотдачи и удобство управления (из-за постоянства температуры конденсации при данном давлении); - трудно получить высокую температуру нагрева, так как для этого требуется резко увеличить давление пара, поэтому применяют обычно до температур не более 180 °С;
	ВА с газовым теплоносителем	<ul style="list-style-type: none"> - позволяют получить высокие температуры нагрева (более 1000 °С); - неравномерный нагрев, трудность регулирования температуры, низкие коэффициенты теплоотдачи от газа к стенке;
	ВА с жидкостным теплоносителем	<ul style="list-style-type: none"> - позволяют избежать даже кратковременных перегревов; - могут быть химически-, пожаро-, взрывоопасны; - требуют специальных схем циркуляции и нагрева;
	ВА с электрическим	<ul style="list-style-type: none"> - достигается высокая равномерность нагрева при точном регулировании и широком диапазоне

	обогревом	изменения температуры; - компактны и удобны в эксплуатации и обслуживании;
Совмещение стадий нагрева и парообразования	ВА с совмещенными стадиями	- относительно просты, но скорость циркуляции невелика, поэтому коэффициенты теплопередачи относительно низкие;
	ВА с вынесенной зоной парообразования	- позволяют существенно снизить отложения на теплообменных поверхностях и увеличить коэффициенты теплопередачи;
	ВА с вынесенной поверхностью нагрева	- отличаются большими габаритами, но удобнее для ремонта и обслуживания; - тангенциальный ввод в сепаратор облегчает отделение вторичного пара от раствора; - позволяют увеличить коэффициенты теплопередачи, скорость циркуляции и уменьшить отложения на теплообменных поверхностях;
Способ организации движения раствора	ВА с естественной циркуляцией	- увеличивают коэффициент теплоотдачи со стороны кипящей жидкости и предохраняют поверхности от образования накипи; - компактны, занимают небольшую производственную площадь, удобны в эксплуатации;
	ВА с принудительной циркуляцией	- позволяют достичь более высоких кратностей циркуляции (более 2–2,5 м/с), что уменьшает отложения на поверхностях нагрева; - применяются в основном при упаривании вязких жидкостей, позволяя достичь более высокого коэффициента теплоотдачи; - требует значительных затрат энергии на привод циркуляционного насоса.

Из рисунка 1.2 видно, что ВА, применяемый в ЭКАС, относится к аппаратам с естественной циркуляцией. Это обстоятельство позволяет (в соответствии с таблицей 1.1) говорить о предохранении внутренней поверхности аппарата от образования отложений, что хорошо согласуется с требованием обеспечения ядерной безопасности (см. подраздел 1.2).

Однако для естественной циркуляции требуется выполнение двух условий:

- достаточная высота уровня жидкости в циркуляционной трубе, чтобы уравновесить столб парожидкостной смеси в греющей камере и сообщить этой смеси необходимую скорость;

- достаточная интенсивность парообразования в греющей камере, чтобы парожидкостная смесь имела возможно меньшую плотность.

При небольшом уровне жидкости в циркуляционной трубе парожидкостная смесь не может подняться до верха греющей камеры; при этом не происходит циркуляции, и работа аппарата сопровождается резким снижением производительности и быстрым покрыванием внутренней поверхности нагрева накипью. С повышением уровня жидкости возрастает скорость циркуляции и увеличивается (до известного предела) коэффициент теплопередачи [21].

Иными словами, для выполнения условий стабильного протекания процесса выпаривания необходимо обеспечить интенсивную циркуляцию и стабилизацию уровня раствора в аппарате.

С другой стороны, при интенсивном кипении раствора внутри греющей камеры капли раствора не должны уноситься из аппарата вместе с парами растворителя, так как это приводит к потере части ценного растворенного вещества, к тому же химически- и радиоактивного. Поэтому обычно верхняя крышка выпарного аппарата значительно увеличена и выполняет функции сепаратора [10].

Однако, как видно из рисунка 1.2, рассматриваемый ВА в своей верхней части расширяется незначительно. Поэтому сепарационный объем крайне мал

и, не смотря на тангенциальный ввод парожидкостной смеси в сепаратор, характерный для ВА с вынесенной греющей камерой (см. таблицу 1.1), отделение вторичного пара от жидкости может быть осложнено. Это, естественно, накладывает свои ограничения на интенсивность кипения (а значит и на скорость циркуляции) раствора.

В силу особенностей технологического процесса экстракционно-кристаллизационной переработки ОЯТ рассматриваемый выпарной аппарат, не смотря на его относительно небольшую производительность, относится к аппаратам непрерывного действия (см. таблицу 1.1). Иными словами, случаи полного выкипания раствора или полного опорожнения аппарата должны быть исключены. При эксплуатации ВА ЭКАС это обстоятельство, усугубляемое электрическим (то есть исключаящим оперативное охлаждение) характером обогрева греющей камеры, окончательно выдвигает на первый план задачи обеспечения циркуляции и стабилизации уровня раствора в аппарате.

Очевидно, что решить отмеченные задачи, а значит и достичь основной цели применения выпарного аппарата в ЭКАС: упаривание растворов до необходимой плотности, невозможно, управляя процессом выпаривания оператором вручную. Действительно, операции с химически- и радиоактивными растворами, большая энергонапряженность и быстротечность технологического процесса, а также крайне малый объем аппарата требуют оперативного и регулярного принятия управленческих решений и исключения ошибок человека-оператора. Это приводит к выводу о необходимости автоматизированного управления процессом выпаривания.

Создание автоматизированной системы управления (АСУ) любым объектом требует наличия так называемой априорной информации о самом объекте и о его входных и выходных переменных. Единственным эффективным путем получения такой информации как о вновь создаваемом объекте, так и о уже существующем является моделирование [23–25].

Создание модели объекта автоматизации, то есть формализация закономерностей функционирования объекта является важнейшей задачей

теории и практики управления. Исходной информацией при построении математической модели объекта служат данные о назначении и условиях работы объекта. Эта информация определяет основную цель моделирования и позволяет сформулировать требования к разрабатываемой математической модели. Одним из способов перехода от содержательного к математическому описанию является создание формальной информационной модели объекта [23].

1.3.3 Формальная информационная модель выпарного аппарата

Очевидно, что плотность упаренного раствора в выпарном аппарате зависит от расхода и плотности исходного раствора, а также интенсивности упаривания. Концентрация примесей, плотность и температура исходного раствора определяются предшествующими технологическими процессами и являются возмущающими воздействиями.

Интенсивность упаривания зависит от интенсивности передачи теплоты от нагревателя к греющей камере, определяемой электрической мощностью нагревателя.

Температура кипения раствора зависит от его плотности и давления пара над ним. Температура раствора должна быть стабилизирована на заданном значении, что в условиях ограничений по уносу примесей с вторичным паром, является ограничением на интенсивность процесса упаривания.

При отводе упаренного раствора из аппарата материальный баланс необходимо поддерживать, сохраняя равенство между количеством растворенного вещества, покидающим аппарат, и количеством вещества, поступающим с исходным раствором. Поэтому уровень раствора в выпарном аппарате является основным параметром процесса упаривания, так как от него

зависит тепловой и гидродинамический режим работы аппарата (см. пункт 1.3.2).

Следовательно, в отличие от плотности раствора в аппарате, управление которой напрямую соответствует цели управления, его уровень является внутренней переменной, которая должна быть стабилизирована. Очевидно, что это требует создания системы автоматического управления (САУ) уровнем (см. подраздел 3.2).

Стабилизация уровня раствора в выпарном аппарате возможна путем изменения расходов исходного и упаренного растворов, а также изменением интенсивности нагрева.

В таблице 1.2 представлены основные технологические переменные процесса упаривания реэкстракта U-Pu-Np-лигатуры в ВА ЭКАС. Особого внимания заслуживает тот факт, что ядерно-безопасное исполнение выпарного аппарата делает невозможным установку приборов измерения плотности и уровня раствора в аппарате. Поэтому указанные технологические переменные отнесены к классу неконтролируемых. По этой же причине очевидной становится необходимость решения задачи измерения и контроля уровня и плотности (см. подраздел 4.1)

Таблица 1.2 – Основные технологические переменные процесса упаривания в ВА ЭКАС

Наименование переменной	Обозначение переменной, ед. изм.	Вид переменной (воздействия)	
		по отношению к модели	по отношению к управлению
Температура раствора в аппарате	$T, ^\circ\text{C}$	выходная	управляемая (контролируется)
Уровень раствора в аппарате	$h, \text{м}$	выходная	управляемая (не контролируется)

Плотность упаренного раствора	ρ , кг/м ³	выходная	управляемая (не контролируется)
Количество теплоты, подводимое к греющей камере	Θ , Дж	входная	управляющее (контролируется)
Расход исходного раствора	Q_f , м ³ /ч	входная	управляющее (контролируется)
Расход упаренного раствора	Q_p , м ³ /ч	входная	управляющее (не контролируется)
Плотность исходного раствора	ρ_f , кг/м ³	входная	возмущающее (не контролируется)
Температура исходного раствора	T_f , °С	входная	возмущающее (не контролируется)
Расход флегмы (при наличии)	Q_r , м ³ /ч	входная	возмущающее (контролируется)
Температура флегмы (при наличии)	T_r , °С	входная	возмущающее (не контролируется)
Плотность флегмы (при наличии)	ρ_r , кг/м ³	входная	возмущающее (не контролируется)
Давление пара в камере разделения	P , Па	выходная	управляемая (не контролируется)
Расход вторичного пара	W_v , кг/ч	выходная	управляемая (не контролируется)

Основным требованием к математической модели выпарного аппарата является описание динамических связей между основными технологическими переменными с учетом динамики физических процессов, происходящих в нем.

Воспроизведение в модели динамических связей между входными и выходными переменными является необходимым для проведения

вычислительных экспериментов возможных вариантов АСУ, а изменения этих переменных должны соответствовать реальным диапазонам.

В результате, математическая модель упаривания U-Pu-Np-лигатуры в ВА ЭКАС должна:

- отражать динамику изменения уровня раствора в аппарате;
- отражать динамику изменения плотности упаренного раствора;
- отражать динамику изменения температуры раствора в аппарате;
- учитывать взаимное влияние друг на друга основных технологических переменных.

Согласно представленным требованиям модель может быть отнесена к классу детерминированных моделей. Так как модель должна отражать динамику объекта управления, то она относится и к классу непрерывных динамических моделей [26].

На рисунке 1.4 представлен состав входных и основных выходных переменных математической модели ВА ЭКАС в соответствии с установленными требованиями. Основными входными переменными модели являются объемный расход и температура исходного раствора U-Pu-Np-лигатуры, объемный расход упаренного раствора, количество теплоты, подводимое от нагревателя, а также плотность исходного раствора.

Основными выходными переменными модели являются уровень раствора в аппарате, плотность упаренного раствора, температура раствора в аппарате, расход и давление вторичного пара.

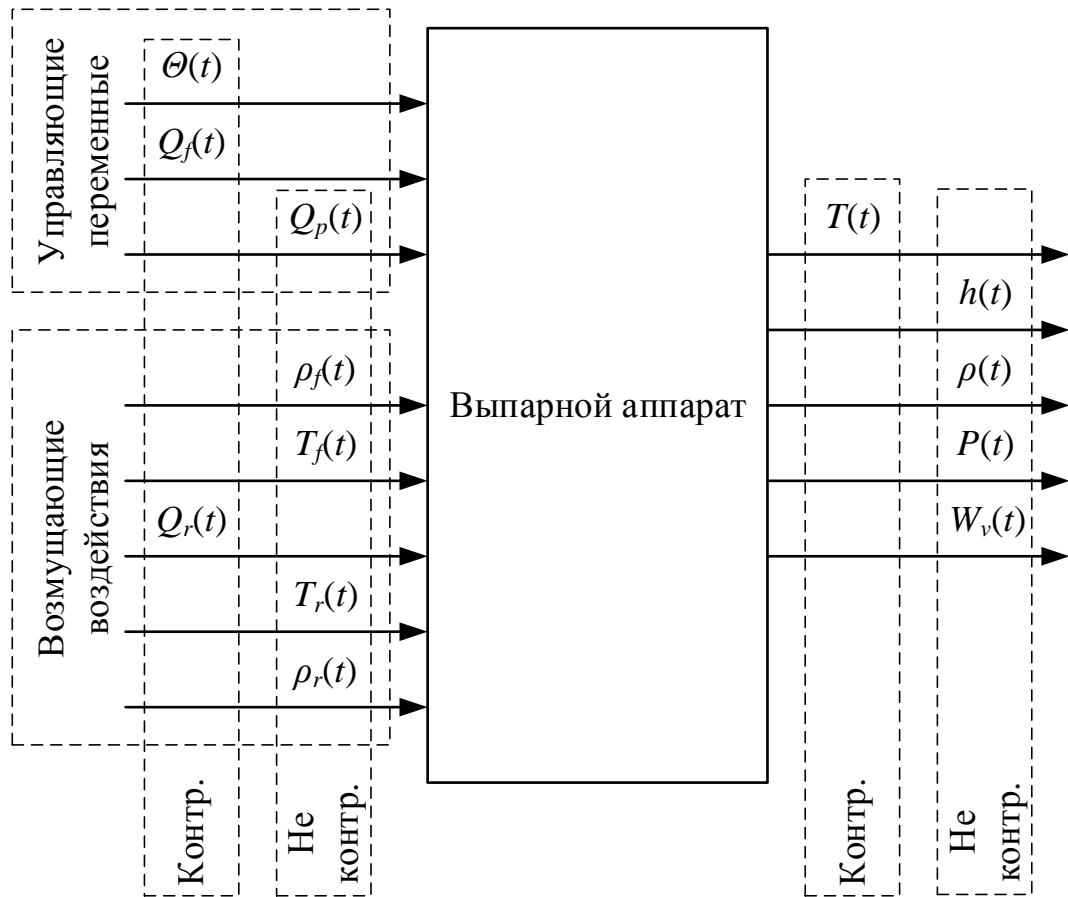


Рисунок 1.4 – Состав основных переменных компьютерной модели аппарата упаривания реэктракта U-Pu-Np-лигатуры

1.4 Выводы по разделу

1 Экстракционно-кристаллизационный аффинажный стенд АО «Сибирский химический комбинат» предназначен для отработки технологии экстракционного и кристаллизационного аффинажа смеси U-Pu-Np. В состав указанного стенда входят два идентичных выпарных аппарата: один (основной) предназначен для упаривания U-Pu-Np-лигатуры перед ее кристаллизацией, второй – для упаривания рафинатов, образовавшихся на прочих участках стенда. Оба аппарата представляют собой аппараты с естественной циркуляцией раствора, с вынесенной поверхностью нагрева и электрическим обогревом. Аппараты имеют довольно малые габаритные

размеры вследствие относительно небольшого масштаба производства в защитном исполнении и обеспечения ядерной безопасности.

2 Анализ на примере основного выпарного аппарата стенда показал, что для стабильного протекания процесса выпаривания необходимо обеспечить интенсивную циркуляцию и стабилизацию уровня раствора в аппарате. Однако в силу конструктивных особенностей существуют ограничения на интенсивность кипения (а значит и на скорость циркуляции) раствора. Кроме того, выявлено, что достижение основной цели применения выпарного аппарата – упаривание растворов до необходимой плотности – невозможно без автоматизации управления процессом выпаривания. Определена необходимость разработки системы измерения и контроля уровня и плотности раствора в выпарном аппарате.

3 Для создания АСУ процессом выпаривания принято решение о необходимости разработки математической модели выпарного аппарата. Для этого были определены основные входные и выходные переменные и предложена формальная информационная модель (см. рисунок 1.4), а в качестве управляющих воздействий выбраны расходы исходного и упаренного растворов, а также электрическая мощность нагревателя, обогревающего греющую камеру (см. таблицу 1.2).

2 Моделирование выпарного аппарата

2.1 Математическая модель выпарного аппарата как объекта управления

2.1.1 Обзор существующих математических моделей выпарных аппаратов

Математическому описанию различных типов выпарных аппаратов посвящено немало работ [27–51]. В большинстве иностранных работ описаны модели выпарных аппаратов поверхностного типа с естественной и принудительной циркуляцией, входящие в состав многокорпусных выпарных установок [34, 35, 41], однокорпусные выпарные аппараты с принудительной циркуляцией [40, 46] и с ниспадающей пленкой [36, 37, 42]. В основном рассматриваются выпарные аппараты, обогреваемые водяным паром.

Большинство моделей выпарных аппаратов строятся на базе следующих допущений:

- плотность вещества в любой точке выпарного аппарата равна плотности на выходе из него;
- вторичный пар и раствор в сепараторе находятся в термодинамическом равновесии;
- теплоемкости всех технологических потоков постоянны;
- накопление конденсата на стенках греющей камеры и сепаратора отсутствует;
- температура вещества во всех точках аппарата одинакова;
- унос жидкости паром не происходит;
- отсутствуют тепловые потери через корпус аппарата;
- процессы кристаллизации вещества не происходят.

Разработка математического описания выпарного аппарата поверхностного типа с естественной циркуляцией приведена в работах [6, 7, 34, 35, 41, 53].

Согласно данным работам можно выделить следующие основные процессы, протекающие в выпарном аппарате:

- конденсация пара в греющей камере;
- передача тепла от пара через поверхность нагрева и слои загрязнений к кипящей жидкости;
- испарение или кипение жидкости, в результате которых выделяются пары растворителя и увеличивается концентрация раствора (может сопровождаться выделением отложений на поверхности нагрева);
- отделение паров чистого растворителя от жидкости и сепарация пара.

В работе [6] математическое описание производится на основе рассмотрения этих процессов во взаимосвязи, т. е. уравнения, описывающие отдельные процессы, рассматриваются совместно.

Соответственно перечисленным процессам в выпарном аппарате условно выделяют следующие основные элементы: греющую камеру, поверхность нагрева, парожидкостное пространство.

Для описания энергетического баланса ВА в [6] используется система из трех дифференциальных уравнений, описывающих изменения температуры пара в греющей камере, поверхности нагрева и температуры парожидкостного пространства. Совместно с данными уравнениями рассматриваются еще два дифференциальных уравнения, описывающих изменение уровня и концентрации раствора в сепараторе выпарного аппарата.

Таким образом, система дифференциальных уравнений, описывающих установившиеся и переходные режимы в выпарном аппарате, полученная в [6], имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 \frac{dT_{\Pi}}{d\tau} = -a_2 T_{\Pi} + a_3 T_{\text{ПН}} + a_4 (W_s - W_{\Pi}) + a_5 (T_{\Pi}) \\ c_1 \frac{dT_{\text{ПН}}}{d\tau} = -c_2 T_{\text{ПН}} + c_3 T_{\Pi} + c_4 T \\ d_1 \frac{dT}{d\tau} = -d_2 T + d_3 T_{\text{ПН}} - d_4 W_v + d_5 \\ e_1 \frac{dh}{d\tau} = S_f - S_p - W_v \\ f_1 \frac{dC}{d\tau} = C_f S_f - C (S_f - W_v) \end{array} \right. \quad (2.1)$$

где T_{Π} , $T_{\text{ПН}}$, T – соответственно температура пара в греющей камере, поверхности нагрева, раствора в аппарате, °С;

S_f , S_p – соответственно массовый расход исходного и упаренного раствора, кг/ч;

C_f , C – соответственно концентрация исходного и упаренного раствора, кг/м³;

h – уровень раствора в аппарате, м;

W_s , W_v , W_{Π} – соответственно расход греющего пара, вторичного пара и пара на оттяжку неконденсирующихся газов, кг/ч.

Коэффициенты a_1 , c_1 , d_1 , e_1 , f_1 уравнений характеризуют инерционность выпарного аппарата соответственно по температуре пара в греющей камере, температурам поверхности нагрева, кипящей жидкости, концентрации и уровню. Остальные коэффициенты характеризуют статические свойства аппарата. Коэффициенты приведенных уравнений определяются, в частности, теплофизическими параметрами пара, воды и раствора, а также зависят от коэффициентов теплоотдачи при конденсации и кипении жидкости.

Ключевой особенностью, всех изученных работ, является то, что для описания динамики процесса выпаривания используется подход, основанный на решении совместной системы дифференциальных уравнений материального, элементного и теплового балансов. Линеаризация данных уравнений позволяет получать математические модели динамики процессов в окрестности

стационарных режимов, которые могут использоваться для решения задач синтеза регуляторов и моделирования динамики систем стабилизации.

Не смотря на отличие аппарата, рассматриваемого в [6], от ВА ЭКАС (отличаются габариты, производительность, способ обогрева греющей камеры), основой для создания математической модели ВА ЭКАС была выбрана именно модель, описанная в [6]. Данное решение продиктовано следующими причинами:

- математическое описание, представленное в [6], из всех рассмотренных является наиболее общим;
- наличие на этапе выполнения настоящей работы экспериментальных данных, необходимых для проверки адекватности модели, полученных в ходе исследования выпарного аппарата, обогреваемого водяным паром и уже оснащенного автоматизированной системой управления (см. пункт 2.1.4);
- модель достаточно просто может быть модифицирована для исследования процессов, происходящих в ВА с электрическим обогревом.

2.1.2 Допущения при моделировании

На основе анализа работ [31, 46, 51], посвященных моделированию ВА для создания САУ ВА, а также анализа работ, проведенного в пункте 1.3.1 (см. таблицу 1.1), в целях упрощения математического описания возможным является использовать сосредоточенную модель ВА. Кроме того, при качественной работе локальных контуров управления подачей греющего пара можно пренебречь возмущающими воздействиями по данному каналу.

С учетом этого была принята следующая система допущений при математическом описании ВА:

- концентрация неконденсирующихся газов в паре при нормальном отводе этих газов из греющей камеры меньше 1 %, так что их массой можно пренебречь;

- для греющей камеры выпарного аппарата термодинамическая работа равна нулю;

- изменение кинетической энергии потоков массы не происходит;

- теплоемкости металла и изоляции не зависят от температуры;

- энтальпии пара, поступающего в камеру и пара в камере равны;

- объем пленки конденсата много меньше объема греющей камеры;

- скорости изменения температуры пара и пленки конденсата равны;

- стенка греющей камеры рассматривается как сосредоточенная емкость;

- изоляция рассматривается как сосредоточенная емкость ввиду ее небольшой аккумулирующей способности;

- трубы испарителя имеют одинаковые геометрические размеры и выполнены из материала с одинаковыми теплофизическими свойствами;

- тепловой поток вдоль оси трубы отсутствует;

- все трубы испарителя воспринимают одинаковые количества тепла;

- при кипении в большом объеме и в трубах масса пара в парожидкостном пространстве значительно меньше массы жидкости;

- при исследовании переходных процессов в ВА можно пренебречь изменением количества жидкости в аппарате при фазовых переходах;

- при развитом кипении неоднородностью температуры жидкости по высоте можно пренебречь, считая этот параметр сосредоточенным;

- уносом жидкости паром можно пренебречь;

- плотность раствора это сосредоточенный параметр, равный плотности раствора на выходе из аппарата, т. е. поступающий в аппарат раствор мгновенно перемешивается с остальной жидкостью.

2.1.3 Математическое описание модели

Как правило, при построении аналитических моделей химических аппаратов математическое описание сводится к составлению уравнений материального и теплового балансов системы, базирующихся на фундаментальных законах сохранения массы и энергии [26, 54–59].

В связи с тем, что на этапе выполнения работы отсутствовала априорная информация о термодинамических свойствах упариваемого продукта, физических и термодинамические параметров греющего и сокового пара, а также необходимых данных для описания тепловых потерь в окружающую среду и т. д. потребовалось существенно упростить математическое описание.

В результате динамика материальных и тепловых потоков в аппарате описывалась следующей системой уравнений [60–63]:

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = \frac{1}{A} \cdot \left(Q_f + Q_r - Q_p - \frac{W_v}{\rho_w} \right) \\ \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{Ah} \left(W_v \left(\frac{\rho}{\rho_w} - 1 \right) - Q_f \rho_f \left(\frac{\rho}{\rho_f} - 1 \right) \right) \\ \frac{dT}{dt} = \frac{\left[W_s (i_s - i_c) + Q_f \rho_f (i_f - i) + Q_r \rho_r (i_r - i) + W_v (i_v - i) - L(T - T_{ar}) \right]}{\rho_f c_f Ah} \end{cases}, (2.2)$$

где A – площадь поперечного сечения ВА, м²;

ρ_w – плотность воды, кг/м³;

c_f – удельная теплоемкость входного раствора, кДж/(°С·кг);

W_s – массовый расход греющего пара, кг/ч;

i, i_s, i_f, i_r, i_v – соответственно энтальпия раствора в аппарате, греющего пара, исходного раствора, флегмы и вторичного пара, Дж/кг;

Массовый расход вторичного пара W_v определяется по следующему алгебраическому выражению [60–63]:

$$W_v = \frac{Q_f \rho_f c_f T_f - Q_p \rho c T + Q_r \rho_r i_r + W_s i_s}{i_v}. \quad (2.3)$$

Энтальпии греющего, вторичного пара и конденсата определяются по выражению, полученному путем аппроксимации табличных данных [60–63]:

$$\begin{aligned} i_{s,v} &= 2,5 \cdot 10^6 + 1813 \cdot T_{sat} + 0,417 \cdot T_{sat}^2 - 0,11 \cdot T_{sat}^3 + 2090 \cdot (T_{s,v} - T_{sat}) \\ T_{sat} &= \frac{2147}{(10,76 - \lg(P_s))} - 273,2 \\ i_c &= (-0,0051 \cdot T_s^2 - 1,5595 \cdot T_s + 2467,1) \cdot 10^3 \end{aligned} \quad (2.4)$$

2.1.4 Результаты математического моделирования и проверка адекватности математической модели выпарного аппарата как объекта управления

Разработанный подход и математическое описание выпарного аппарата как объекта управления было реализовано в виде компьютерной модели в пакете MATLAB/Simulink.

Для проверки качественной адекватности модели использовались результаты исследований выпарных аппаратов, где одним из объектов исследования являлась двухступенчатая выпарная установка «Единство» [6].

На рисунке 2.1 представлены переходные характеристики по уровню во втором аппарате установки «Единство», при изменении подачи питающего раствора $\Delta S_f = 1700$ кг/ч в аппарат на 62 % и соответствующий переходный режим в разработанной модели аппарата упаривания резкстракта урана.

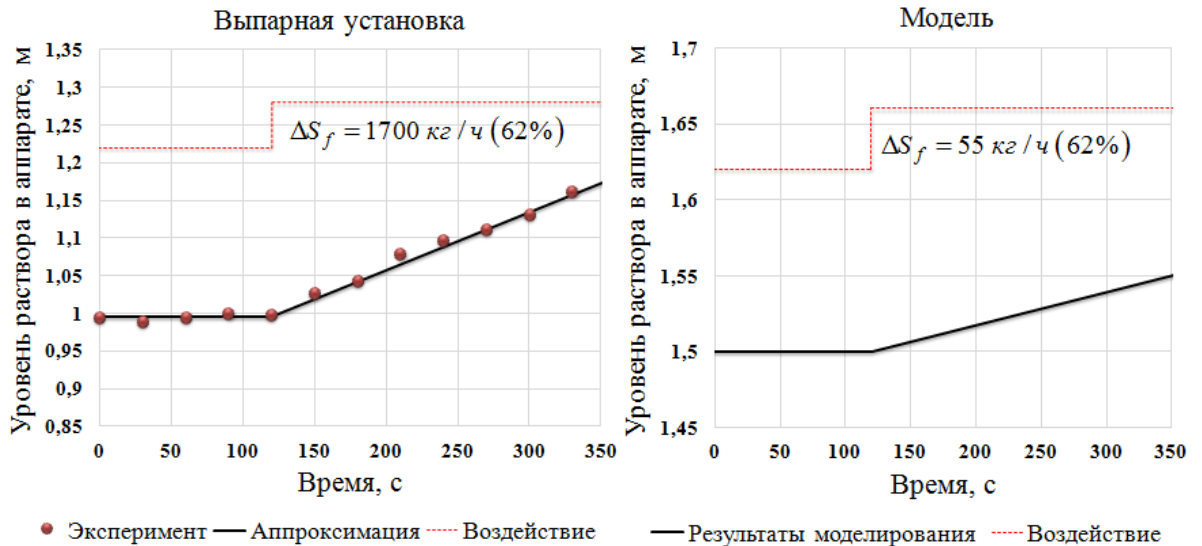


Рисунок 2.1 – Переходные процессы по уровню

Как видно из графиков, характер изменения уровня в обоих случаях идентичен, и данный канал ОУ, возможно, описать астатическим звеном.

На рисунке 2.2 представлены переходные характеристики по концентрации в первом аппарате установки «Единство», при изменении расхода жидкости на выходе $\Delta S_p = -250 \text{ кг/ч}$ из аппарата на -30% и соответствующий переходный режим в разработанной компьютерной модели ВА.

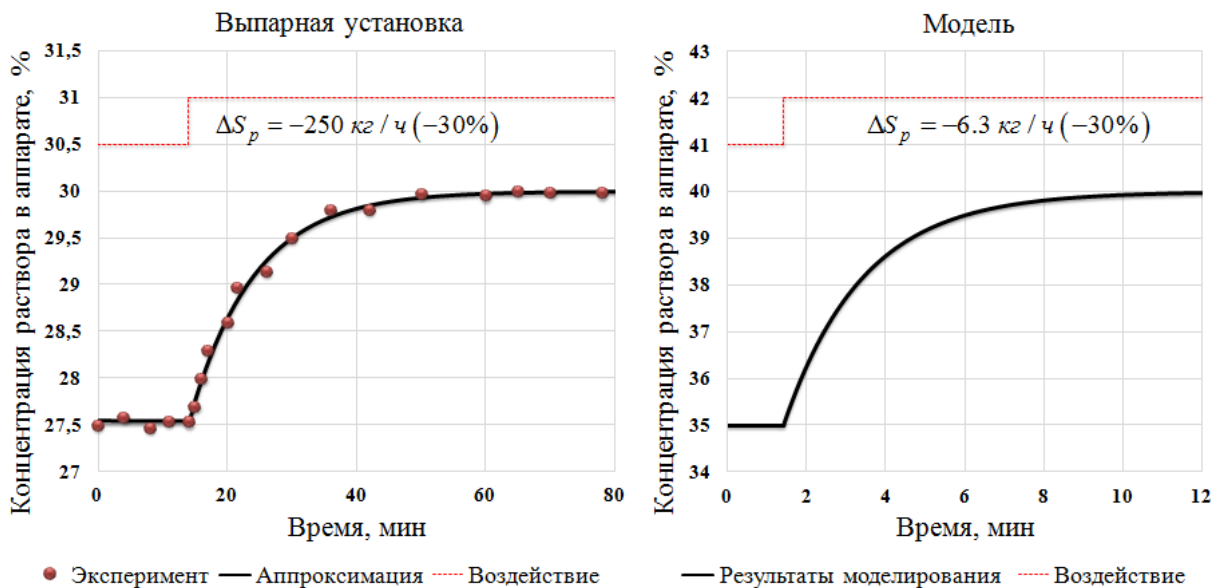


Рисунок 2.2 – Переходные процессы по концентрации

Вышеприведённые графики показывают, что переходные процессы, по концентрации, полученные с выпарной установки и в результате моделирования совпадают, на качественном уровне. Кроме того, можно заметить, что объект по данному каналу можно описать апериодическим звеном первого порядка.

На рисунке 2.3 представлены переходные характеристики по температуре раствора в первом аппарате установки «Единство», при изменении расхода греющего пара $\Delta W_s=480$ кг/ч из аппарата на 17 % и соответствующий переходный режим в разработанной компьютерной модели ВА.

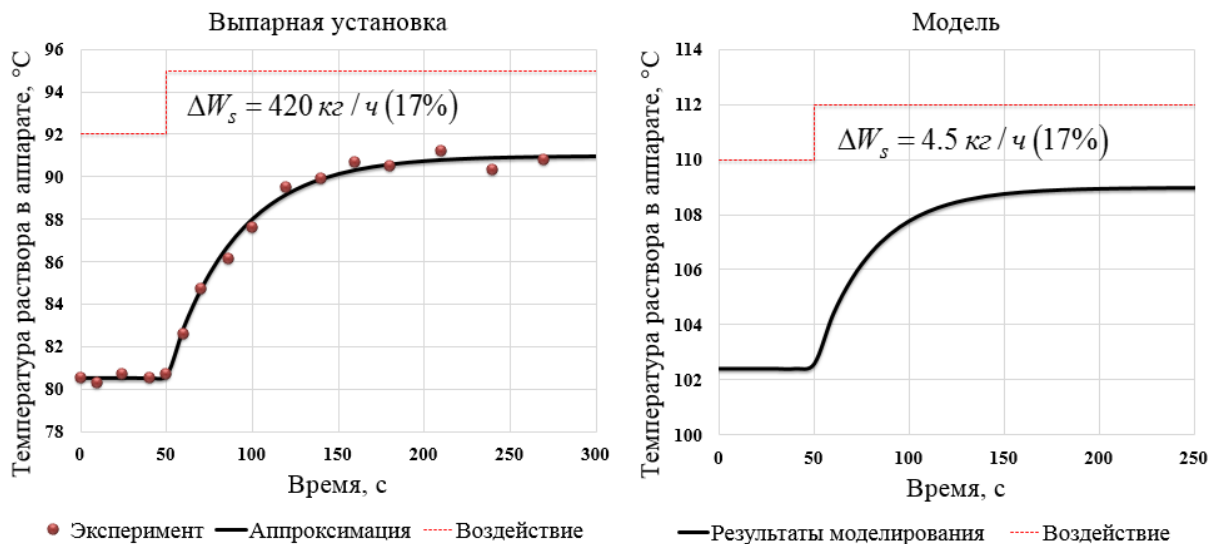


Рисунок 2.3 – Переходные процессы по температуре

Вышеприведённые графики показывают, что переходные характеристики по температуре, полученные с выпарной установки и в результате моделирования совпадают, на качественном уровне. Кроме того, можно заметить, что объект по данному каналу, так же как по концентрации, возможно, описать апериодическим звеном первого порядка.

Сравнение результатов моделирования с данными [31] показывает их качественное совпадение.

Анализ вышеприведённых переходных процессов показывает, что постоянная времени выпарных аппаратов по плотности, существенно выше

постоянных времени по уровню и температуре. Данное обстоятельство необходимо учитывать при разработке САУ выпарным аппаратом.

Проверка количественной адекватности разработанной модели проводилась по экспериментальным данным, полученным на лабораторном выпарном стенде РИ.

Данный стенд оснащен автоматизированной системой управления, реализующей два алгоритма управления.

Первый алгоритм предназначен для режима упаривания с заданной кратностью. При этом уровень кубового раствора поддерживался постоянным за счет регулирования расхода исходного раствора. В нестационарном режиме (до достижения заданной плотности раствора) кубовый раствор не сливался. В непрерывном режиме раствор сливался в количестве пропорциональном среднему расходу исходного раствора.

Второй алгоритм обеспечивал заданную плотность раствора на выходе выпарной установки в непрерывном режиме. Поддержание заданной плотности кубового раствора осуществлялся посредством расхода исходного раствора, а поддержание уровня осуществлялся посредством слива кубового раствора.

На установке был проведен следующий эксперимент. В режиме пуска выпарного аппарата после его первоначального заполнения исходным раствором и начала процесса выпарки управление процессом шло по первому алгоритму в нестационарном режиме. После достижения заданной величины плотности $\rho_{уст}=1400 \text{ кг/м}^3$, то есть выхода объекта на стационарный режим, управления осуществлялось по второму алгоритму. Если измеренная плотность кубового раствора была больше величины $\rho_{уст}$, задавался максимальный расход исходного раствора, если меньше, устанавливался минимальный расход. То есть управления осуществлялось по релейному закону.

После выхода на стационарный режим был зафиксирован переходный процесс при изменении уставки регулятора плотности от $\rho_{уст}=1400 \text{ кг/м}^3$, до $\rho_{уст}=1500 \text{ кг/м}^3$.

Аналогичный эксперимент был проведен на разработанной компьютерной модели выпарного аппарата. Экспериментальные данные и результаты моделирования приведены на рисунке 2.4.

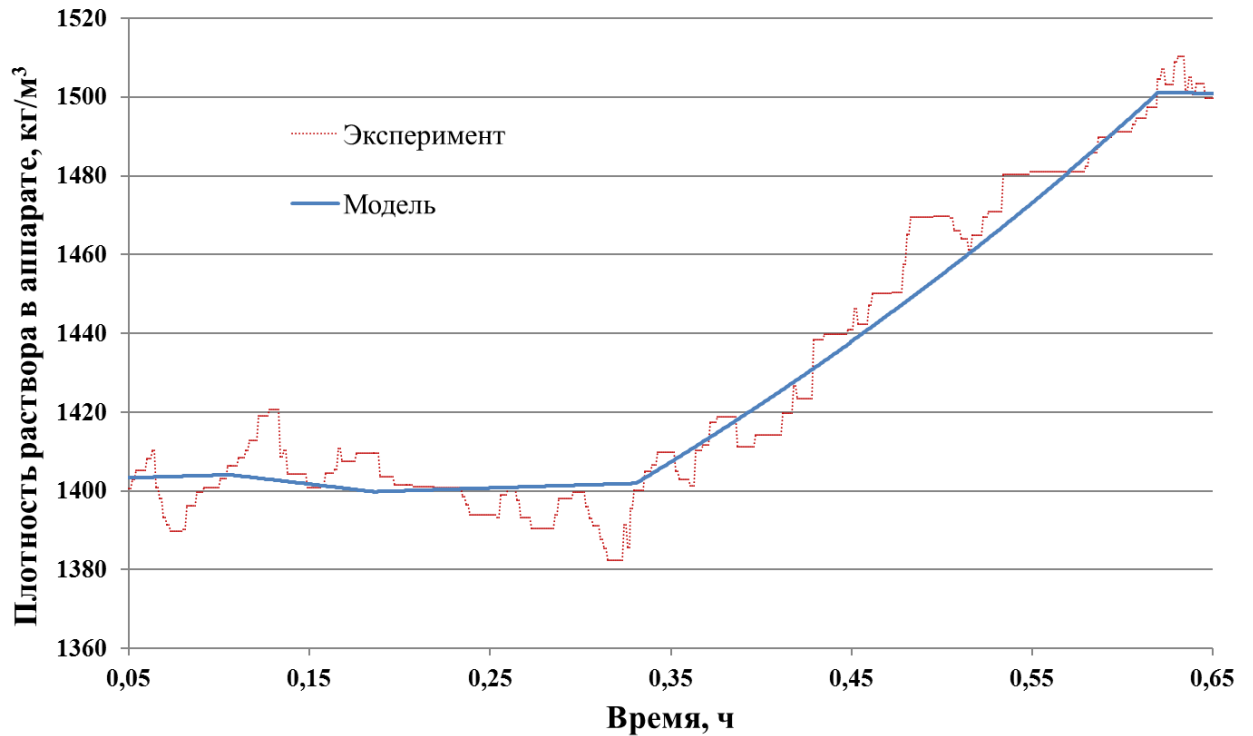


Рисунок 2.4 – Переходный процесс по плотности в лабораторном выпарном стенде и компьютерной модели

На стенде был проведен еще один эксперимент, в котором, после достижения заданной величины плотности $\rho_{уст}=1315 \text{ кг/м}^3$ ее уменьшили до значения $\rho_{уст}=1285 \text{ кг/м}^3$. Результаты эксперимента приведены на рисунках 2.5–2.7.

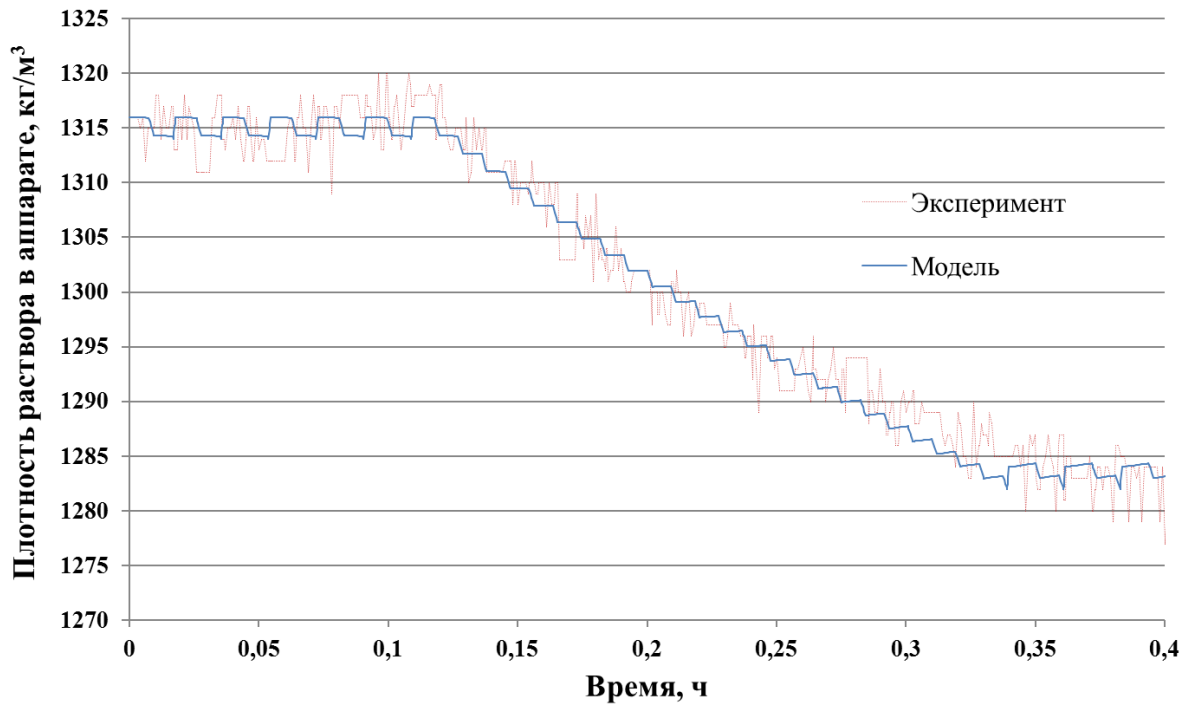


Рисунок 2.5 – Переходный процесс по плотности в лабораторном выпарном стенде и компьютерной модели

Как видно из рисунков 2.5, 2.6, переходные процессы по плотности и температуре имеют одинаковый характер изменения.

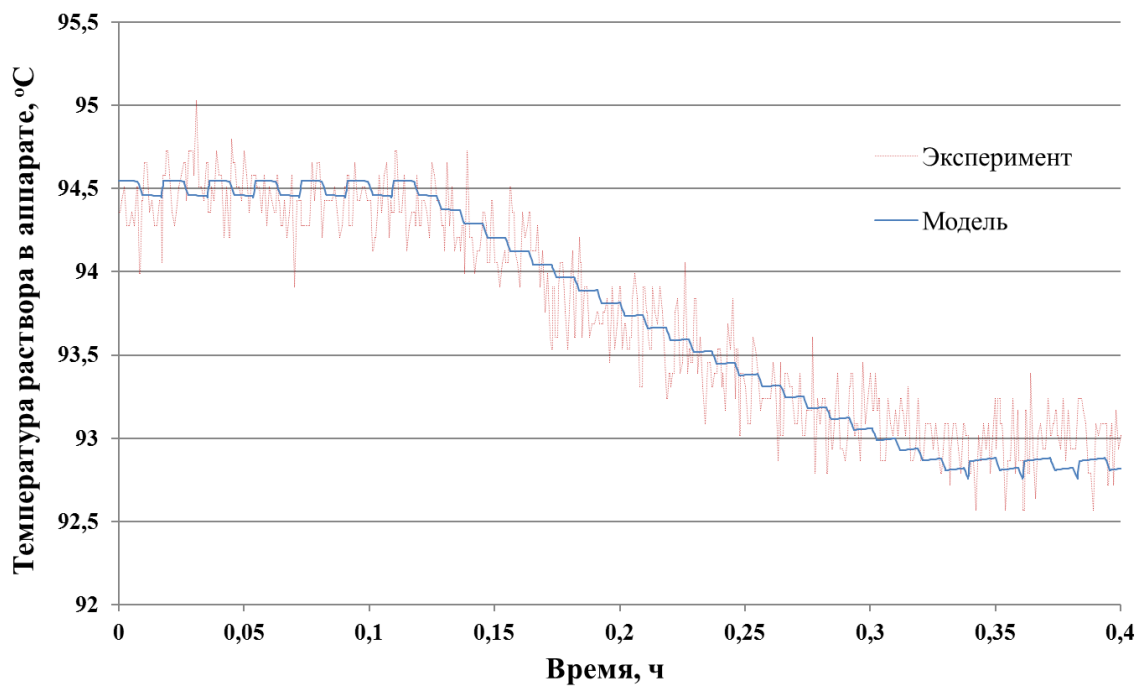


Рисунок 2.6 – Переходный процесс по температуре в лабораторном выпарном стенде и компьютерной модели

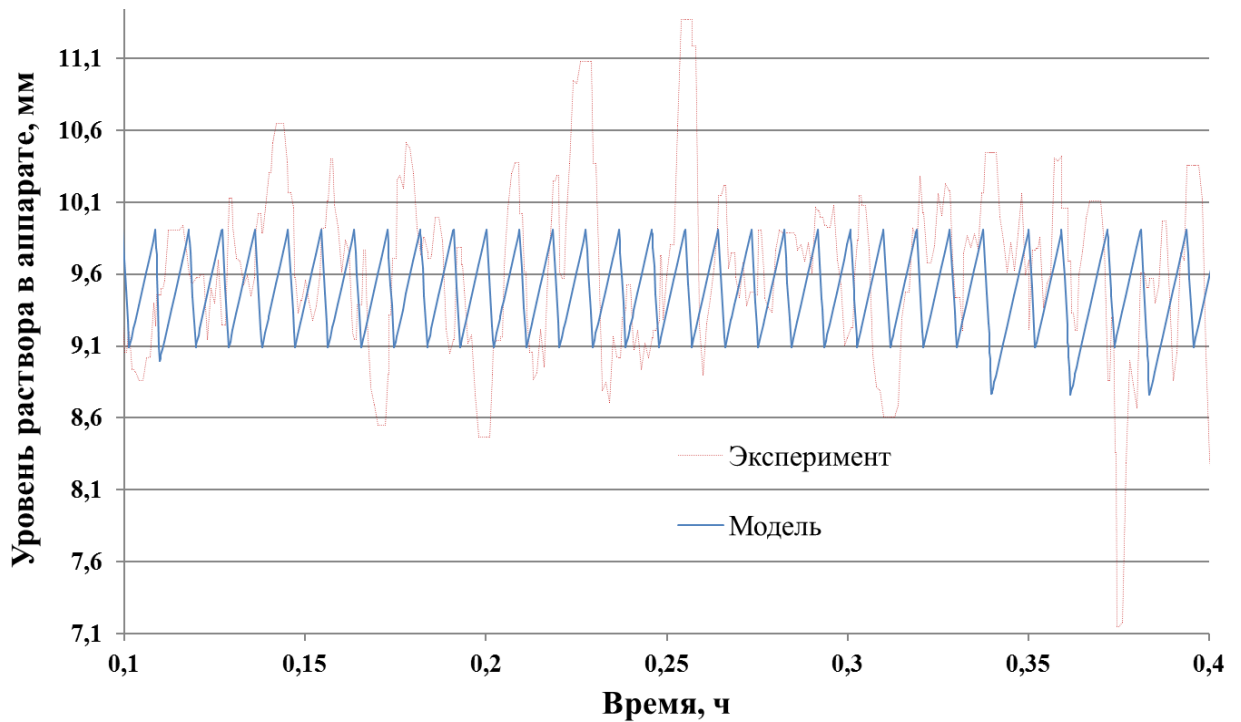


Рисунок 2.7 – Переходный процесс по уровню в лабораторном выпарном стенде и компьютерной модели

Относительные среднеквадратичные погрешности воспроизведения уровня, плотности и температуры раствора, составили менее 9 %, 5 % и 7 % соответственно.

Таким образом, в ходе работы была подтверждена качественная и количественная адекватности разработанной компьютерной модели, что позволяет использовать ее при разработке САУ ВА.

2.2 Физическая модель выпарного аппарата

Для проверки работоспособности разрабатываемой автоматизированной системы управления выпарным аппаратом (см. подраздел 3.2) было принято решение о создании лабораторного стенда, включающего в себя физическую

модель выпарного аппарата [64]. Общий вид указанного лабораторного стенда представлен на рисунке 2.8.

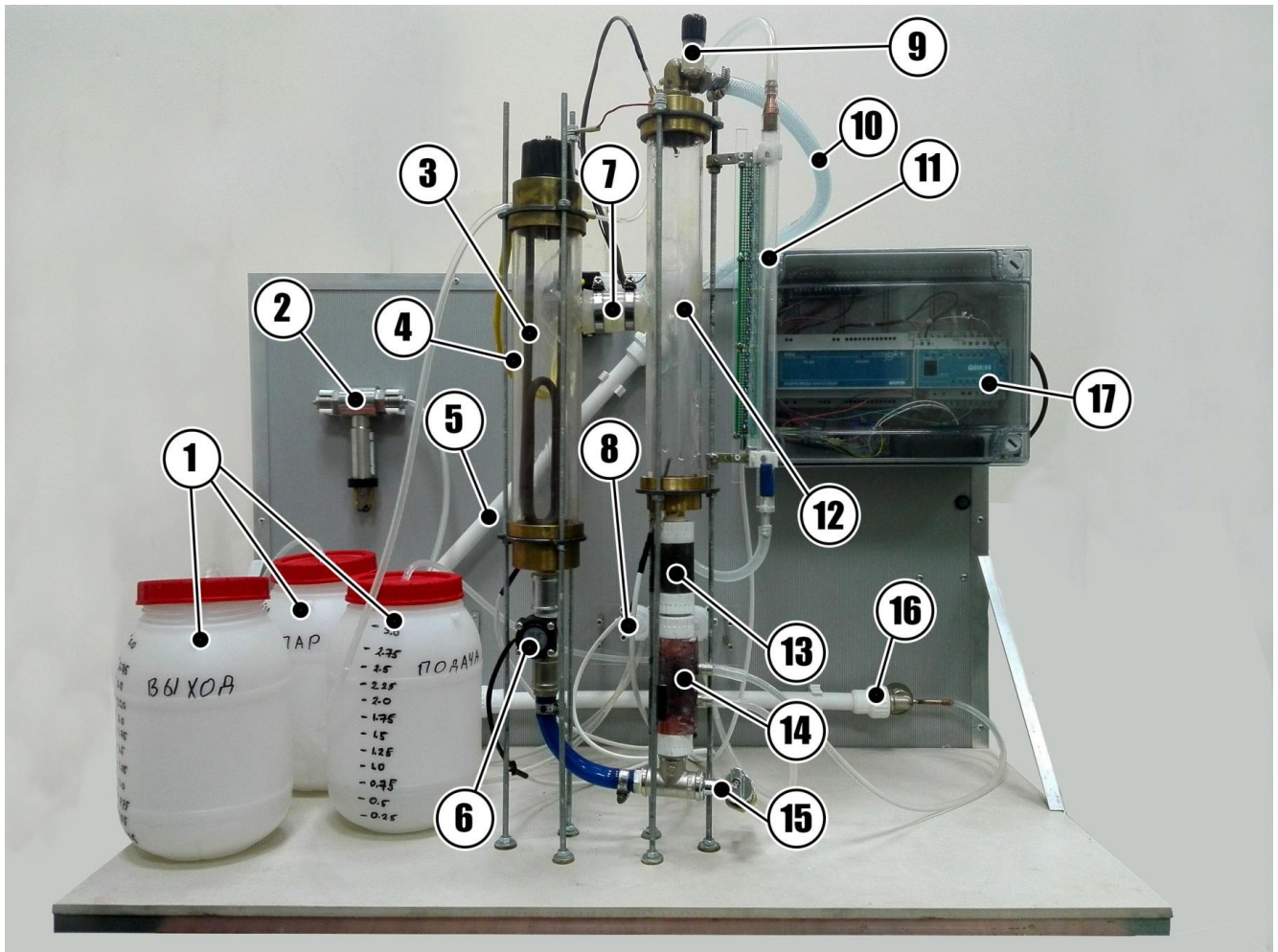


Рисунок 2.8 – Общий вид лабораторного стенда

Стенд включает в себя емкости для начального, конечного раствора и сокового пара (1). Выпарной аппарат состоит из нагревательной камеры (4), сепаратора (12), соединительного канала (7) и составного *u*-образного соединения. Внутри нагревательной камеры находится ТЭН (3). Слева от сепаратора расположен уровнемер (11). Из крышки сепаратора выходит пароотвод (10). Рядом с пароотводом расположен механический клапан аварийного сброса давления (9). *U*-образное соединение состоит из кондуктометрической ячейки (13), блока подачи и откачки (14), кран ручного слива (15), расходомера (6). На задней стенке стенда расположены: датчик

давления (2), охладитель сокового пара (5), охладитель откачиваемой жидкости (16), насосы (8) и блок электроники (17).

Структурная схема стенда представлена на рисунке 2.9.

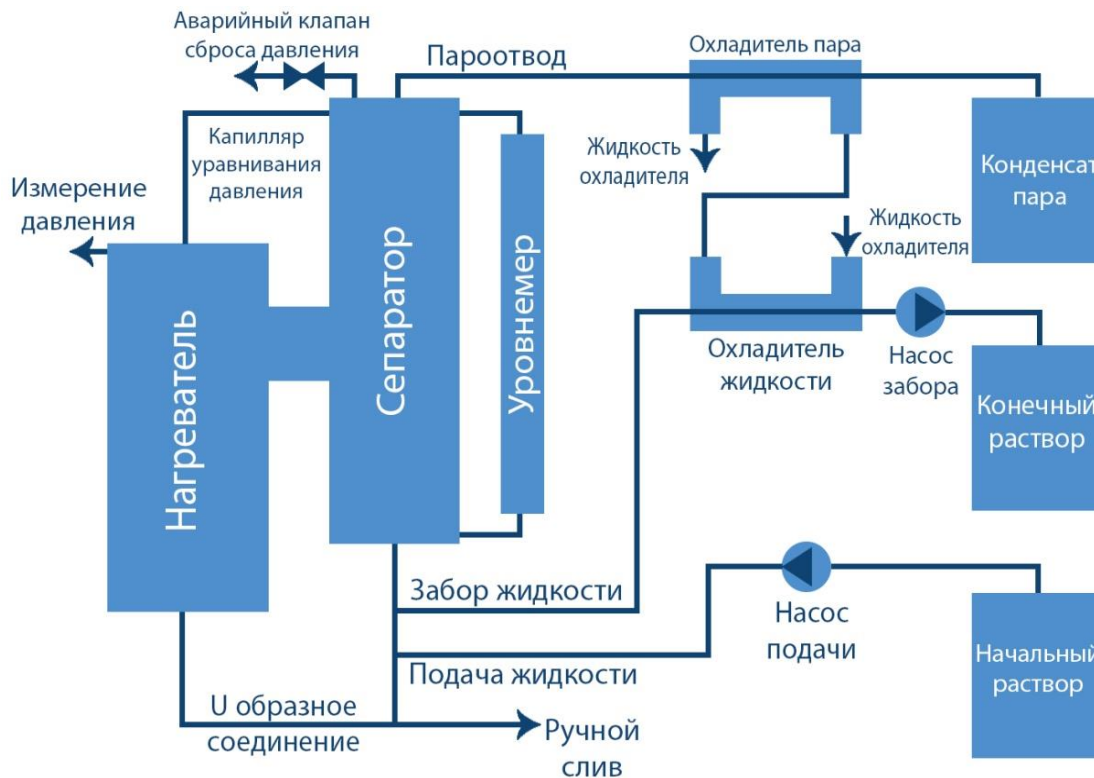


Рисунок 2.9 – Структурная схема лабораторного стенда

В процессе работы выпарного аппарата в нагревательной колбе образуется парожидкостная смесь, которая перетекает через верхний соединительный канал в сепаратор. В сепараторе данная смесь разделяется на жидкость и пар, жидкость устремляется вниз через *u*-образное соединение, что приводит к образованию циркуляции в аппарате. Пар в свою очередь, охлаждаясь в теплообменнике, оказывается в соответствующей емкости в виде конденсата. Забор жидкости из аппарата производится через теплообменник. Капилляр подачи жидкости расположен ниже капилляра забора жидкости, это сделано для того чтобы можно было производить одновременную подачу и забор жидкости, не опасаясь смешивания растворов.

Корпус выпарного аппарата выполнен из кварцевого стекла, что обеспечивает возможность визуального наблюдения происходящих в аппарате процессов. Подача исходного раствора и откачка упаренного раствора осуществляется с помощью перистальтических насосов. Стенд обеспечивает возможность измерения скорости циркуляции раствора, его концентрации, дискретного значения уровня, температуры в четырех точках аппарата. Управление нагревателем производится посредством системы импульсно-фазового управления. В целом стенд работает под управлением SCADA-системы Trace Mode, которая обеспечивает сбор данных с датчиков, управление исполнительными механизмами и делает возможным реализацию различных алгоритмов управления.

2.3 Выводы по разделу

1 В соответствии с предъявленными в разделе 1 требованиями с учетом принятых допущений, указанных в пункте 2.1.2 была разработана математическая модель выпарного аппарата для упаривания U-Pu-Np-лигатуры в ЭКАС. Модель отражает динамику изменения уровня, плотности и температуры раствора в аппарате, а также учитывает взаимное влияние друг на друга указанных технологических переменных. Модель была реализована в виде компьютерной модели в пакете MATLAB/Simulink.

2 Экспериментальные исследования компьютерной модели на предмет ее адекватности путем сравнения ее реакции на входное ступенчатое воздействие с экспериментальными данными, полученными при исследовании аналогичных установок, выявили ее качественную и количественную адекватность по воспроизведению уровня, плотности и температуры раствора с относительными среднеквадратичными погрешностями менее 9 %, 5 % и 7 % соответственно,

подтвердив тем самым возможность ее применения при разработке автоматизированной системы управления.

3 Для обеспечения возможности экспериментальной проверки работоспособности разрабатываемой автоматизированной системы управления выпарным аппаратом был разработан лабораторный стенд, включающий в себя физическую модель выпарного аппарата, оснащенный необходимыми средствами КИПиА и работающий под управлением SCADA-системы.

3 Система автоматического управления выпарным аппаратом

3.1 Аналитический обзор в области систем контроля и управления выпарными аппаратами

3.1.1 Предпосылки разработки системы управления ВА ЭЖАС

С целью определения наиболее оптимальных (с точки зрения разработки системы стабилизации) каналов управления выпарным аппаратом, была проведена серия экспериментов на созданной модели, по определению статических характеристик объекта по основным технологическим каналам:

- «тепловой поток от нагревателя (подводимая энергия к греющей камере) – плотность раствора в аппарате»;
- «тепловой поток от нагревателя – уровень раствора в аппарате»;
- «расход питающего раствора – плотность раствора в аппарате»;
- «расход питающего раствора – уровень раствора в аппарате»;
- «расход упаренного раствора – плотность раствора в аппарате»;
- «расход упаренного раствора – уровень раствора в аппарате».

Из материального баланса были определены значения для теплового потока от нагревателя, расхода питающего раствора и расхода упаренного раствора, обеспечивающие квазистационарный режим.

Так как исследуемый объект относится к классу объектов без самовыравнивания, то при определении статических характеристик, считалось, что объект находился в квазистационарном режиме, при котором изменения выходных координат не превышали 1 % от заданных значений в течение всего времени моделирования до подачи возмущающих воздействий.

На рисунке 3.1 представлена статическая характеристика изменения плотности раствора в аппарате $\Delta\rho$ при изменении подводимой энергии к греющей камере ΔW_s от заданного значения, полученного из материального баланса (нулевой уровень на графике).

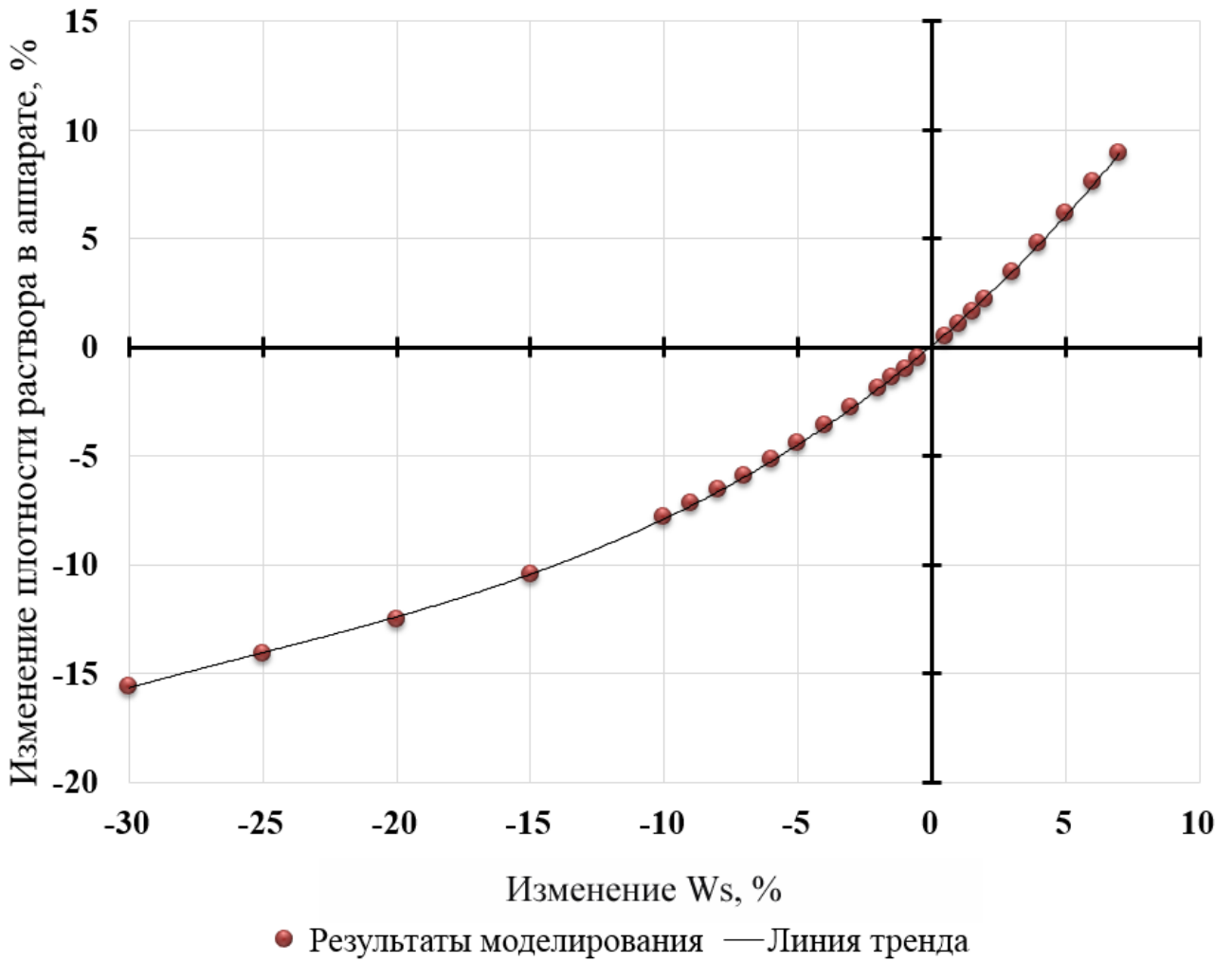
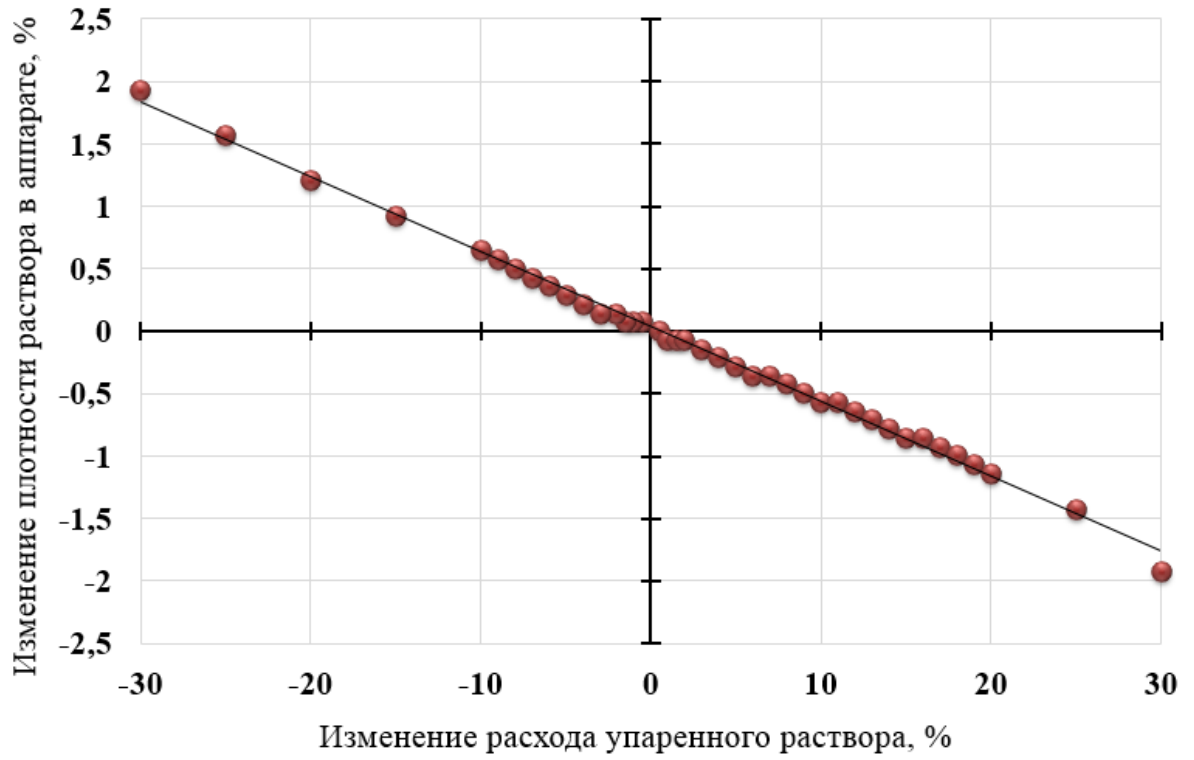
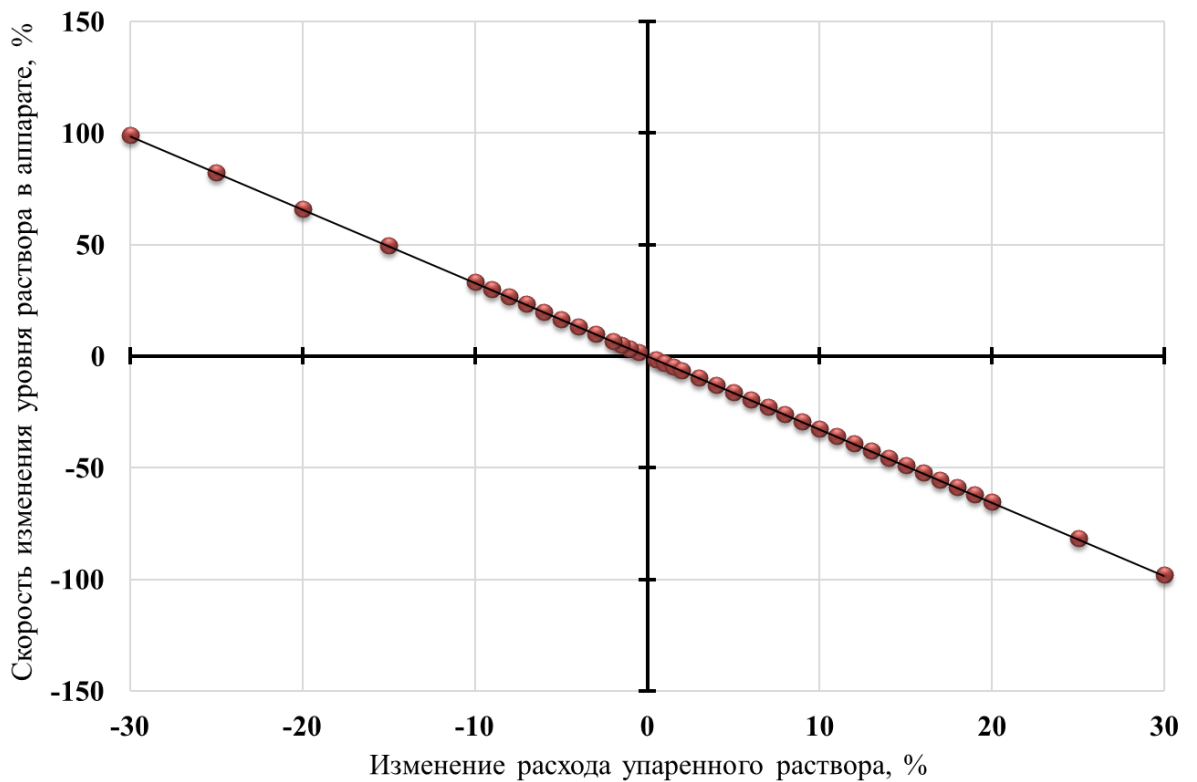


Рисунок 3.1 – Статическая характеристика ВА по каналу $W_s \rightarrow \rho$

Как можно заметить из рисунка 3.1 канал управления плотностью ρ через поток подводимой энергии W_s (обозначим канал, как $W_s \rightarrow \rho$) является существенно нелинейным.

На рисунках 3.2, 3.3 представлены результаты исследований каналов управления ρ и h через расход упаренного раствора Q_p (обозначим каналы, как $Q_p \rightarrow \rho$ и $Q_p \rightarrow h$, соответственно).

Рисунок 3.2 – Статическая характеристика ВА по каналу $Q_p \rightarrow \rho$ Рисунок 3.3 – Статическая характеристика ВА по каналу $Q_p \rightarrow h$

Как видно из графиков оба канала имеют линейные характеристики.

На рисунках 3.4, 3.5 представлены результаты исследований каналов по каналам управления ρ и h через расход исходного раствора Q_f (обозначим каналы, как $Q_f \rightarrow \rho$ и $Q_f \rightarrow h$, соответственно).

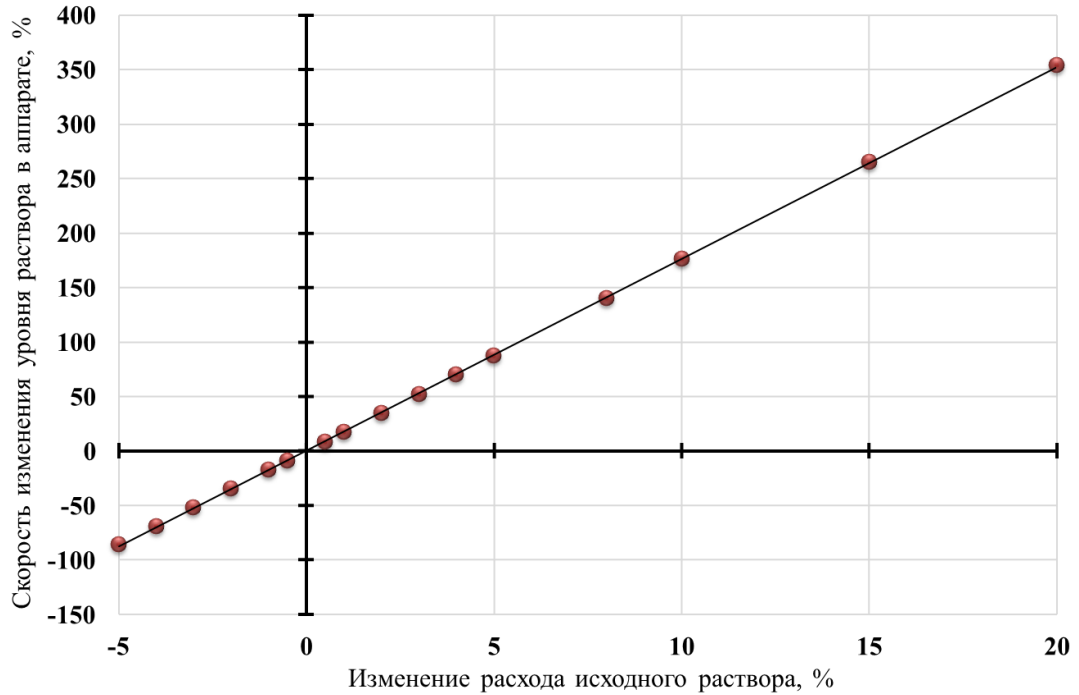


Рисунок 3.4 – Статическая характеристика ВА по каналу $Q_f \rightarrow h$

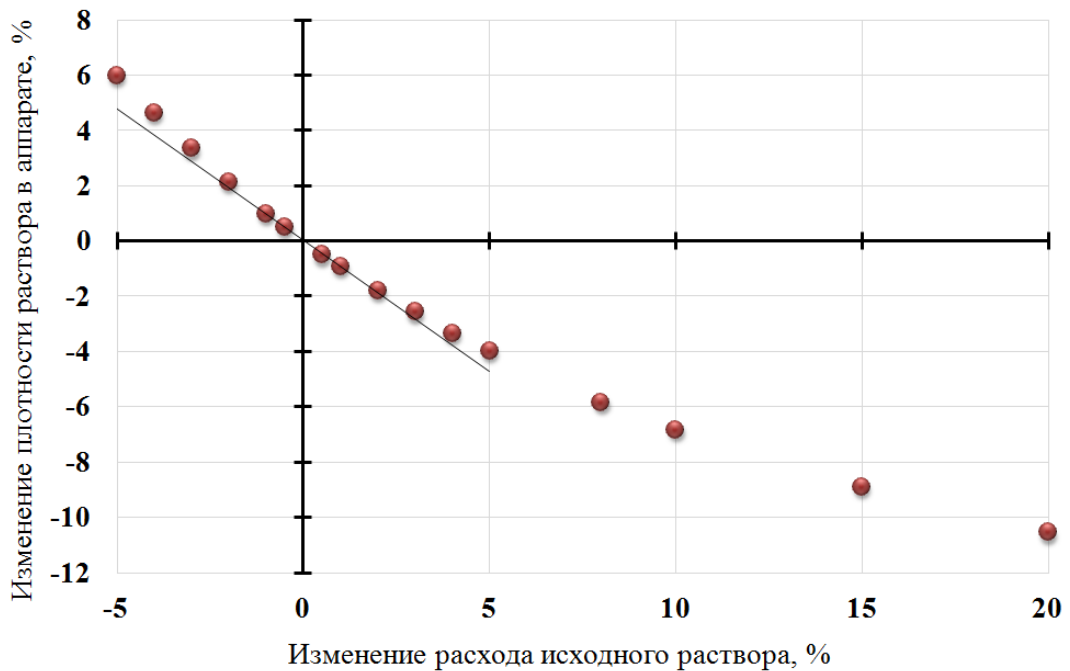


Рисунок 3.5 – Статическая характеристика ВА по каналу $Q_f \rightarrow \rho$

Как можно заметить, канал управления уровнем h через расход исходного раствора Q_f линейный, а плотностью ρ – нелинейный. В диапазоне $\pm 5\%$ данный канал можно аппроксимировать линейной функцией с относительной среднеквадратичной погрешностью $\sigma=2\%$ (см. рисунок 3.4).

Рассматриваемый объект управления характеризуется нелинейностью и многосвязностью. С одной стороны, наличие более одного управляющего воздействия и необходимость обеспечения качественного управления процессом упаривания требует проектирования сложной САУ, например, многосвязной/многоконтурной в различных сочетаниях с простейшими одноконтурными системами стабилизации отдельных технологических переменных.

С другой стороны, при перекрестной схеме регулирующие воздействия осуществляются через участок регулирования уровня (интегрирующее звено), а при этом уменьшается быстродействие системы, усложняется выбор параметров настройки регулятора концентрации и снижается запас устойчивости системы.

3.1.2 Теоретические исследования существующих САУ выпарными аппаратами

Вопросам автоматизации выпарных аппаратов, использующих классический подход управления, посвящено много работ [6, 7, 27–32, 34, 35, 40, 44]. Для большинства выпарных аппаратов, изменениями во времени статических и динамических характеристик которых можно пренебречь, применяются системы стабилизации параметров:

- температура (давление) пара в греющей камере;
- уровня раствора в выпарном аппарате;
- концентрации готового продукта.

Примером является система стабилизации давления пара в греющей камере 1-го аппарата [6], управляющая подачей пара в аппарат в зависимости от температуры пара или парожидкостной смеси в нем. Эта система, обеспечивающая постоянство температуры кипения в первом аппарате, поддерживает постоянной его производительность в условиях образования накипи.

Недостатком системы регулирования, поддерживающей постоянство температуры кипения в первом аппарате, является то, что при снижении температуры автоматический регулятор воздействует на подачу пара, что приводит к увеличению температуры в греющей камере выше значения, допустимого по условиям предотвращения накипи.

Кроме того, по мере образования накипи в первом аппарате этот регулятор увеличивает давление в греющей камере, что способствует увеличению накипеобразования.

Для предотвращения накипеобразования целесообразно регулировать температуру поверхности нагрева или же температуру пара в греющей камере. Выбор этих параметров в качестве импульса для САР, регулирующей подачу пара, оправдан еще и потому, что по каналам регулирования этих температур объект обладает лучшими динамическими свойствами. Из [7] установлено экспериментально, что по каналу «расход греющего пара – температура кипящей жидкости» объект обладает существенной инерционностью, а запаздывание по каналу «расход пара – давление пара в греющей камере», либо электрический нагрев – тепловой поток от нагревателя практически отсутствует. Поэтому качество регулирования (время переходного процесса регулирования, максимальное динамическое отклонение регулируемой величины) будет выше у САР, для которой регулирующим параметром служит температура поверхности нагрева или давление в греющей камере.

Важнейшим технологическим параметром процесса выпаривания, определяющим качество готового продукта, является концентрация раствора на выходе из выпарной установки [27]. Выпарной аппарат при эксплуатации

подвержен различным возмущающим воздействиям, вызывающим отклонение концентрации от заданной.

Известно несколько способов регулирования концентрации раствора, выходящего из выпарного аппарата: изменением расхода жидкости на входе в аппарат или выходе из него, количества выпаренной воды, а также различными комбинациями этих регулирующих воздействий [48]. Изменение концентрации раствора в аппарате при одном и том же возмущающем или регулирующем воздействии существенно зависит от того, на какую линию воздействует исполнительный орган регулятора уровня: при установке регулятора на линии выхода раствора из аппарата изменение концентрации происходит с большей скоростью, чем при установке на линии входа [6].

Концентрация и уровень жидкости в выпарном аппарате являются взаимосвязанными параметрами. Любое возмущающее или регулирующее воздействие (кроме изменения концентрации на входе), приводящее к изменению концентрации раствора в аппарате, вызывает также изменение уровня жидкости в нем.

При регулировании концентрации изменением расхода жидкости на выходе из аппарата большое значение имеет нормальная работа регулятора уровня. Если элементы регулятора обладают неоднозначностью и запаздыванием, то при воздействии регулятора концентрации на расход раствора на выходе из аппарата концентрация в нем не меняется до начала воздействия регулятора уровня на приток жидкости.

Таким образом, если главной задачей регулирования аппарата является поддержание постоянной концентрации раствора на выходе из аппарата, то лучшее качество регулирования обеспечивается, если в качестве регулирующего воздействия выбрано изменение расхода жидкости на входе. Если же требуется более качественное регулирование уровня в аппарате, то регулирование концентрации следует осуществлять изменением расхода на выходе, а уровня – на входе.

Обзор открытых литературных источников, показал, что возможные варианты системы автоматического управления (САУ) выпарным аппаратом не ограничены применением классических систем. Существует большое количество подходов реализации систем управления выпарным аппаратом кардинальным образом отличающихся от классической теории управления:

- адаптивные системы управления [48, 65];
- системы управления с прогнозирующей моделью [41];
- системы нечеткого управления [37–39];
- нейросетевые методы управления [38, 48];
- многосвязные системы управления [43, 45].

Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки, которые проявляются в приложениях. На практике должен быть достигнут компромисс между сложностью, реализуемостью и надежностью [66]. Рассмотрим подробнее некоторые из представленных подходов.

В теории автоматического управления многосвязными САУ называют автоматические системы, в которых осуществляется одновременное регулирование нескольких выходных координат объекта управления (ОУ). Но здесь стоит отметить:

- значительную сложность разработки таких систем, по причине наличия перекрестных связей в каналах управления;
- сложность реализации адаптивных свойств у систем;
- потребность в достаточно точной модели многосвязного ОУ.

Наличие данных особенностей откладывает применение данного подхода в разработке САУ ВА.

Применение нечетких систем управления оправдано в случае наличия опыта оптимального управления ОУ. Отсутствие данной информации в работе, ограничивает применение этого подхода.

В основе нейросетевых методов управления лежит использование нейросетей, предварительно обученных на некоторой выборке технологических

данных, полученных на ОУ. Чем больше выборка и чем больше в ней различных вариаций состояний ОУ, тем выше эффективность работы нейросетевых методов управления. При этом необходимо понимать, что чем сложнее ОУ, тем сложнее должна быть нейронная сеть: большее количество скрытых слоев, больше нейронов в слоях, наличие обратных связей. Отсутствие большого набора технологической информации ограничивает, на данный момент, применение нейросетевого подхода в данной работе.

Основным достоинством МРС подхода, определяющим его успешное использование в практике построения и эксплуатации систем управления, служит относительная простота базовой схемы формирования обратной связи, сочетающаяся с высокими адаптивными свойствами. Последнее обстоятельство позволяет управлять многомерными и многосвязными объектами со сложной структурой, включающей нелинейности; оптимизировать процессы в режиме реального времени в рамках ограничений на управляющие и управляемые переменные; учитывать неопределенности в задании объектов и возмущений. Кроме того, возможен учет транспортного запаздывания, учет изменений критериев качества в ходе процесса и отказов датчиков системы измерения. Применение данного метода затруднено необходимостью составления целевого функционала для прогнозирующей модели, а для это требуются технологическая информация о функционировании объекта, которая на данный момент недоступна.

В работе [32] показано, что классические системы управления выпарным аппаратам на основе ПИД-регуляторов, обеспечивают требуемое качество регулирования и лишь не многим уступают рассмотренным альтернативным методом управления, что, с учетом факта отсутствия технологической информации об объекте, говорит о целесообразности использования классических методов управления при создании САУ ВА упаривания резкстракта урана.

3.2 Разработка системы автоматического управления выпарным аппаратом

3.2.1 Структурный синтез возможных систем автоматического управления выпарным аппаратом

С учетом проведенного исследования в пункте 3.1.2 и анализа существующих САУ, были разработаны несколько вариантов САУ ВА, структурные схемы которых будут представлены ниже.

Системы управления, в которых поддержание заданного значения плотности упаренного раствора (являющегося целью управления ВА), осуществляется посредством расхода упаренного раствора, а поддержание требуемого значения уровня при помощи расхода питающего раствора, названы «САУ по стоку».

Системы управления, в которых плотность упаренного раствора регулируется посредством расхода питающего раствора, а уровень при помощи расхода упаренного раствора названы «САУ по притоку».

«Релейная САУ по стоку», представленная на рисунке 3.6, работает следующим образом. Сигнал с датчика плотности сравнивается с заданным значением. Получаемый сигнал рассогласования поступает на вход двухпозиционного реле с зоной неоднозначности, величина которой определяется верхним и нижним значением отклонения плотности от заданного значения.

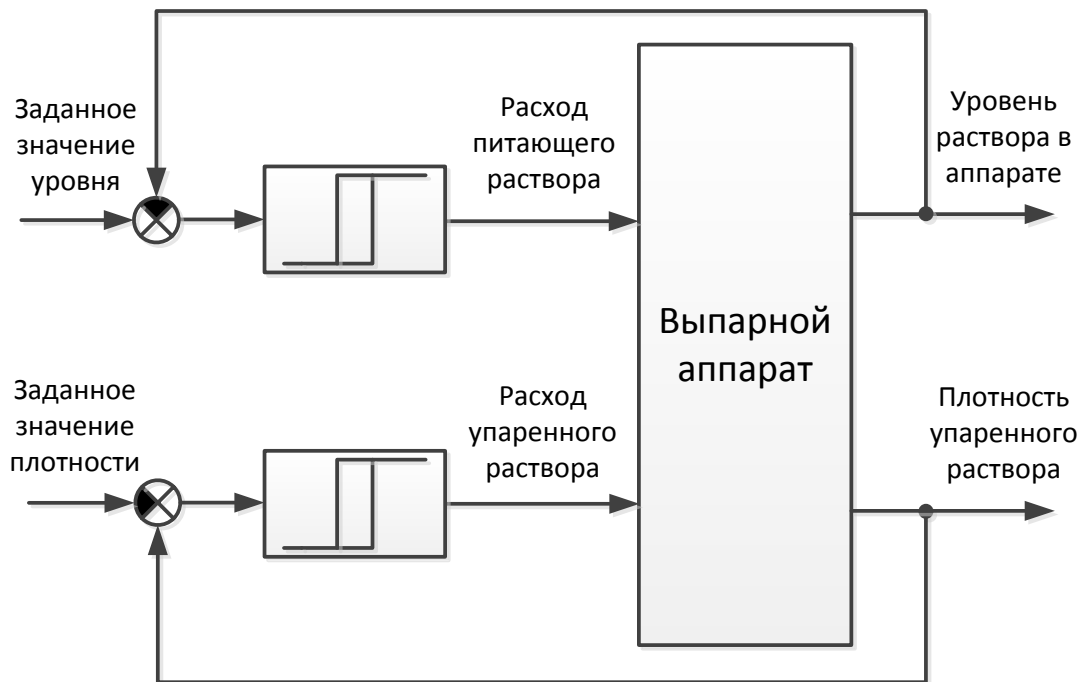


Рисунок 3.6 – Релейная САУ по стоку

При достижении сигнала рассогласования верхней границы зоны неоднозначности, то есть в случае превышения плотности выше заданного значения, с выхода реле поступает сигнал на исполнительный механизм, увеличивающий расход упаренного раствора до максимально допустимого значения. Тем самым уменьшается время пребывания раствора в аппарате, а это в свою очередь уменьшает плотность.

При достижении сигнала рассогласования нижней границы зоны неоднозначности, то есть в случае понижения плотности ниже заданного значения, с выхода реле поступает сигнал на исполнительный механизм, уменьшающий расход упаренного раствора до минимально допустимого значения. Тем самым увеличивается время пребывания раствора в аппарате, а это в свою очередь приводит к увеличению плотности.

Сигнал с уровнемера сравнивается с заданным значением. Получаемый сигнал рассогласования поступает на вход двухпозиционного реле с зоной неоднозначности, величина которой определяется верхним и нижним значением отклонения уровня от заданного значения. При достижении сигнала

рассогласования верхней границы зоны неоднозначности, то есть в случае превышения уровня выше заданного значения, с выхода реле поступает сигнал на исполнительный механизм, уменьшающий расход питающего раствора до минимально допустимого значения, что приводит к уменьшению уровня до заданного значения.

При достижении сигналом рассогласования нижней границы зоны неоднозначности, то есть в случае понижения плотности ниже заданного значения, с выхода реле поступает сигнал на исполнительный механизм, увеличивающий расход питающего раствора до максимально допустимого значения, а это естественным образом восстанавливает заданное значения уровня.

Отличием «САУ по стоку», структурная схема которой представлена на рисунке 3.7, является использования цифровых ПИ-регуляторов вместо релейных.

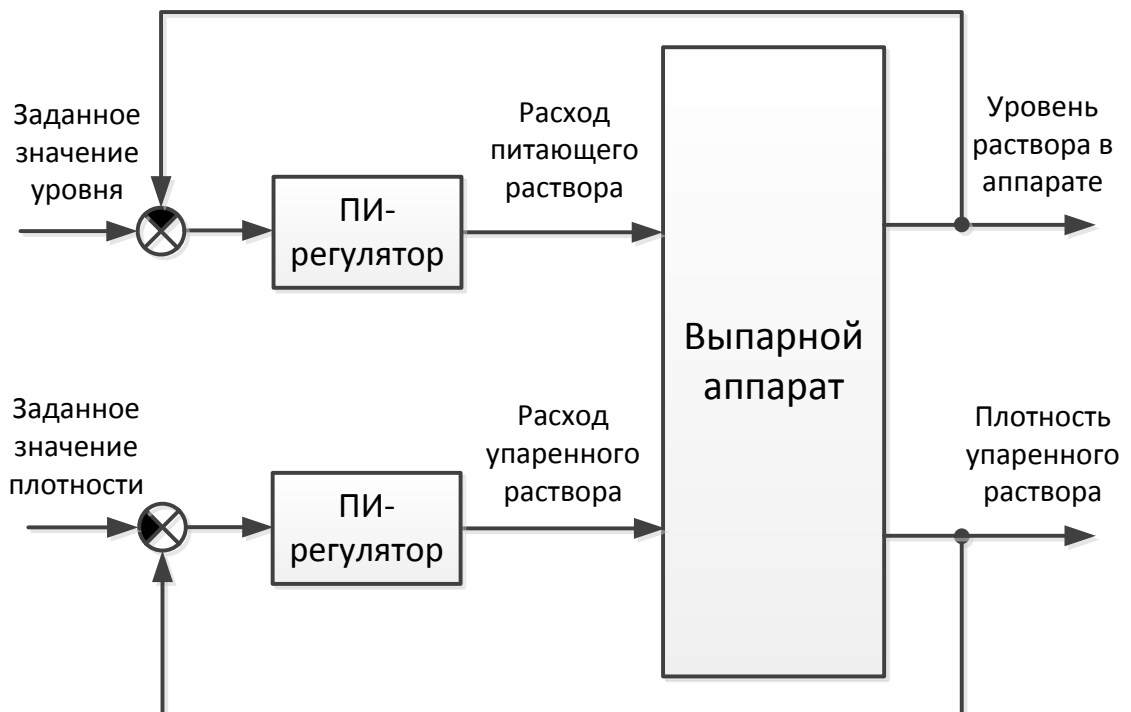


Рисунок 3.7 – Непрерывная САУ по стоку

В «САУ по притоку» (рисунок 3.8) управления по обоим каналам ведется с использованием цифровых ПИ-регуляторов. Регулятор плотности, воздействуя на исполнительный механизм, изменяет величину расхода питающего раствора.

В случае изменения плотности больше заданного значения регулятор увеличивает расход. Таким образом увеличивается приток раствора в аппарат имеющий меньшую плотность. Тем самым уменьшается общая плотность раствора в аппарате, возвращаясь к заданному значению.

При изменении плотности меньше заданного значения регулятор уменьшает расход. Таким образом уменьшается приток раствора в аппарат имеющий меньшую плотность. Тем самым увеличивается общая плотность раствора в аппарате, возвращаясь к заданному значению.

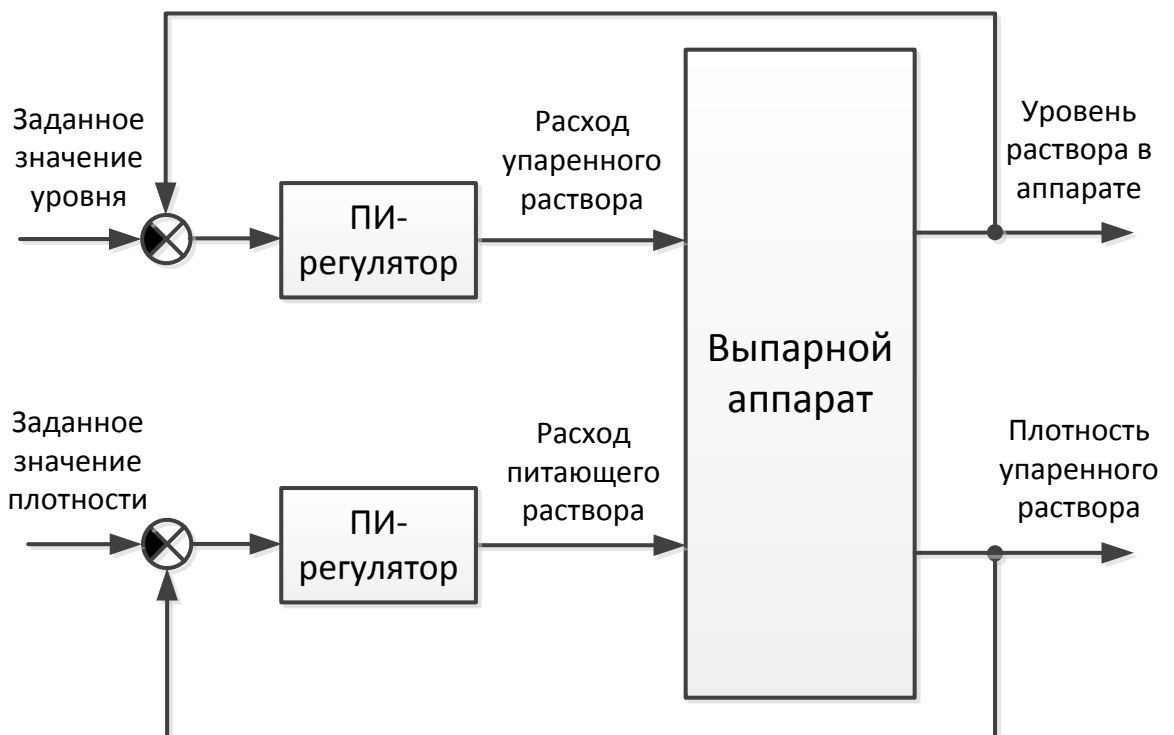


Рисунок 3.8 – Непрерывная САУ по притоку

Аналогичным образом действует «релейная САУ по притоку» (рисунок 3.9), но вместо цифровых ПИ-регуляторов в ней используются двухпозиционные релейные регуляторы с зоной неоднозначности.

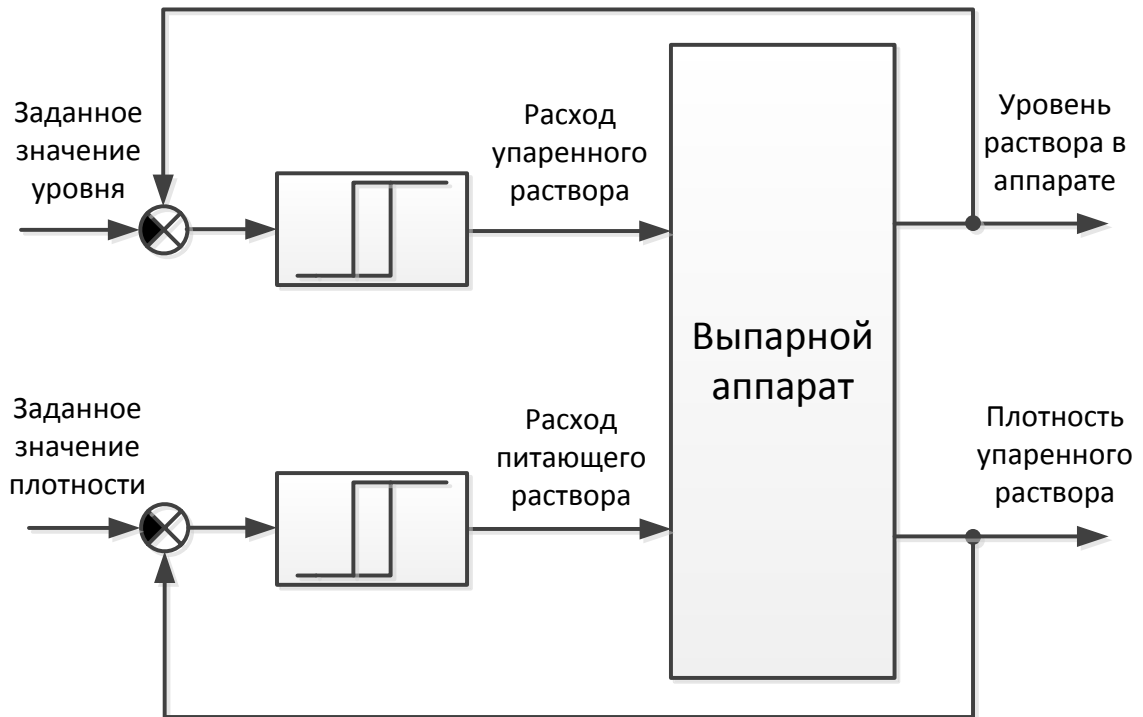


Рисунок 3.9 – Релейная САУ по притоку

Величина зоны неоднозначности является основным параметром настройки реле, определяющая точность регулирования и частоту переключения релейного регулятора.

При реализации свободного (естественного) отбора кубового раствора из аппарата не представляется возможным использовать его расход в качестве управляющего воздействия, в виду отсутствия исполнительного механизма, способного изменять расход упаренного раствора в заданном диапазоне по сигналу регулятора. Поэтому была разработана система, в которой в качестве управляющего воздействия на концентрацию/плотность используется расход питающего раствора (рисунок 3.10).

В качестве закона регулирования использован пропорционально-интегральный закон, вследствие отсутствия запаздывания объекта по этому каналу управления.

К выходу ПИ-регулятора добавлен сигнал выхода двухпозиционного реле с гистерезисом, увеличивающий расход питающего раствора в случае снижения

уровня ниже порогового значения (установленного в реле). Обратное переключение реле происходит при достижении заданного значения уровня в аппарате.

Таким образом, обеспечивается позиционное регулирование уровнем раствора. Данную систему управления назовем как «позиционная САУ по притоку».

Для развязки работы регуляторов использовался блок сравнения, отслеживающий значение выхода реле. При отличии от нуля выходного сигнала реле, работа ПИ-регулятора приостанавливается на время работы релейного регулятора. При этом выход ПИ-регулятора сохраняет свое прежнее значение.

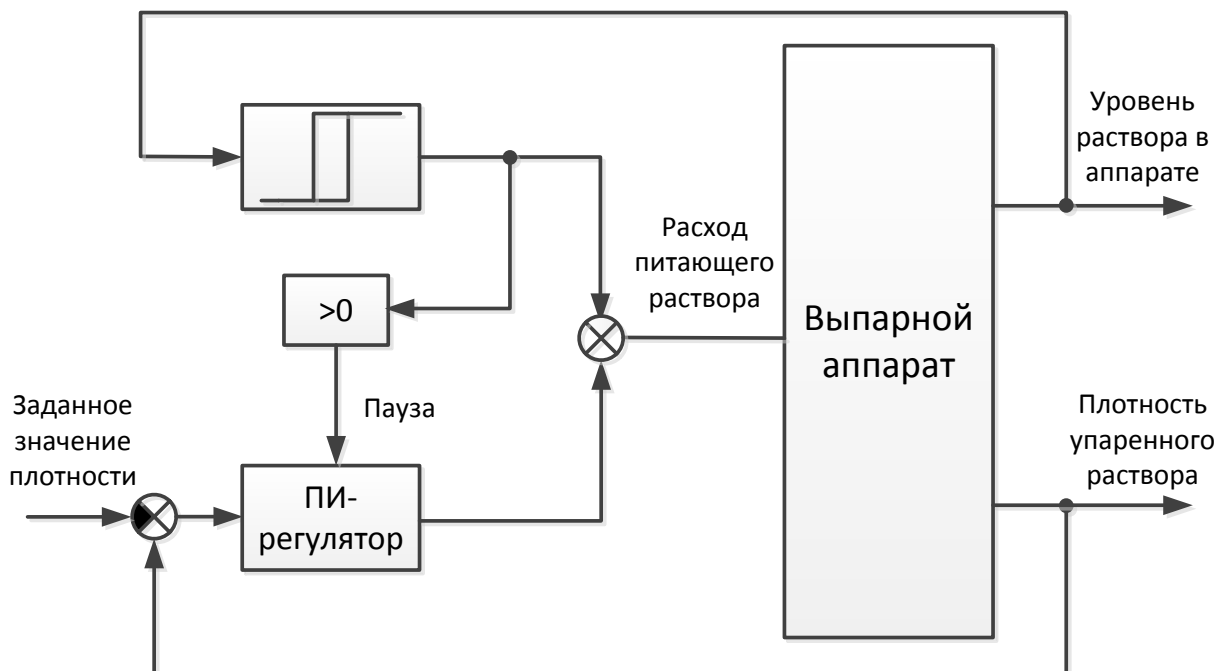


Рисунок 3.10 – Позиционная САУ по притоку

3.2.2 Параметрический синтез систем автоматического управления выпарным аппаратом

Для обеспечения устойчивой работы САУ с удовлетворительными показателями качества управления требуется рассчитать значения параметров регуляторов. Для этого, в первую очередь, необходимо определить статические и динамические характеристики объекта управления.

С целью линеаризации [67, 68] ОУ были проведены исследования переходных процессов по каналам:

- $Q_f \rightarrow \rho$;
- $Q_f \rightarrow h$;
- $Q_p \rightarrow \rho$;
- $Q_p \rightarrow h$.

Переходные характеристики снимались в окрестности рабочей точки процесса, как при положительных, так и отрицательных скачках управляющего сигнала. Величина скачкообразного воздействия выбиралась максимальной из линейной области статической характеристики соответствующего канала.

Аппроксимация полученных переходных характеристик осуществлялась с использованием приложения пакета MATLAB – System Identification.

Результаты вычислительных экспериментов по исследованиям переходных процессов (рисунок 3.11) на компьютерной модели ВА показали отсутствие запаздывания по рассматриваемым каналам.

Изменение значения расхода исходного раствора в пределах 1 %-ой нелинейности статической характеристики $Q_f \rightarrow \rho$ позволило описать объект управления по данному каналу инерционным звеном 1-го порядка, без запаздывания с погрешностью менее 1 %. Аналогичным образом описывается канал $Q_p \rightarrow \rho$, с той же погрешностью.

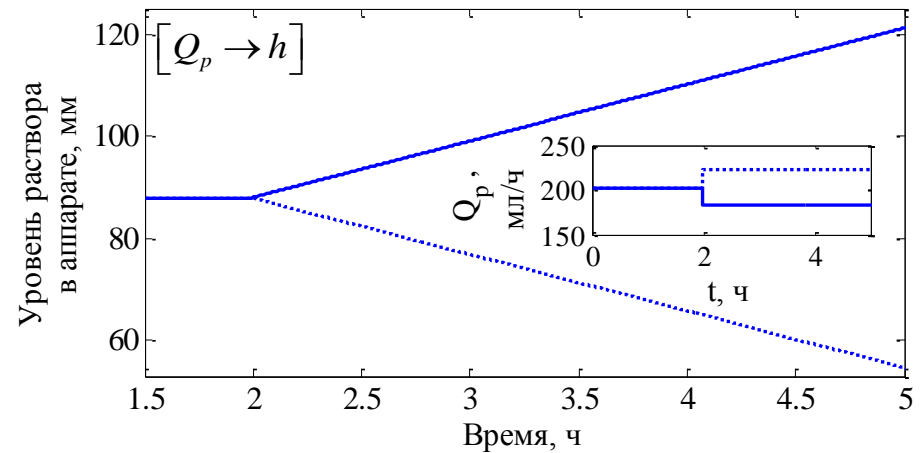
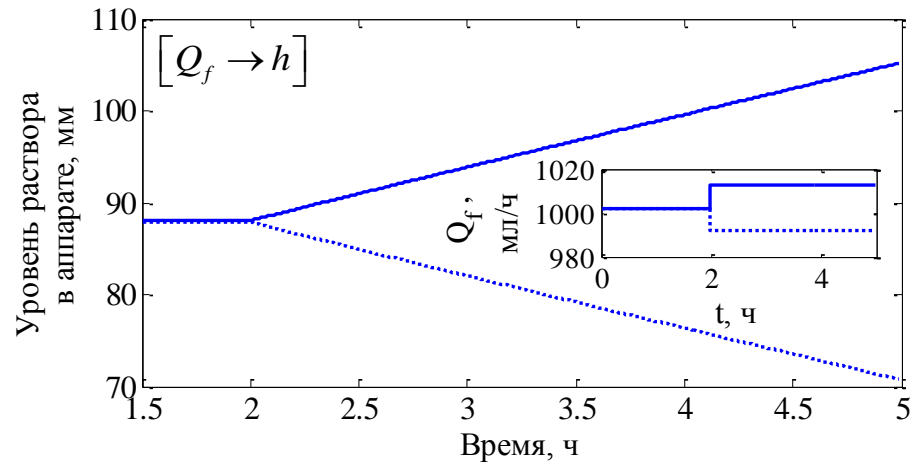
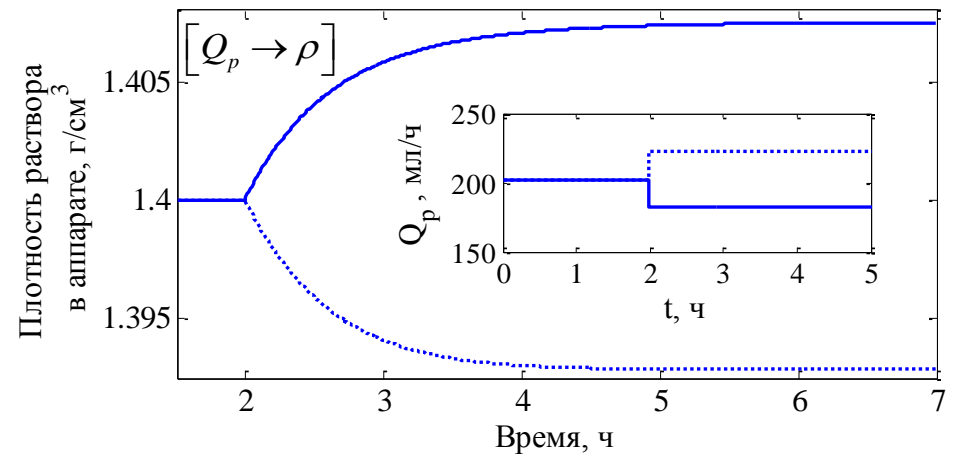
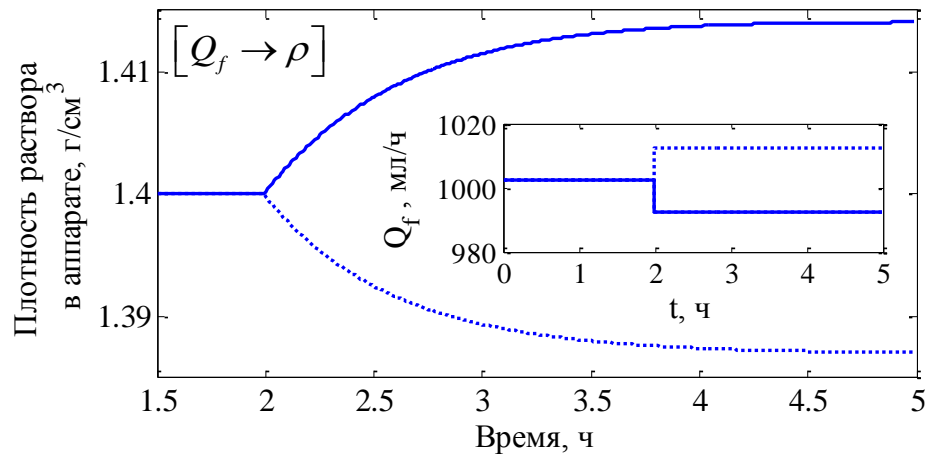


Рисунок 3.11 – Временные диаграммы основных переменных при исследовании переходных процессов при возмущающих воздействиях

Передаточная функция $W_{Q_f, \rho}(s)$ ОУ по каналу $Q_f \rightarrow \rho$ и передаточная функция $W_{Q_p, \rho}(s)$ ОУ по каналу $Q_p \rightarrow \rho$ в этом случае будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} W_{Q_f, \rho}(s) &= \frac{K_{Q_f, \rho}}{T_{Q_f, \rho} s + 1}, \\ W_{Q_p, \rho}(s) &= \frac{K_{Q_p, \rho}}{T_{Q_p, \rho} s + 1}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где $K_{Q_f, \rho}$ – коэффициент передачи объекта по каналу $Q_f \rightarrow \rho$;

$T_{Q_f, \rho}$ – постоянная времени объекта по каналу $Q_f \rightarrow \rho$;

$K_{Q_p, \rho}$ – коэффициент передачи объекта по каналу $Q_p \rightarrow \rho$;

$T_{Q_p, \rho}$ – постоянная времени объекта по каналу $Q_p \rightarrow \rho$.

Как видно из переходных процессов (рисунок 3.11) каналы $Q_f \rightarrow h$ и $Q_p \rightarrow h$ можно описать идеальным интегрирующим звеном, с передаточными функциями вида:

$$\begin{aligned} W_{Q_f, h}(s) &= \frac{\varepsilon_{Q_f, h}}{s}, \\ W_{Q_p, h}(s) &= \frac{\varepsilon_{Q_p, h}}{s}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где $\varepsilon_{Q_f, h}$ – добротность по скорости объекта по каналу $Q_f \rightarrow h$;

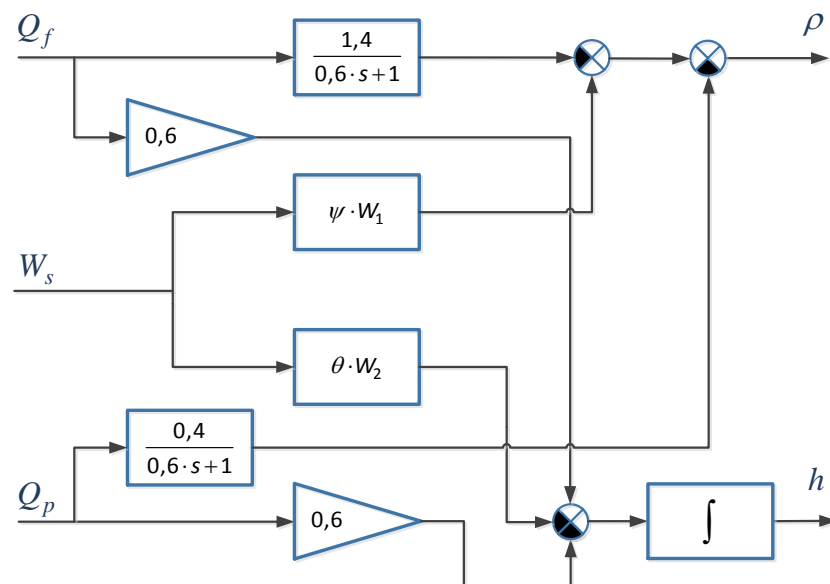
$\varepsilon_{Q_p, h}$ – добротность по скорости объекта по каналу $Q_p \rightarrow h$.

Рассчитанные значения параметров объекта управления представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Статически характеристики линеаризованной модели объекта управления

Параметры объекта	Значения
$K_{Q_f, \rho}$	-1,42 (кг/м ³) / (мл/ч)
$T_{Q_f, \rho}$	0,62 ч
$K_{Q_p, \rho}$	-0,35 (кг/м ³) / (мл/ч)
$T_{Q_p, \rho}$	0,58 ч
$\varepsilon_{Q_f, h}$	0,57 мм/мл
$\varepsilon_{Q_p, h}$	-0,55 мм/мл

В результате идентификации была получена структурная схема линеаризованного объекта управления, представленная на рисунке 3.12.



ψ, θ – нелинейные зависимости, связанные со стохастическим характером процесса кипения;

W_1, W_2 – передаточные функции; W_s – тепловой поток от нагревателя

Рисунок 3.12 – Структурная схема ВА как объекта управления

Как видно из схемы (рисунок 3.12) ОУ является многосвязным, нелинейным и без самовыравнивания. Последнее объясняется наличием интегратора по уровню, на вход которого поступают сигналы с двух усилителей по расходам питающего и упаренного растворов и с нелинейного звена по расходу греющего пара. Добиться того, чтобы сумма данных сигналов равнялась нулю не представляется возможным. Поэтому на выходе интегрирующего звена будет иметь место постоянно нарастающая или убывающая величина, в данном случае отражающая изменения уровня раствора в аппарате. Следовательно, для стабильной работы данного ОУ необходима система управления.

Отсутствие запаздывания по исследуемым каналам позволяет предположить нецелесообразность использования пропорционально-интегро-дифференциального (ПИД) или более сложных законов регулирования, предназначенных для объектов со значительным запаздыванием [69–76].

Параметры настройки ПИ-регуляторов рассчитывались методом динамической компенсации и методом оптимального модуля с использованием программного комплекса «SAR-sintez» и приложения Simulink – «Control Design PID Tuner», результаты представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты расчета параметрического синтеза регуляторов

Канал	Параметры регулятора, рассчитанные методом динамической компенсации		Параметры регулятора, рассчитанные методом оптимального модуля		Параметры регулятора, рассчитанные в «PID Tuner»	
	K_r	T_i	K_r	T_i	K_r	T_i
$Q_f \rightarrow \rho$	2,183	0,62	0,704	0,413	0,332	0,183
$Q_p \rightarrow \rho$	8,28	0,58	2,857	0,386	1,329	0,172

$Q_f \rightarrow h$	-	-	-	-	8,345	5,231
$Q_p \rightarrow h$	-	-	-	-	8,214	5,654

Сравнение прямых показателей качества управления (перерегулирования σ и времени регулирования $T_{\text{рег}}$ по управляющему воздействию) ПИ-регуляторов для каждого исследуемого линеаризованного канала ОУ, настроенного указанными выше методами, показало, что регуляторы, настроенные при помощи «PID Tuner» обеспечивают лучшие показатели качества управления (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Прямые показатели качества управления ПИ-регуляторов

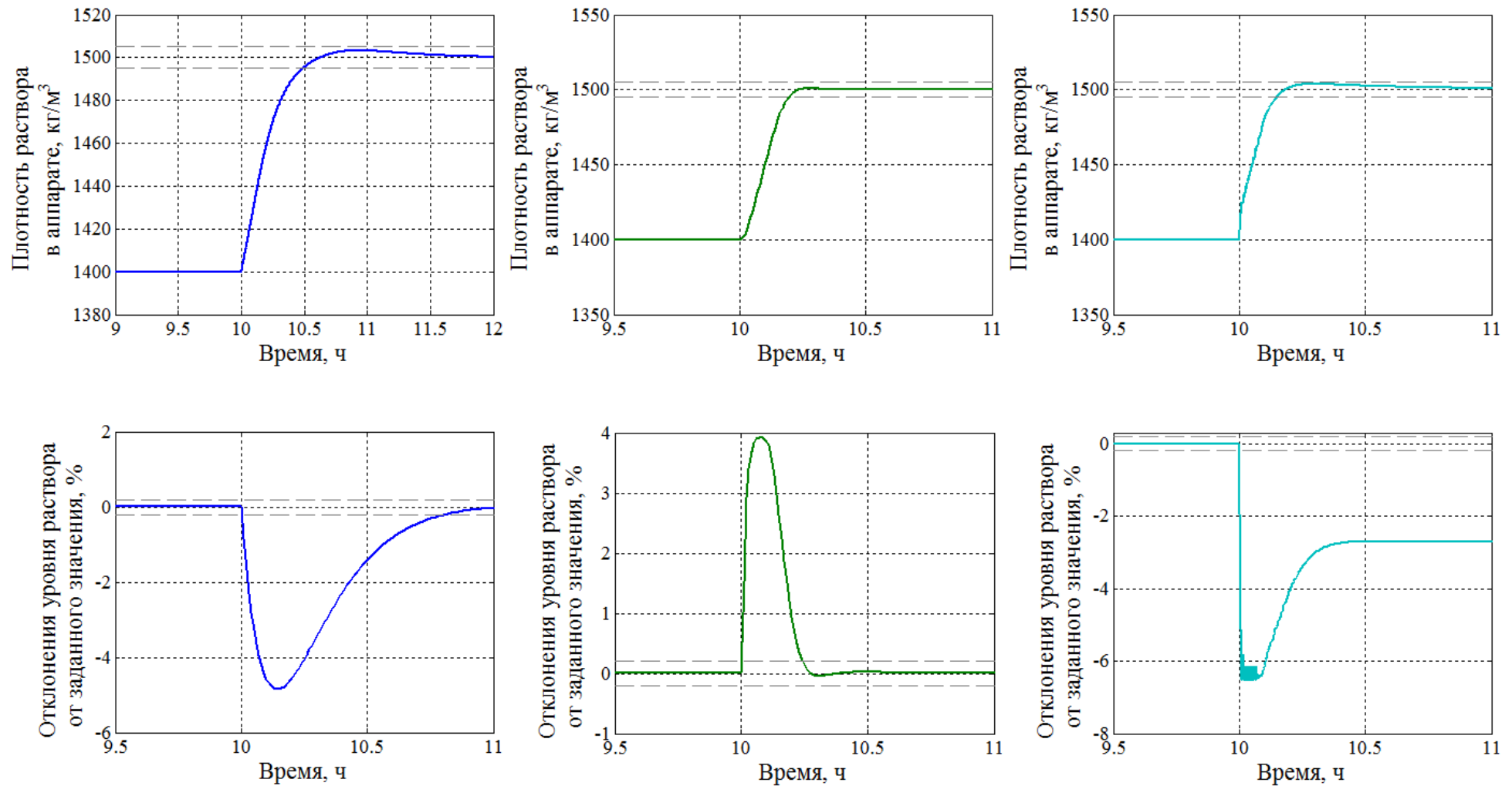
Канал	Метод динамической компенсации		Метод оптимального модуля		«PID Tuner»	
	$T_{\text{рег.}}, \text{ мин}$	$\sigma, \%$	$T_{\text{рег.}}, \text{ мин}$	$\sigma, \%$	$T_{\text{рег.}}, \text{ мин}$	$\sigma, \%$
$Q_f \rightarrow \rho$	12,46	1,53	13,46	1,53	11,23	0,74
$Q_p \rightarrow \rho$	13,64	2,52	16,93	0,95	14,68	1,05
$Q_f \rightarrow h$	-	-	-	-	1,05	0,28
$Q_p \rightarrow h$	-	-	-	-	1,12	0,26

Полученные параметры регуляторов использовались при настройке локальных контуров моделей систем управления (рисунки 3.6–3.10).

3.2.3 Исследование возможных вариантов САУ выпарным аппаратом на компьютерной модели

Для исследования САУ выпарным аппаратом были проведены серии вычислительных экспериментов (рисунки 3.13–3.17) на синтезированных моделях САУ с цифровой реализацией ПИ-регуляторов [69–72] в программной среде MATLAB/Simulink. При этом использовался метод сравнительного

анализа переходных процессов при ступенчатых возмущающих и управляющих воздействиях. Исследования переходных процессов релейных САУ показали, что данные системы не обеспечивали требуемого качества управления. Поэтому далее не рассматривались.

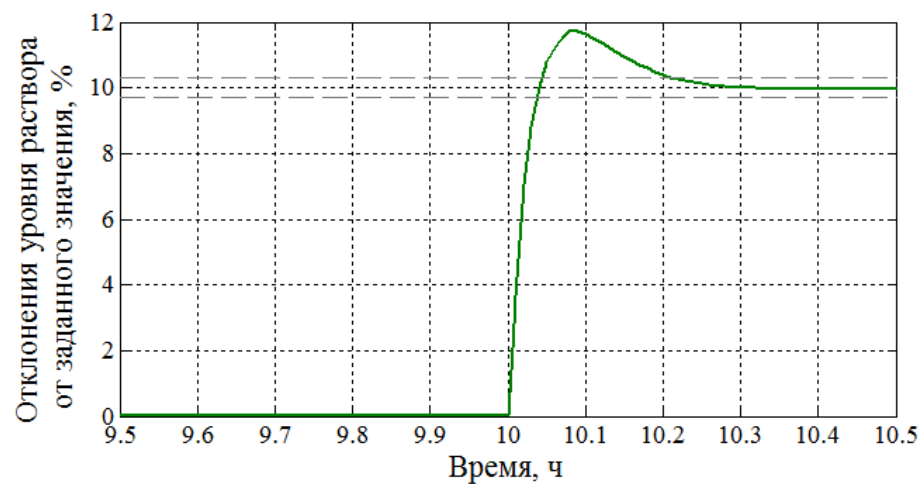
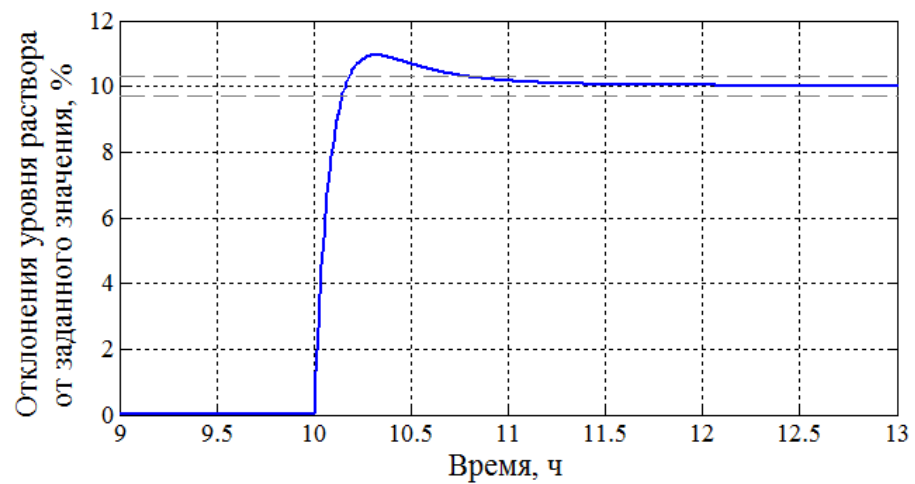
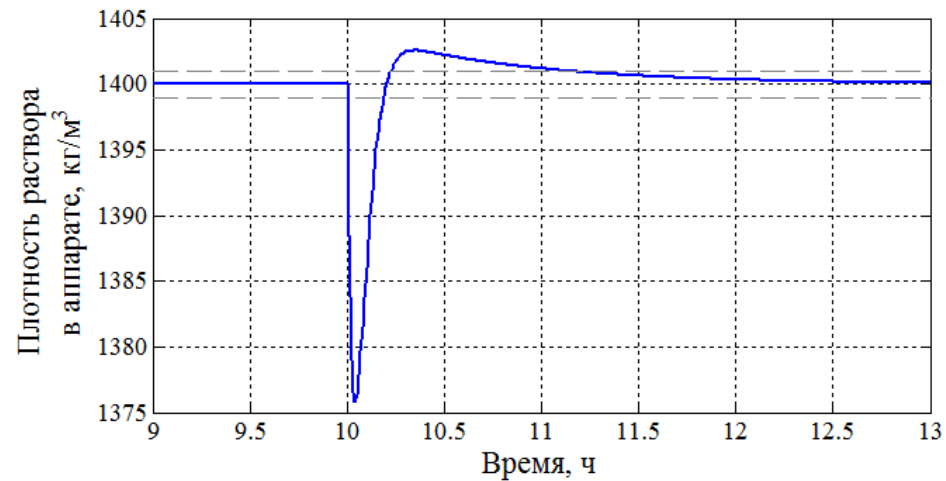
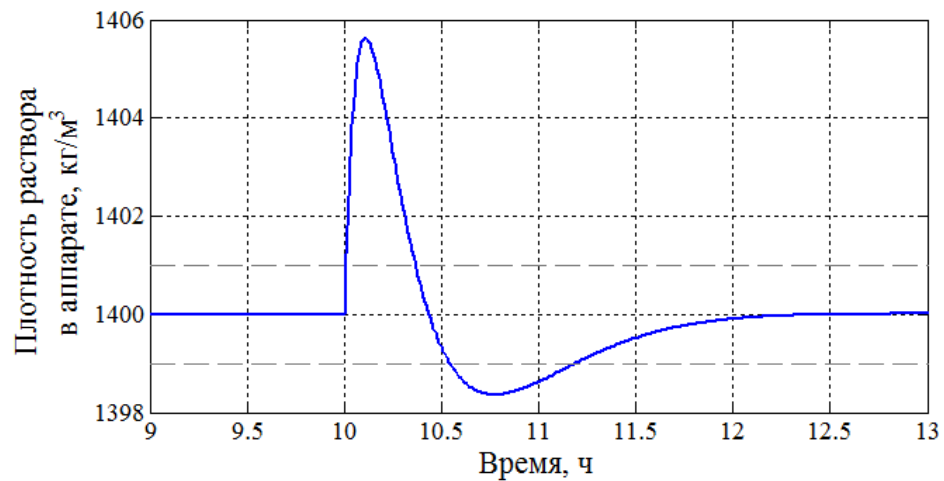


а) «САУ по притоку»

б) «САУ по стоку»

в) «позиционная САУ по притоку»

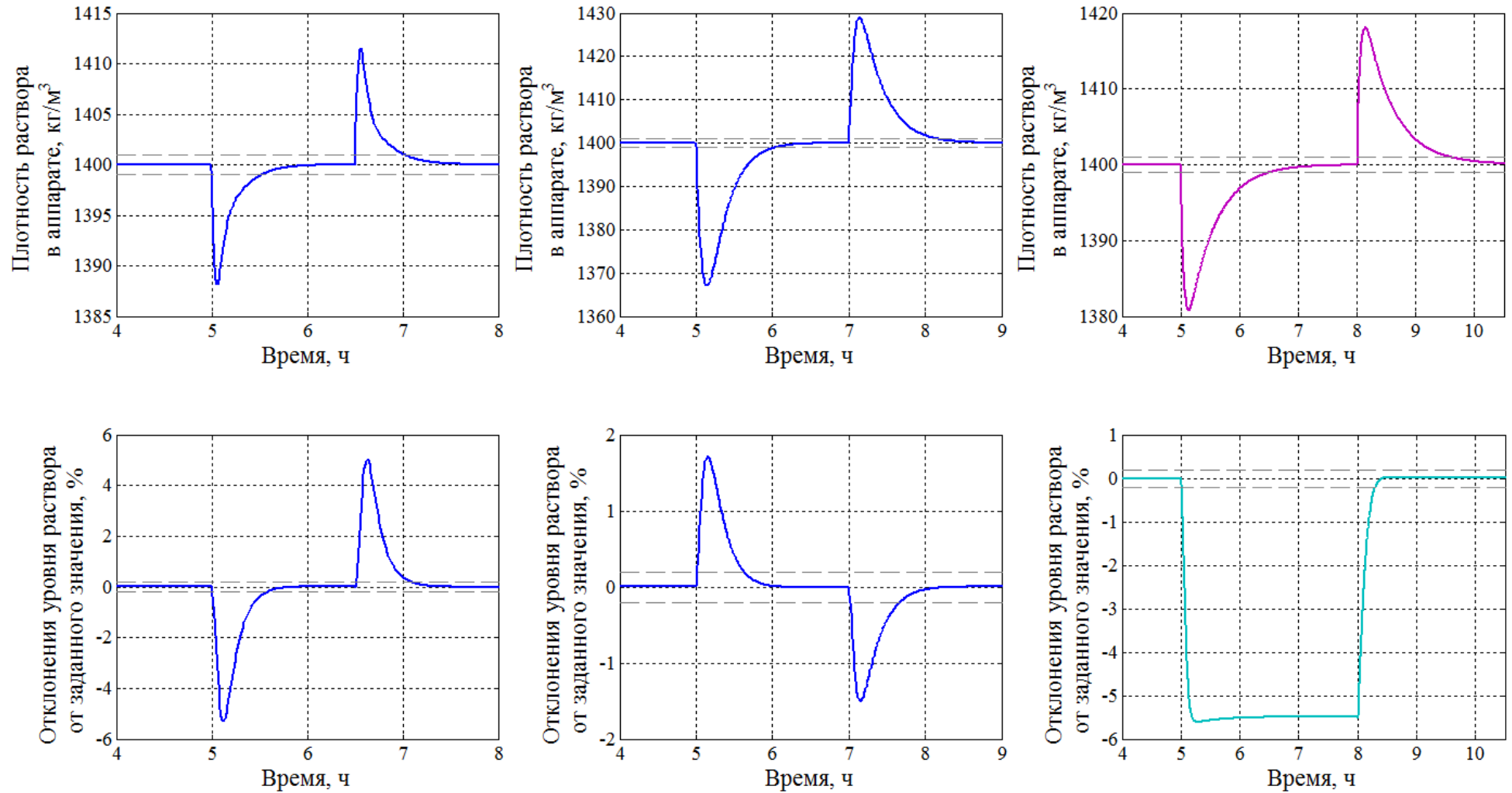
Рисунок 3.13 – Временные диаграммы переходных процессов при изменении значения плотности раствора от 1400 г/см³ до 1500 г/см³



а) «САУ по притоку»

б) «САУ по стоку»

Рисунок 3.14 – Временные диаграммы переходных процессов при изменении значения уровня на +10 %

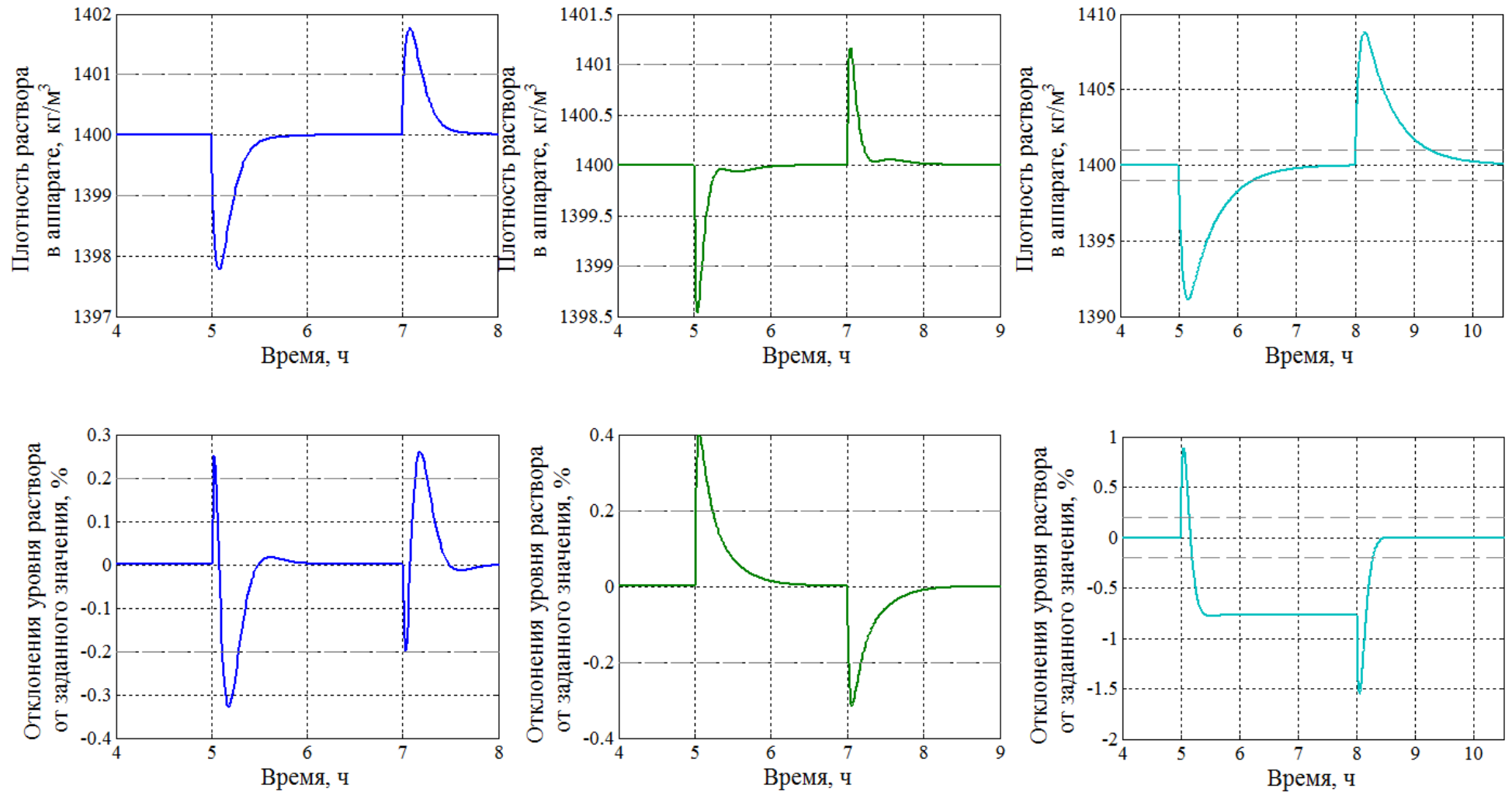


а) «САУ по притоку»

б) «САУ по стоку»

в) «позиционная САУ по притоку»

Рисунок 3.15 – Временные диаграммы переходных процессов при изменении плотности исходного раствора на $\pm 5\%$

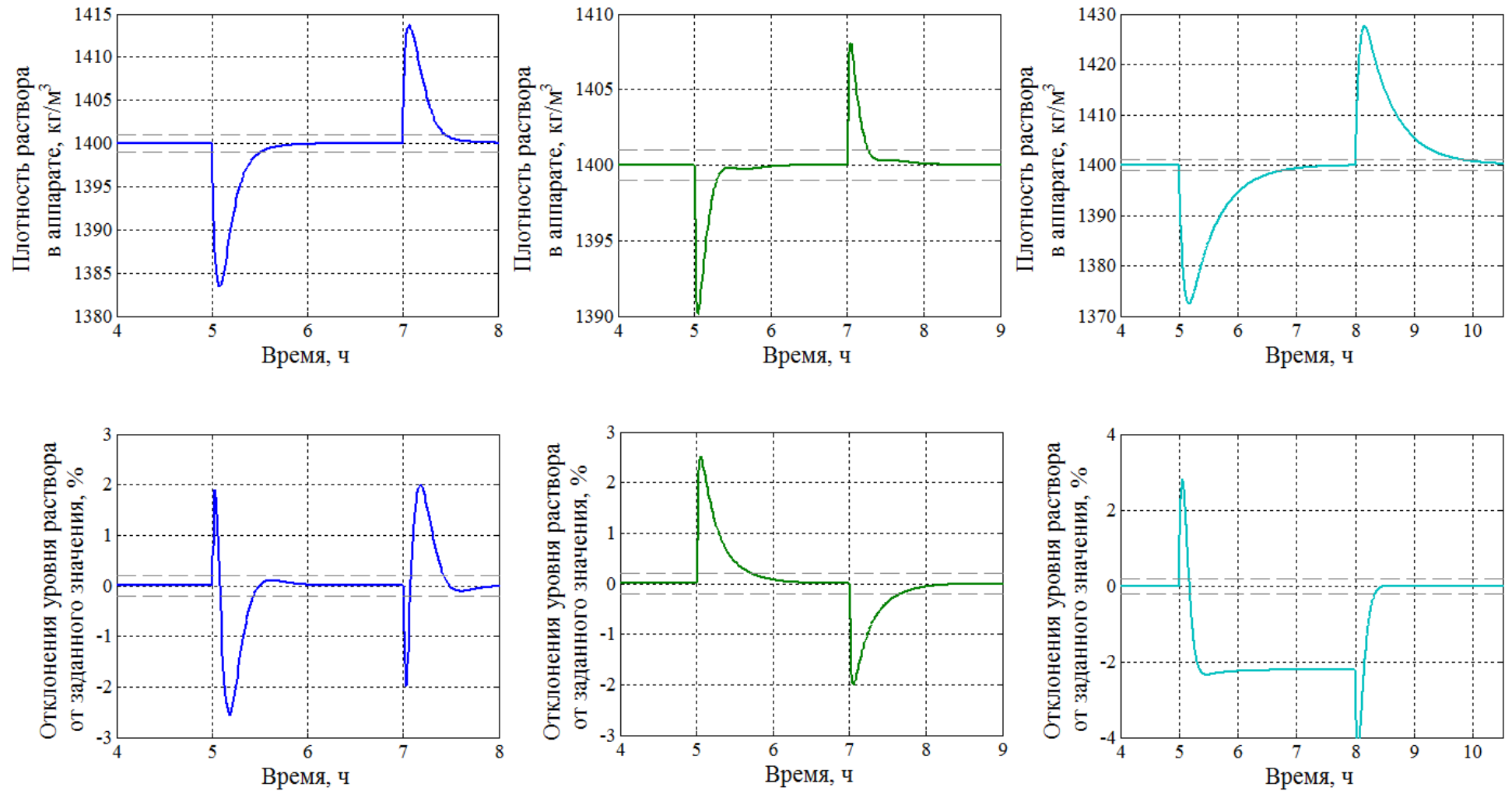


а) «САУ по притоку»

б) «САУ по стоку»

в) «позиционная САУ по притоку»

Рисунок 3.16 – Временные диаграммы переходных процессов при изменении температуры входного раствора на $\pm 10\%$



а) «САУ по притоку»

б) «САУ по стоку»

в) «позиционная САУ по притоку»

Рисунок 3.17 – Временные диаграммы переходных процессов при изменении подводимой энергии к греющей камере на $\pm 5\%$

В результате исследований переходных процессов при ступенчатых возмущающих и управляющих воздействиях были рассчитаны основные показатели качества управления (время регулирования по каналам управления $T_{\rho,h}^y$ и возмущения $T_{\rho,h}^B$, перерегулирование по каналам управления $\sigma_{\rho,h}^y$, и динамическая ошибка регулирования по каналам управления $\Delta_{\rho,h}^y$ и возмущения $\Delta_{\rho,h}^B$, для плотности и уровня, соответственно), представленные в таблице 3.4.

Во всех выше приведенных переходных процессах изменения температуры раствора в аппарате не превышала 5–8 градусов.

Исследование переходных процессов по управлению (рисунки 3.13, 3.14) показывает, что если главной задачей регулирования аппарата является поддержание постоянной концентрации/плотности раствора на выходе из аппарата, то лучшее качество регулирования обеспечивается, если в качестве регулирующего воздействия, по плотности/концентрации, выбрано изменение расхода жидкости на входе («позиционная САУ по притоку»). Если же требуется более качественное регулирование уровня в аппарате, то регулирование концентрации следует осуществлять изменением расхода на выходе, а уровня – на входе («САУ по стоку»).

При программном управлении ВА необходимо учитывать взаимосвязь управляющих каналов по уровню и плотности. Так, если добиваться максимального быстродействия системы по каналу плотности/концентрации, локальный контур управления по уровню не сможет удержать его на заданном значении. В этом случае возможны значительные отклонения уровня, что может привести к техническим повреждениям аппарата. С другой стороны, если необходимо обеспечить максимальное быстродействие системы по достижению требуемого уровня, в системе будут наблюдаться большие отклонения по плотности/концентрации раствора в аппарате.

Таблица 3.4 – Прямые показатели качества исследуемых САУ

Изменяемая переменная	«САУ по притоку»						«САУ по стоку»						«позиционная САУ по притоку»					
	T_{ρ}^y , мин	σ_{ρ}^y , %	Δ_{ρ}^y , %	T_h^y , мин	σ_h^y , %	Δ_h^y , %	T_{ρ}^y , мин	σ_{ρ}^y , %	Δ_{ρ}^y , %	T_h^y , мин	σ_h^y , %	Δ_h^y , %	T_{ρ}^y , мин	σ_{ρ}^y , %	Δ_{ρ}^y , %	T_h^y , мин	σ_h^y , %	Δ_h^y , %
$\Delta\rho = 7\%$	27	0	0,2	48	0	-5	12	0	0,1	15	0	4	9	0	4	-	0	-6
$\Delta h = 10\%$	50	0	0,4	21	9	0,9	74	0	-1,7	13	17	1,7	-	-	-	-	-	-
Возмущение	T_{ρ}^B , мин		Δ_{ρ}^B , %	T_h^B , мин		Δ_h^B , %	T_{ρ}^B , мин		Δ_{ρ}^B , %	T_h^B , мин		Δ_h^B , %	T_{ρ}^B , мин		Δ_{ρ}^B , %	T_h^B , мин		Δ_h^B , %
$\Delta\rho_f = \pm 5\%$	33		0,8	32		5	60		2,1	39		1,7	32		-1	-		-5
$\Delta\rho_f = -8\%$	80		-1,3	460		-10	510		-3,3	78		3	120		-2	-		-6
$\Delta T_f = \pm 10\%$	14		0,1	17		0,3	6		0,1	14		0,4	75		0,6	-		0,8
$\Delta T_f = \pm 20\%$	62		-0,2	86		2	65		-0,5	83		1,8	150		1,2	-		8
$\Delta W_s = \pm 10\%$	31		-1,2	25		2,5	18		-0,7	44		2,5	112		-2	-		2,8
$\Delta W_s = \pm 20\%$	84		-4,6	93		-13	65		3,2	81		12	127		-4	-		6

При непрерывной работе выпарной установки, участвующей в сложном технологическом процессе, это может отрицательно повлиять на качество конечного продукта. Поэтому при проектировании системы управления ВА, необходимо соблюдать компромисс между быстродействием системы и максимально возможными отклонениями основных технологических переменных.

Экспериментальные исследования моделируемых систем выявили значительное отклонение уровня ниже предельно допустимого в системах, где управления ведется по двум каналам. В «позиционной САУ по притоку» данная проблема отсутствует, в связи с наличием реле на питающем канале. Стоит отметить еще одно существенное достоинство данной системы, заключающееся в отсутствии слива с гидрозатвора аппарата некондиционного продукта. Это связано с тем, что требуемая плотность/концентрация раствора достигается путем снижения уровня ниже линии слива и лишь по мере достижения заданного значения плотности уровень начинает возрастать, за счет увеличения регулятора расхода питающего раствора. Только после того, как уровень раствора достигнет гидрозатвора, произойдет естественный слив продукта требуемой плотности/концентрации.

Также стоит отметить недостаток данной системы. В случае увеличения плотности питающего раствора САУ увеличит его расход. А при естественном отборе кубового раствора через трубу небольшого диаметра, может возникнуть ситуация, при которой раствор не будет успевать сливаться, что приведет к недопустимому возрастанию уровня. Для исключения этой ситуации в системе должно быть регламентировано ограничение по максимальному расходу питающего раствора.

Исследование переходных процессов при возмущающих воздействиях (рисунки 3.15, 3.16, 3.17) показывает, что все три системы управления выпарным аппаратом отрабатывают 10 % изменения температуры входного раствора T_f и расхода греющего пара W_s , а также 5 % изменения плотности исходного раствора ρ_f , с приемлемыми показателями качества (таблица 3.4).

Основным возмущающим воздействием, существенно сказывающимся на качества работы системы управления ВА, является уменьшение плотности входного раствора ρ_f . Так, при уменьшении данного параметра на 8 % в «САУ по притоку» существенно понижается уровень и значительно увеличивается время регулирования по уровню. При том же возмущающем воздействии в «САУ по стоку» существенно понижается плотность раствора в аппарате и значительно увеличивается время регулирования по данному параметру. Средние показатели качества по данному возмущающему воздействию показывает «позиционная САУ по притоку».

Наилучшие показатели качества при изменении температуры входного раствора и теплового потока от нагревателя обеспечивает «САУ по стоку». В «САУ по притоку» время и динамическая ошибка регулирования примерно больше в 2 раза. Наихудшие показатели демонстрирует «позиционная САУ по притоку», у которой время регулирования на порядок больше предыдущих систем.

С учетом особенностей синтезированных систем управления и того, что ОУ находился на стадии разработки, «САУ по стоку» может быть рекомендована для проведения экспериментов с целью определения оптимального значения уровня раствора в аппарате, обеспечивающего лучшую циркуляцию раствора при изменении технологических переменных в регламентных границах.

При отработанной технологии выпаривания реэкстракта урана для конкретного ВА наиболее целесообразно использовать «позиционную САУ по притоку», в случае отсутствия необходимого регулирующего органа на линии отвода упаренного раствора. В противном случае можно использовать «САУ по притоку», обеспечивающую лучший стабилизирующий характер управления при изменениях плотности.

3.2.4 Экспериментальная проверка вариантов САУ на физической модели

Целями проведения экспериментальных исследований САУ ВА на физической модели являлись:

- определение зависимости эффективности выпаривания от уровня раствора в аппарате;
- проверка алгоритмов автоматического поддержания уровня;
- использование алгоритма достижения необходимой концентрации.

Для определения зависимости эффективности выпаривания от уровня раствора в аппарате был проведен следующий эксперимент:

- аппарат заполнялся до определенного уровня, который в течение всего эксперимента автоматически поддерживался с помощью насоса подкачки;
- для различных значений мощности нагревателя фиксировались скорость циркуляции и массовый расход пара;
- эксперимент проводился для двух различных уровней жидкости: 900 мл и 800 мл (синяя и красная черта на рисунке 3.18 соответственно).

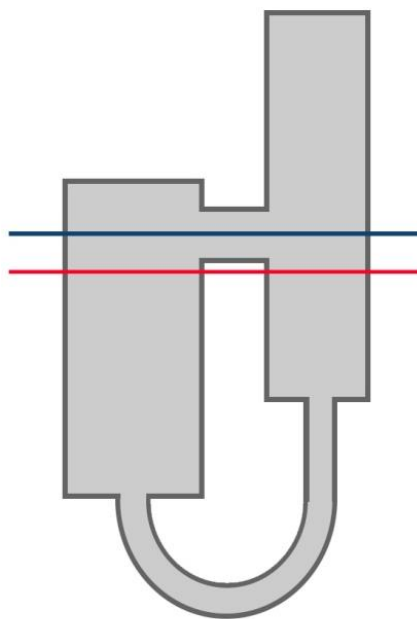
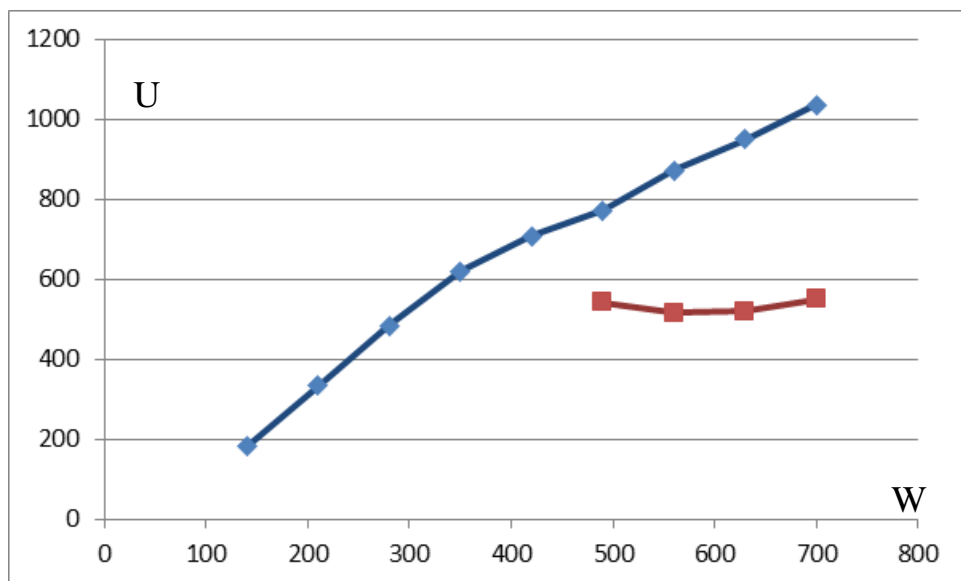


Рисунок 3.18 – Уровни раствора в аппарате, при которых производились исследования

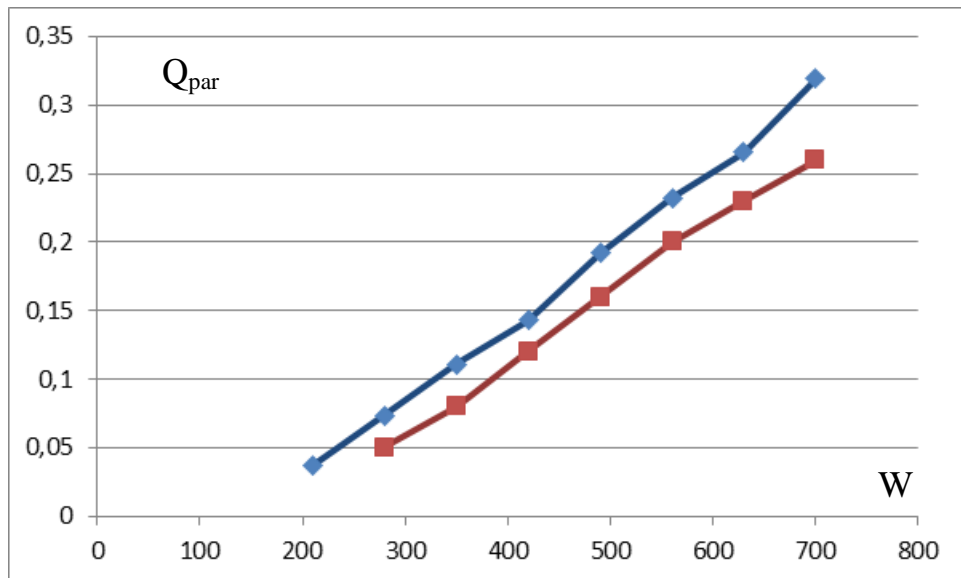
Теоретически уровень жидкости, отмеченный красным на рисунке 3.18, соответствует более эффективной работе выпарного аппарата. Более высокий или более низкий уровень обладают меньшей эффективностью.

На рисунках 3.19 и 3.20 представлены результаты указанного эксперимента. На первом рисунке видно, что при уровне 900 мл скорость циркуляции возрастает пропорционально мощности ТЭН, в то время как циркуляция при уровне 800 мл имеет постоянное, но меньшее значение. При рассмотрении массового расхода выходного пара данных уровней на рисунке 3.20 можно увидеть пропорциональные зависимости, однако при меньшем уровне жидкости выход пара при каждом значении мощности ТЭН будет меньше.



Синяя кривая соответствует уровню 900 мл; красная кривая 800 мл

Рисунок 3.19 – Зависимость скорости циркуляции раствора от мощности ТЭН



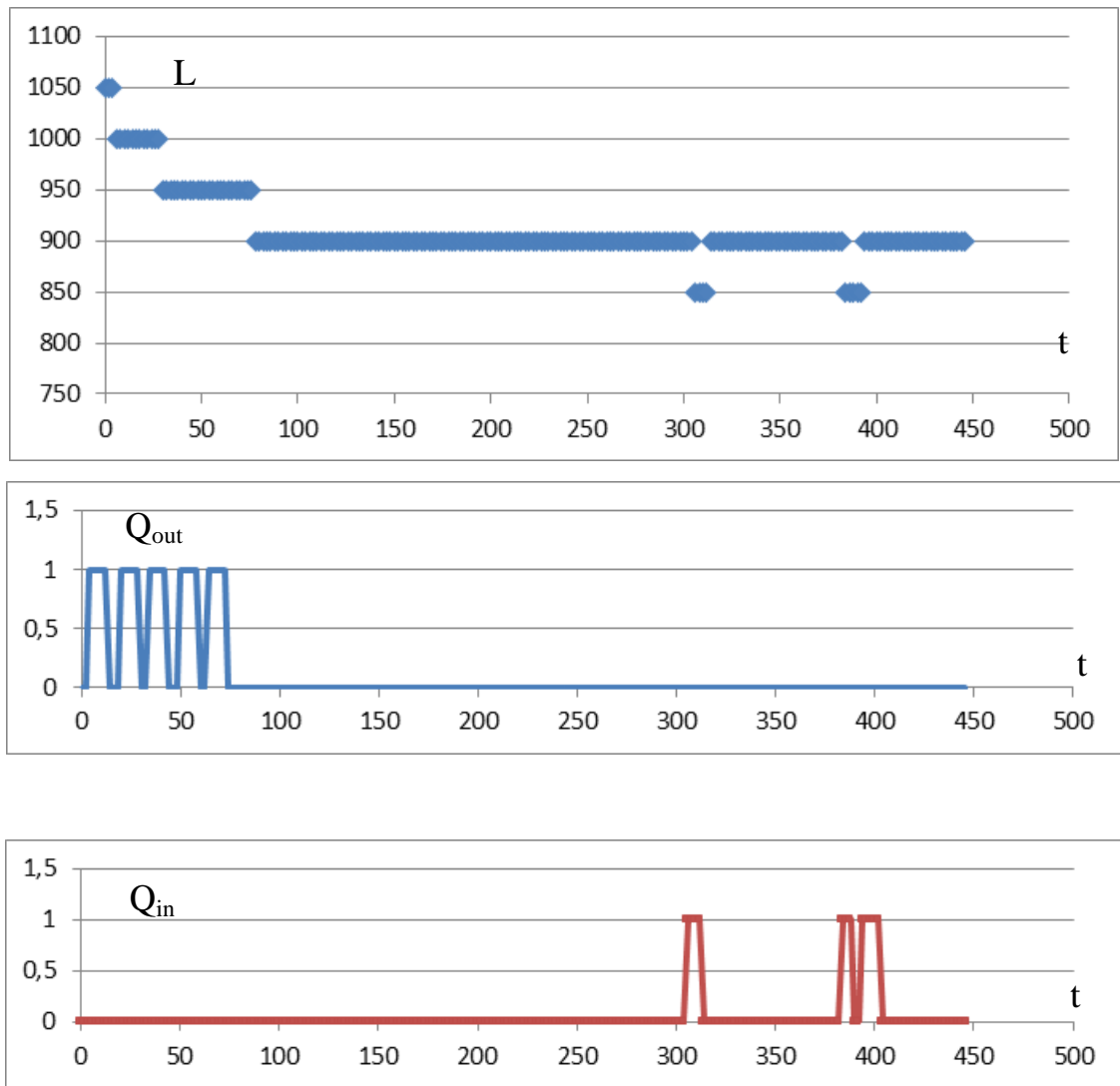
Синяя кривая соответствует уровню 900 мл; красная кривая 800 мл

Рисунок 3.20 – Зависимость массового расхода выходного пара от мощности ТЭН

Для проверки работы алгоритма поддержания уровня в выпарном аппарате был проведен следующий эксперимент:

- аппарат заполнялся до определенного уровня;
- в процессе работы аппарата наблюдалось изменение уровня и фиксировались сигналы, управляющие сигналами насосами.

На рисунке 3.21 представлены результаты указанного эксперимента. При включении алгоритма автоматического поддержания уровня был приведен в действие насос откачки, опустивший уровень жидкости до значения 900 мл. Затем, при падении уровня жидкости вследствие выпаривания включался насос подачи, компенсирующий данное падение уровня.



Первый рисунок – значение уровня; второй рисунок – сигналы управления на насос откачки; третий рисунок – сигналы управления на насос подачи

Рисунок 3.21 – Временные диаграммы эксперимента

3.3 Выводы по разделу

1 С целью определения наиболее оптимальных (с точки зрения разработки системы стабилизации) каналов управления выпарным аппаратом была проведена серия экспериментов на созданной компьютерной модели по определению статических характеристик объекта по основным технологическим каналам. Было обнаружено, что каналы $W_{s \rightarrow \rho}$, $Q_{f \rightarrow \rho}$

являются существенно нелинейными, а каналы $Q_p \rightarrow \rho$, $Q_p \rightarrow h$, $Q_f \rightarrow h$ – линейными. Кроме того, установлено, что с точки зрения управления рассматриваемый выпарной аппарат характеризуется нелинейностью и многосвязностью.

2 Теоретический анализ существующих САУ выпарными аппаратами показал, что классические системы управления выпарными аппаратами на основе ПИД-регуляторов обеспечивают требуемое качество регулирования и лишь немногим уступают альтернативным методам управления.

3 Структурный и параметрический синтез позволил произвести экспериментальные исследования различных вариантов САУ выпарным аппаратом. В результате исследований переходных процессов при ступенчатых возмущающих и управляющих воздействиях были определены основные показатели качества управления, представленные в таблице 3.4. Установлено, что если задачей регулирования аппарата является поддержание постоянной плотности упаренного раствора, то лучшее качество регулирования обеспечивается при выборе в качестве регулирующего воздействия по плотности изменение расхода упариваемого раствора. Если же требуется более качественное регулирование уровня в аппарате, то регулирование концентрации следует осуществлять изменением расхода на выходе, а уровня – на входе.

4 Исследование переходных процессов при возмущающем воздействии показало, что все рассмотренные системы управления выпарным аппаратом отрабатывают 10 % изменения температуры входного раствора T_f и расхода греющего пара W_s , а также 5 % изменения плотности исходного раствора ρ_f , с приемлемыми показателями качества (таблица 3.4).

5 Определено, что «САУ по стоку» может быть рекомендована для проведения экспериментов с целью определения оптимального значения уровня раствора в аппарате, обеспечивающего лучшую циркуляцию раствора при изменении технологических переменных в регламентных границах. При отработанной технологии выпаривания резкстракта урана для конкретного ВА

наиболее целесообразно использовать «позиционную САУ по притоку», в случае отсутствия необходимого регулирующего органа на линии отвода упаренного раствора, в противном случае можно использовать «САУ по притоку», обеспечивающую лучший стабилизирующий характер управления при изменениях плотности.

6 Экспериментальные исследования предложенных САУ на физической модели выпарного аппарата показали их работоспособность.

4 Реализация системы автоматизированного управления выпарным аппаратом

4.1 Разработка системы измерения технологических переменных в аппаратах ядерно-безопасного исполнения

В атомной промышленности в радиохимических производствах аффинажа природного урана (РХЗ СХК), переработки ОЯТ промышленных реакторов (РХЗ СХК, РХЗ ГХК) и ряда энергетических реакторов (РТ-1 ПО МАЯК) используются специализированные приборы [77]:

- НСУ-1(2) – нейтронный следящий уровнемер;
- НИОУ-1(М) – нейтронный измеритель отклонения уровня (границы раздела фаз);
- УБ-Э – уровнемер / плотномер буйковый электрический;
- УВВ – уровнемер высокочастотный взрывозащищенный;
- УВМ – уровнемер высокочастотный многоканальный;
- «Дельфин Ц» – уровнемер поплавковый.

Указанные приборы выпускались мелкими сериями на ряде предприятий атомной промышленности РФ.

Современные радиохимические производства, в том числе вновь создаваемые в рамках проекта «Прорыв» ГК «Росатом», требуют применения приборов: контроль уровня, плотности, границы раздела фаз, удельной электрической проводимости, расхода жидких сред. Отличительной чертой новых радиохимических производств является размещение большей части оборудования в «горячих» камерах, в отличие от традиционных технологий, где оборудование размещалось преимущественно в каньонах. Предпочтительны приборы, элементы которых, размещенные на технологическом оборудовании, не требуют обслуживания и отличаются высокой надежностью. С другой стороны, технологическое оборудование новых радиохимических производств

имеет ядерно-безопасное исполнение. Поэтому применение вышеуказанных специализированных приборов становится затруднительным. На момент выполнения настоящей работы российской промышленностью не выпускаются контрольно-измерительные приборы для измерения уровня, плотности, границы раздела фаз, расходов малых количеств вещества для новых схем проекта «Прорыв».

В предшествующих разделах настоящей работы была неоднократно обоснована необходимость контроля уровня и плотности раствора в камере разделения выпарного аппарата для решения задачи его эффективной автоматизации.

Для определения уровня и плотности раствора в выпарном аппарате может быть использован пьезометрический метод, основанный на измерении высоты столба жидкости по разности давлений, одно из которых зависит от уровня жидкости, а другое от давления над уровнем [78]. Реализация данного метода требует дополнительной установки двух датчиков давления в аппарат выше точки подвода исходного раствора (см. рисунок 4.1).

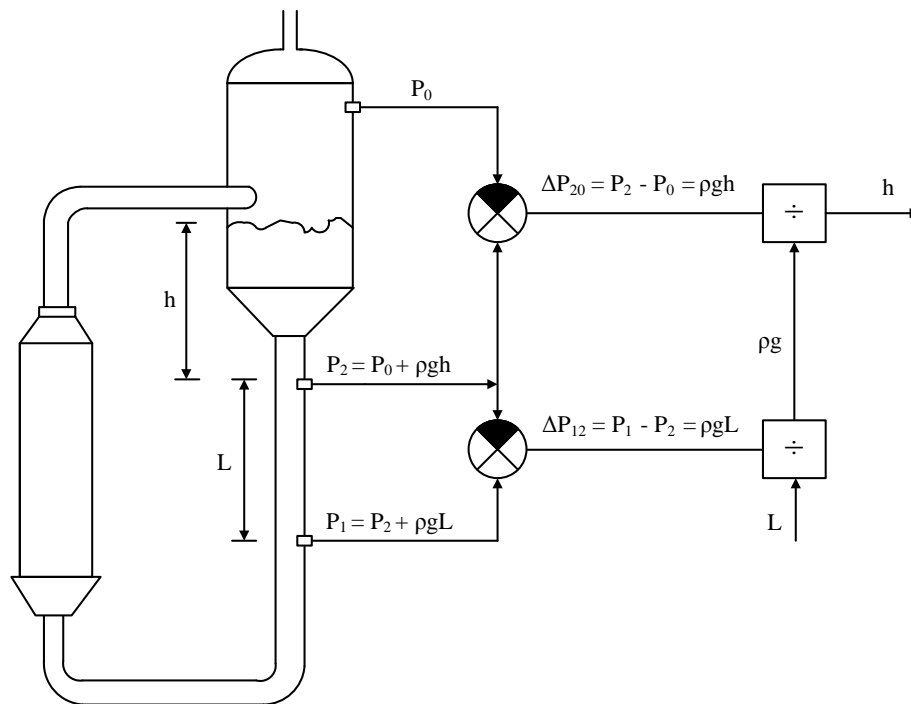


Рисунок 4.1 – Схема определения уровня раствора в выпарном аппарате

При интенсивной циркуляции раствора в аппарате можно пренебречь неоднородностью плотности раствора. По разности давлений раствора ΔP_{12} , измеренных двумя датчиками (P_1 и P_2), установленными на известном друг от друга расстоянии L , определяется плотность раствора ρ . Аналогичным образом определяется уровень раствора над верхним датчиком давления (P_2) через уже найденное значение плотности раствора ρ . Гидростатический уровень раствора (H) в аппарате определяется при срабатывании сигнализатора уровня, установленного на известной высоте. Дальнейшие изменения уровня H определяются через приращения h по выше описанному алгоритму.

Применение схемы измерения (рисунок 4.1) требует установки датчика давления непосредственно в выпарном аппарате. Для повышения радиационной стойкости схемы потребуются отдельная установка сенсоров датчиков давления от вторичных преобразователей, что приведет к существенному снижению помехоустойчивости схемы и надежности ее работы.

В результате выполнения аналитических исследований установлено, что уровень и плотность маточного раствора в выпарном аппарате целесообразно определять с помощью уровнемера-плотномером с капиллярными импульсными линиями, заполненными разделительной жидкостью [79, 80], разработки ООО «Сенсор». Это техническое решение успешно применено на лабораторном выпарном аппарате РИ (см. рисунок 4.2).

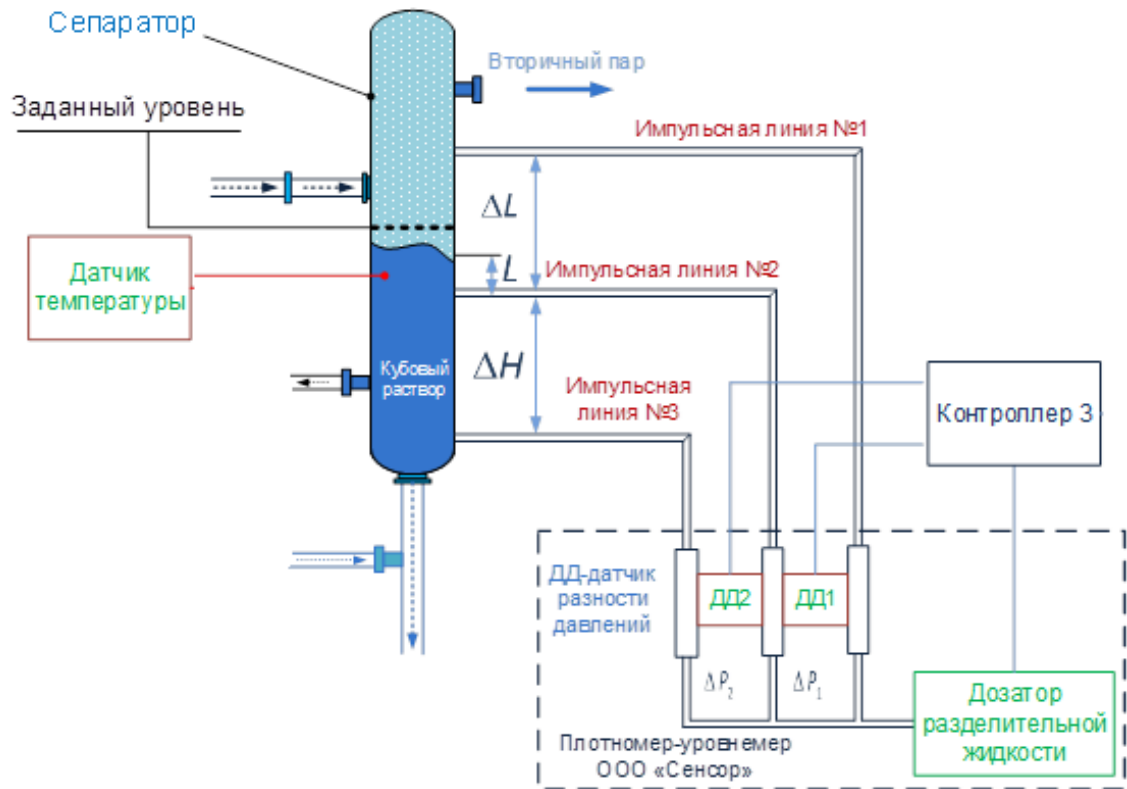


Рисунок 4.2 – Фрагмент структурной схемы лабораторного выпарного аппарата в Радиевом институте [80]

Уровнемер-плотномер обеспечивает измерение двух разностей давлений в трех, отличающихся по высоте точках камеры разделения. Передача давлений из контролируемой среды к датчикам дифференциального давления осуществляется по трем капиллярным импульсным линиям, заполненным разделительной жидкостью. Отличительной способностью от известных приборов является отсутствие разделительных мембран между внутренней полостью аппарата и свободными концами капиллярных линий. Следует отметить, что наличие мембран, с одной стороны требует значимой площади контакта раствор-мембрана, с другой стороны – вносит существенную погрешность в измерения гидростатического давления. Влияние перемешивания контролируемого раствора и разделительной жидкости в свободном конце капилляра на показания уровнемера-плотномера исключаются

тем, что со стороны датчика давления в капилляр периодически дозируется небольшие порции разделительной жидкости.

Контроль плотности кубового раствора в камере разделения осуществляется с помощью датчика дифференциального давления ДД2, контроль уровня раствора – с помощью датчика дифференциального давления ДД1 (см. рисунок 4.2).

На рисунке 4.3 приведена схема, поясняющая метод измерения уровня и плотности на основе измерения перепадов давления в нескольких точках технологической среды с применением капилляров. В аппарат устанавливаются капилляры 1, 2 и 3 разной длины $H_1 > H_2 \gg H_3$. Расстояния между капилляром 1 и 2 обозначено ΔH_1 , расстояние между 2 и 3 соответственно ΔH_2 . Эти расстояния жестко фиксированы. Точкой крепления капилляров может быть верхняя крышка аппарата (обозначено как «Уровень «0» крепления капилляров»). Дифференциальные измерители давления ΔP_1 и ΔP_2 должны располагаться на одном уровне. Уровень установки дифференциальных манометров над уровнем крепления капилляров обозначен как H . От величины H зависят абсолютные давления P_1, P_2, P_3 .

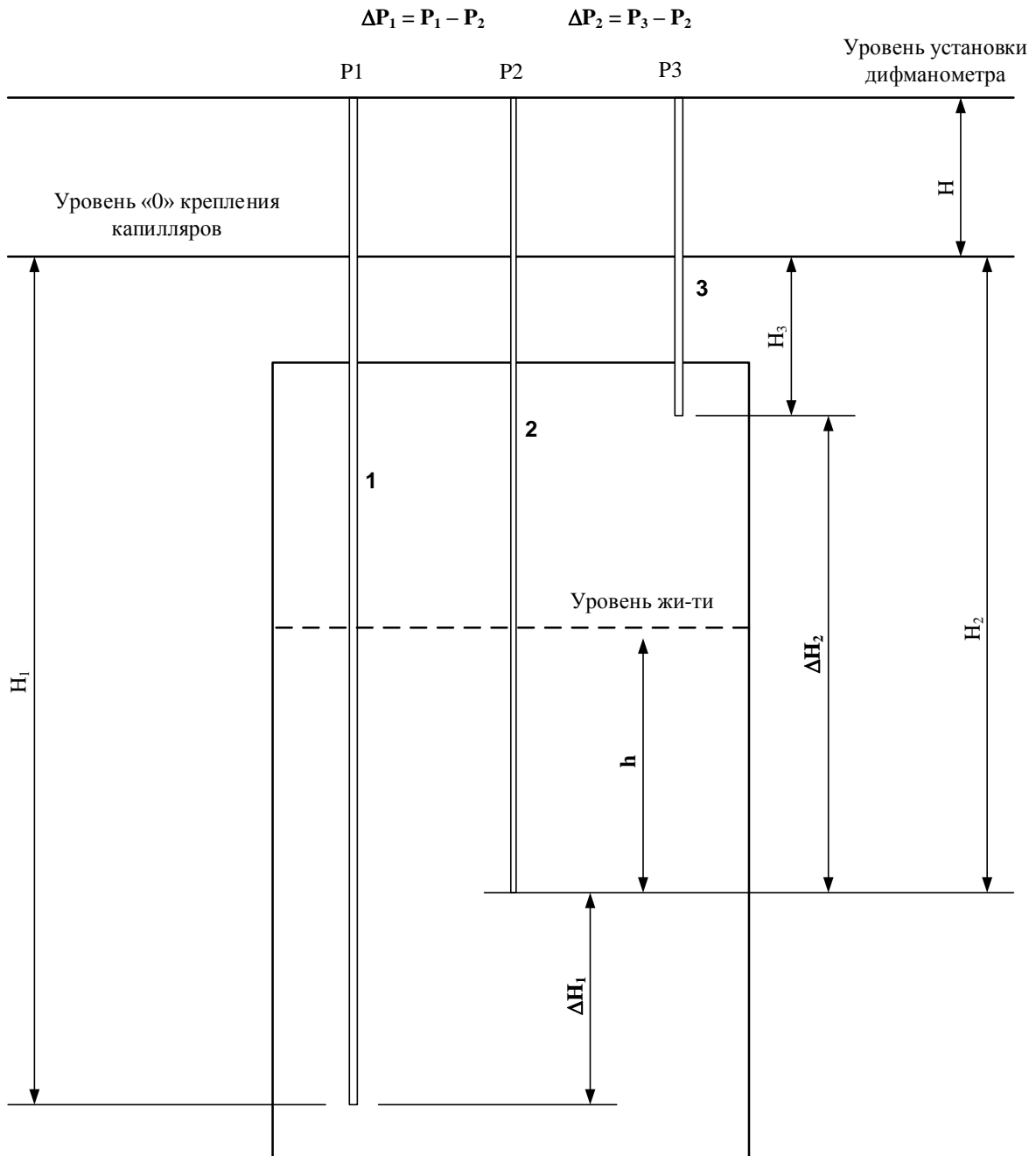


Рисунок 4.3 – Схема измерения уровня и плотности с применением капиллярных импульсных линий

Абсолютные давления P_1 , P_2 , P_3 определяются выражениями:

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot (h + H_1 - H_2) + P_a - \rho_{\text{рж}} \cdot g \cdot (H_1 + H), \quad (4.1)$$

$$P_2 = \rho \cdot g \cdot h + P_a - \rho_{\text{рж}} \cdot g \cdot (H_2 + H), \quad (4.2)$$

$$P_3 = P_a - \rho_{\text{рж}} \cdot g \cdot (H_3 + H), \quad (4.3)$$

где ρ – плотность жидкости в аппарате (измеряемая переменная);

h – измеряемый уровень первой фазы (жидкости) в аппарате (см. рисунок 4.3);

P_a – давление второй фазы в аппарате (как правило атмосферное давление);

$\rho_{рж}$ – плотность разделительной жидкости, известная величина, например, плотность дистиллированной воды.

С учетом выражений (4.1)–(4.3) показания дифференциальных манометров будут определяться выражениями:

$$\Delta P_1 = P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot \Delta H_1 - \rho_{рж} \cdot g \cdot \Delta H_1, \quad (4.4)$$

$$\Delta P_2 = P_3 - P_2 = \rho_{рж} \cdot g \cdot \Delta H_2 - \rho \cdot g \cdot h. \quad (4.5)$$

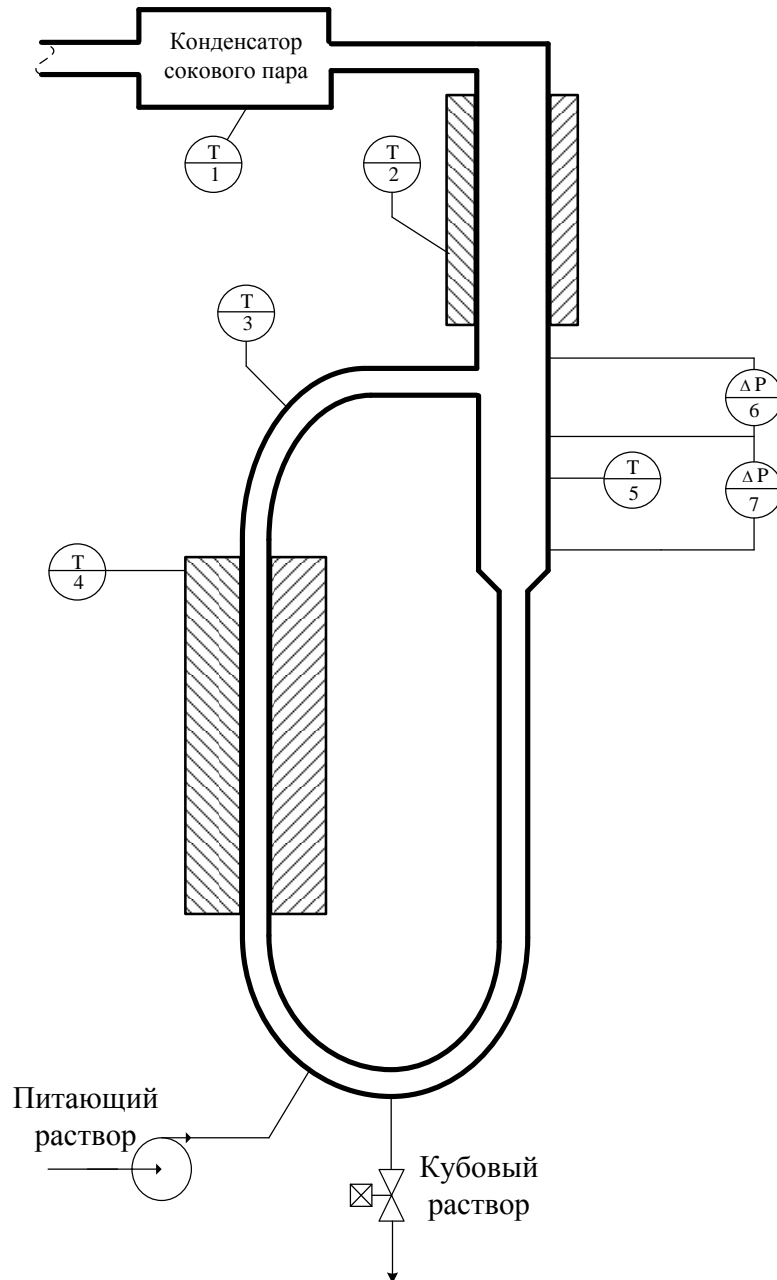
Соответственно из выражения (4.4) можно определить плотность, а из выражения (4.5) – уровень. В итоге расчетные выражения выглядят следующим образом:

$$\rho = \rho_{рж} + \frac{\Delta P_1}{g \cdot \Delta H_1}, \quad (4.6)$$

$$h = \frac{\rho_{рж} \cdot g \cdot \Delta H_2 - \Delta P_2}{\rho \cdot g}. \quad (4.7)$$

Выражения (4.6) и (4.7) позволяют рассчитывать плотность и уровень раствора в аппаратах по показаниям дифференциальных манометров.

Рассмотрим применимость данного метода к выпарным аппаратам аффинажного стенда СХК [4]. На рисунке 4.4 представлена функциональная схема автоматизации выпарных аппаратов аффинажного стенда.



1–5 – датчики температуры, 6–7 – датчики измерения дифференциального давления

Рисунок 4.4 – Функциональная схема автоматизации выпарных аппаратов

Существенным отличием применяемых аппаратов в стенде от подобных промышленных аппаратов является их малый объем вследствие относительно небольшого масштаба производства в защитном исполнении и обеспечения ядерной безопасности. АВ как объект управления обладает многосвязностью

переменных, существенной нелинейностью по отдельным каналам управления, а также отсутствием самовыравнивания (см. пункт 3.2.2).

В стенде применяются два выпарных аппарата: АВ2 для выпарки реэкстракта лигатуры до заданной плотности и АВ1 для выпарки рафинатов с заданной кратностью. Общим для рассматриваемых аппаратов является конструкция и функциональная схема автоматизации (см. рисунок 4.4).

На аффинажном стенде РХЗ СХК успешно испытана и внедрена в эксплуатацию (см. приложение А) схема гидростатического плотномера-уровнемера для выпарных аппаратов аффинажного стенда (см. рисунок 4.5). Датчики дифференциального давления Д1 и Д2 подключены к измерительной части АСУ ТП (к управляющему контроллеру).

В качестве датчиков дифференциального давления (Д1, Д2) используются прецизионные датчики дифференциального давления Yokogawa EJX-110А на 10 кПа с погрешностью не более 0,25 %.

В качестве дозатора разделительной жидкости используется перистальтический насос Masterflex LS. При этом управление дозатором разделительной жидкости также производится с помощью управляющего контроллера АСУ ТП.

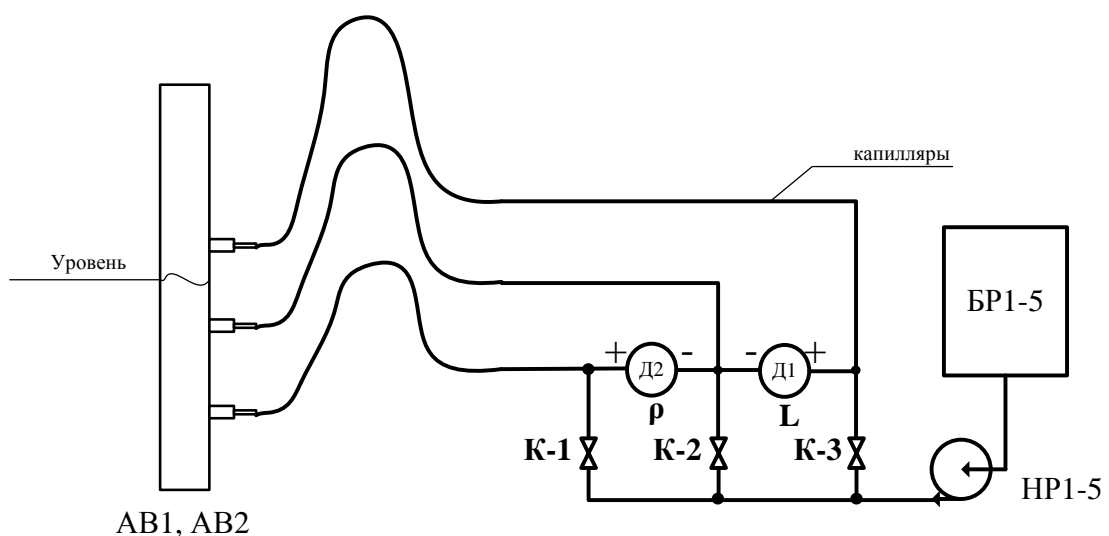


Рисунок 4.5 – Структурная схема гидростатического плотномера-уровнемера

Для независимого дозирования разделительной жидкости в импульсные линии (см. рисунок 4.5) установлены клапаны К1, К2, К3 с дистанционным управлением (управление клапанами с помощью контроллера). Марка клапанов – двухходовые клапаны Бюркерт 6011. В качестве разделительной жидкости в капиллярах используется дистиллированная вода ($\rho = 1$ г/мл).

Порядок запуска гидростатического метода в работу:

1) Проверить наличие воды в БР1-5, целостность капиллярных трубок и наличие гидрозатвора (капиллярные трубки должны иметь изгиб вверх, выше верхнего штуцера).

2) Открыть клапан К-3 и включить насос для заполнения водой верхнего капилляра. Одновременно с этим, необходимо открыть штуцер на корпусе дифманометра Д1 для заполнения его измерительной камеры. Как только из открытого штуцера польётся вода, необходимо его закрыть и затем одновременно закрыть клапан К-3 и отключить насос.

3) Открыть клапан К-2, включить насос и заполнить измерительные камеры дифманометров Д1 и Д2. Закрывать – в обратной последовательности: штуцера на дифманометрах, затем одновременно клапан К-2 и насос.

4) Открыть клапан К-1, включить насос и заполнить измерительные камеры дифманометра Д2. Закрывать – в обратной последовательности: штуцер на дифманометре, затем одновременно клапан К-1 и насос.

Данная процедура проводится однократно при первом запуске в ручном режиме, причём необходимо визуально контролировать отсутствие пузырьков воздуха в капиллярах. Во время работы выпарного, необходимо периодически включать насос и поочерёдно открывать клапана К-1,2,3. Эта процедура необходима для заполнения капилляров водой, а также для защиты от попадания выпариваемого раствора в капилляры. Данная задача автоматизирована и реализована на алгоритмах в управляющем контроллере АСУ ТП. Включение автоматического дозирования производится с мнемосхемы на автоматизированном рабочем месте (АРМ) аппаратчика нажатием кнопки «авто» под изображением выпарного аппарата.

На рисунке 4.6 приведена укрупненная схема алгоритма программы расчета плотности и уровня на примере выпарного аппарата АВ2, а в таблице 4.1 – описание переменных.

Таблица 4.1 – Описание переменных регулятора уровня выпарного аппарата АВ2

Название переменной	Описание переменной
AB2-K16	Плотность (по давлению) в выпарном аппарате АВ2
AB2-K01	Уровень (по давлению) в выпарном аппарате АВ2
A_IAB2	Автомат/ручной для дозатора разд. жидкости АВ2
dH_AB2	Расстояние между 2 и 3 штуцерами (схемы измерения плотности и уровня), мм
pg_AB2	Плотность разделительной жидкости для АВ2, г/мл
L0_AB2	Постоянная для уровня в АВ2 (балансировка «0»), мм
Tim_AB2	Период следования импульсов (для дозатора разделительной жидкости), с
dim_AB2	Длительность импульса (для дозатора разделительной жидкости), с
Tf_DAB2	Постоянная фильтра для плотности АВ2, с
Tf_LAB2	Постоянная фильтра для уровня в АВ2, с
dQ_HP1-5	Величина расхода для насоса HP1-5 (амплитуда импульсов)
HP1-5_Qвых	Задание расхода насоса HP1-5 (продувка капилляров)
DAB2f	Сглаженное значение плотности в АВ2, г/мл
LAB2f	Сглаженное значение уровня в АВ2, мм

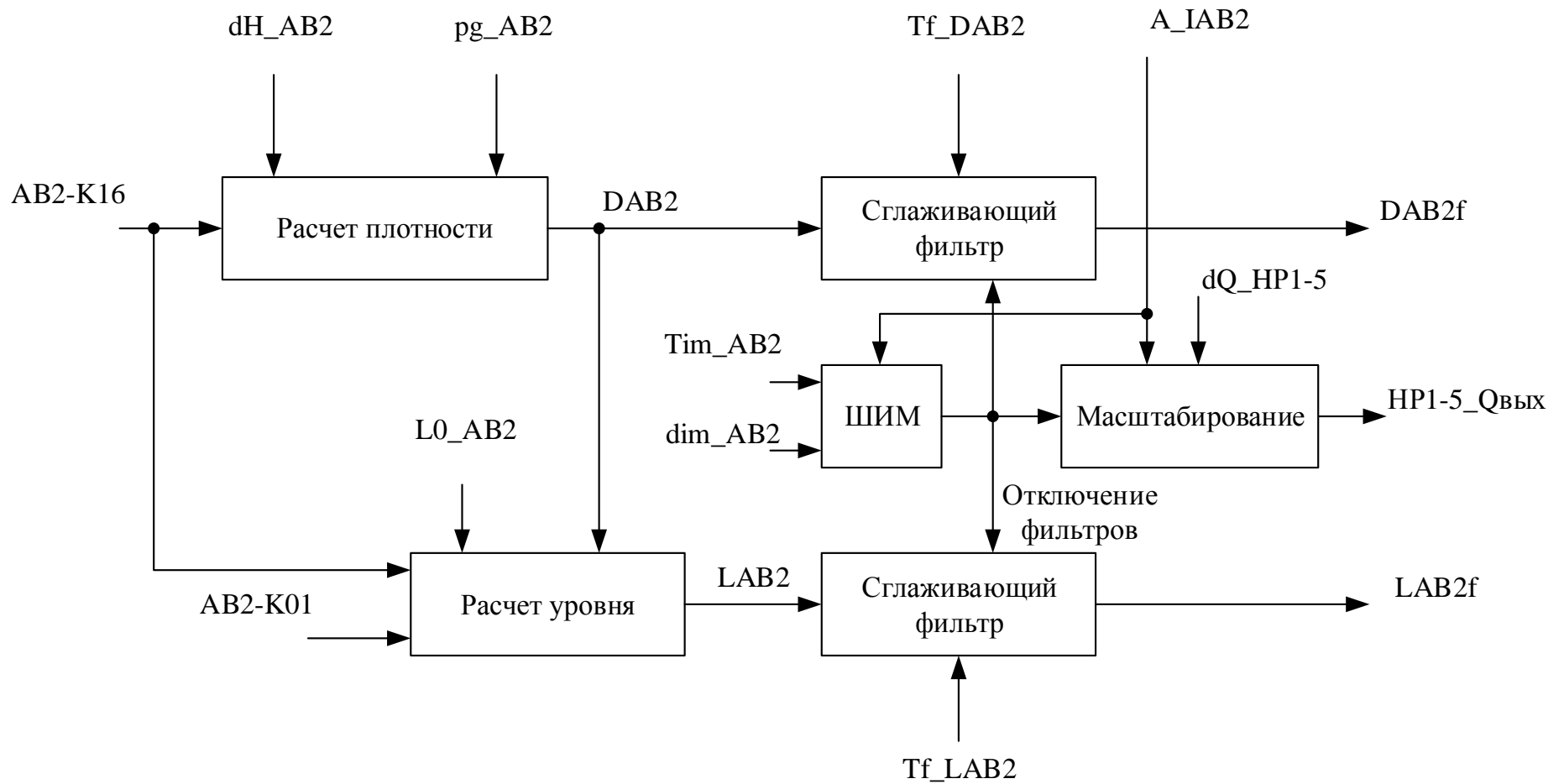


Рисунок 4.6 – Укрупненная схема алгоритма программы расчета плотности и уровня в выпарном аппарате AB2

Мнемосхема для программы расчета плотности и уровня в выпарном аппарате АВ2 приведена на рисунке 4.7.

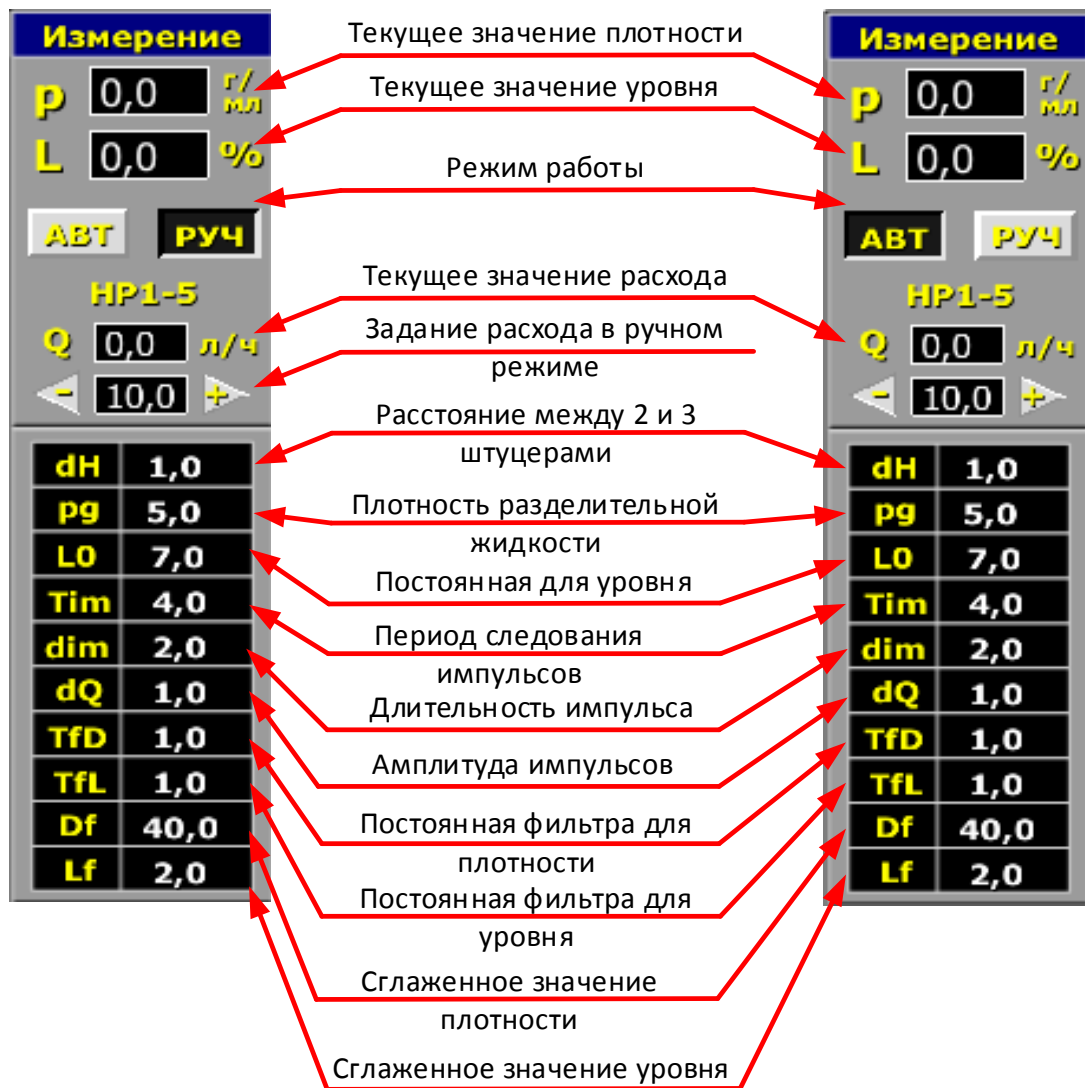


Рисунок 4.7 – Мнемосхема подсистемы измерения уровня и плотности раствора в камере разделения выпарного аппарата АВ2

Принцип работы программы следующий:

- плотность рассчитывается по перепаду давления АВ2-К16 (см. выражение (4.6));
- уровень рассчитывается с учетом плотности по перепаду давления АВ2-К01 (см. выражение (4.7));

- рассчитанные значения плотности и уровня поступают на сглаживающие фильтры;

- при включенном автоматическом дозировании разделительной жидкости ($A_{IAB2} = 1$) с помощью ШИМ формируются импульсы расхода разделительной жидкости с периодом следования T_{im_AB2} , длительностью dim_AB2 и амплитудой dQ_{HP1-5} , при этом, на длительность импульса по расходу разделительной жидкости происходит отключение сглаживающих фильтров плотности и уровня (фильтры на своем выходе формируют предыдущие значения плотности и уровня);

- при выключенном автоматическом дозировании разделительной жидкости ($A_{IAB2} = 0$) задание расхода для насоса HP1-5 производится с мнемосхемы, при этом, если заданная величина расхода больше нуля, сглаживающие фильтры отключаются.

Алгоритм программы расчета плотности и уровня для выпарного аппарата АВ1 полностью аналогичен рассмотренному алгоритму.

Применение отдельных дифференциальных манометров существенно увеличивает стоимость реализации измерения уровня и плотности в выпарном аппарате по отношению к типовым приборам измерения уровня и плотности. С другой стороны, нагрузка расчетных процедур по алгоритму, представленному на рисунке 4.6, на промышленный контроллер АСУ ТП аффинажного стенда снижает надежность работы системы. Для улучшения показателей цена / надежность в настоящей работе предложено реализовать отдельно стоящие дифференциальные манометры в виде сдвоенного дифференциального манометра в едином корпусе. 3D-модель сдвоенного дифференциального манометра приведена на рисунке 4.8. Сдвоенный дифференциальный манометр построен на отечественных сенсорах давления (см. рисунок 4.9), что позволило существенно снизить стоимость контрольной точки по уровню/плотности по отношению со схемой с применением импортных дифференциальных манометров.

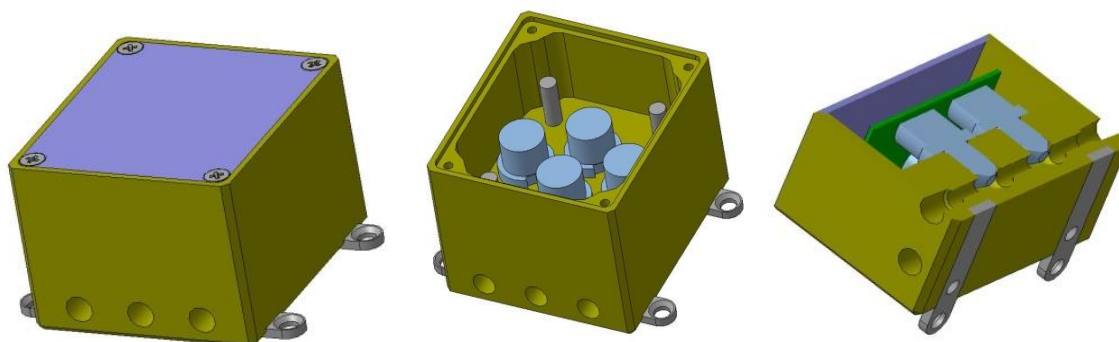


Рисунок 4.8 – Сдвоенный дифференциальный манометр



а)

б)

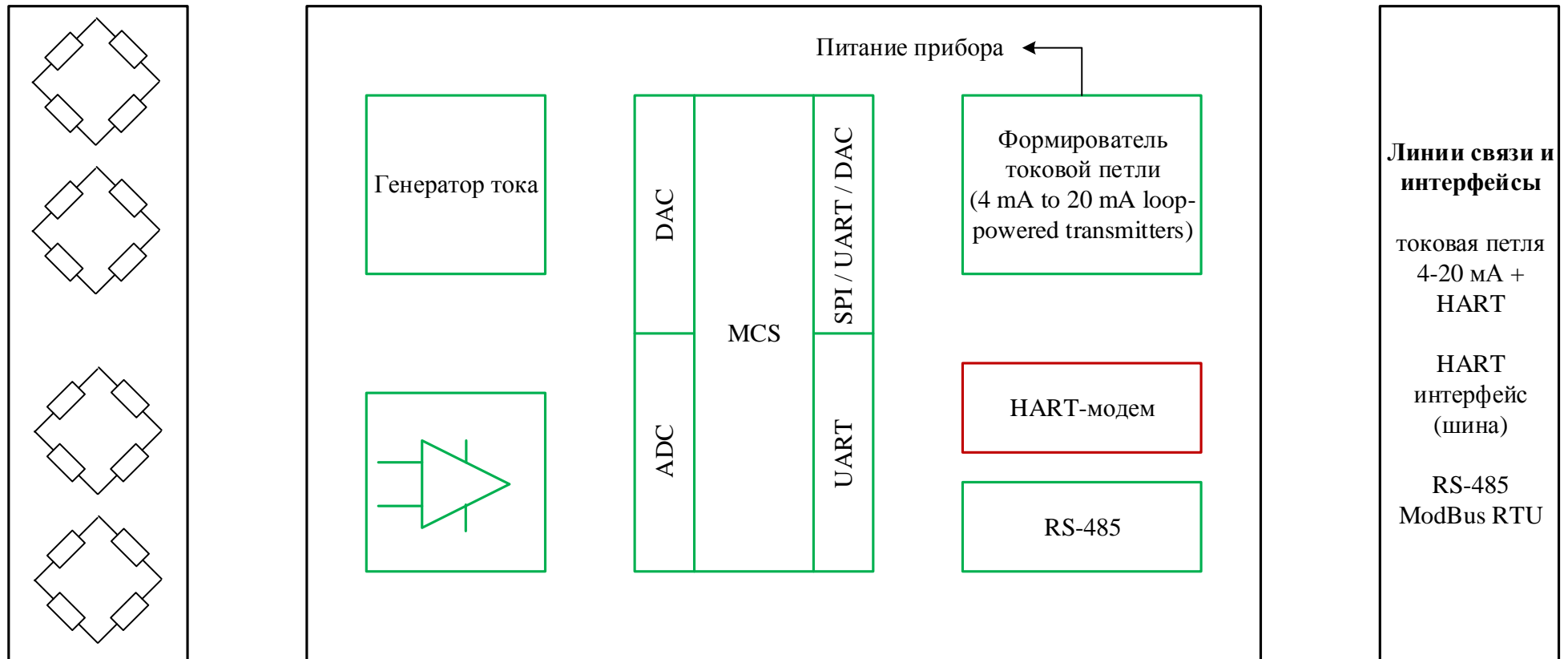
а – сенсор производства НПК ВИП (<http://zaovip.ru/>) серии Д;

б – сенсор производства НПП «Восток» (<http://vostok.nsk.su/>)

Рисунок 4.9 – Сенсоры сдвоенного дифференциального манометра

Для повышения стабильности работы прибора в части дрейфа нуля предложено использовать парное включение мостов сенсоров давления. В сдвоенный дифференциальный манометр устанавливается 4 сенсора, 2 пары (см. рисунок 4.8). Методика подбора сенсоров отличается от известных тем, что в пару выбираются сенсоры с сопоставимым по скорости дрейфом нуля, но отличающимся по знаку. Такое решение по отношению к аналогам позволило существенно снизить себестоимость прибора при сохранении стабильности работы прибора (обеспечении длительного межповерочного интервала).

Сдвоенный дифференциальный манометр имеет один единый интеллектуальный вторичный преобразователь (см. рисунок 4.10), что также обеспечило снижение себестоимости прибора по отношению к аналогам.



ADC – аналого-цифровой преобразователь

DAC – цифро-аналоговый преобразователь

MCS – микроконтроллер

SPI – последовательный синхронный интерфейс

UART – последовательный асинхронный приемо-передатчик

Рисунок 4.10 – Укрупненная схема интеллектуального вторичного преобразователя датчика давления

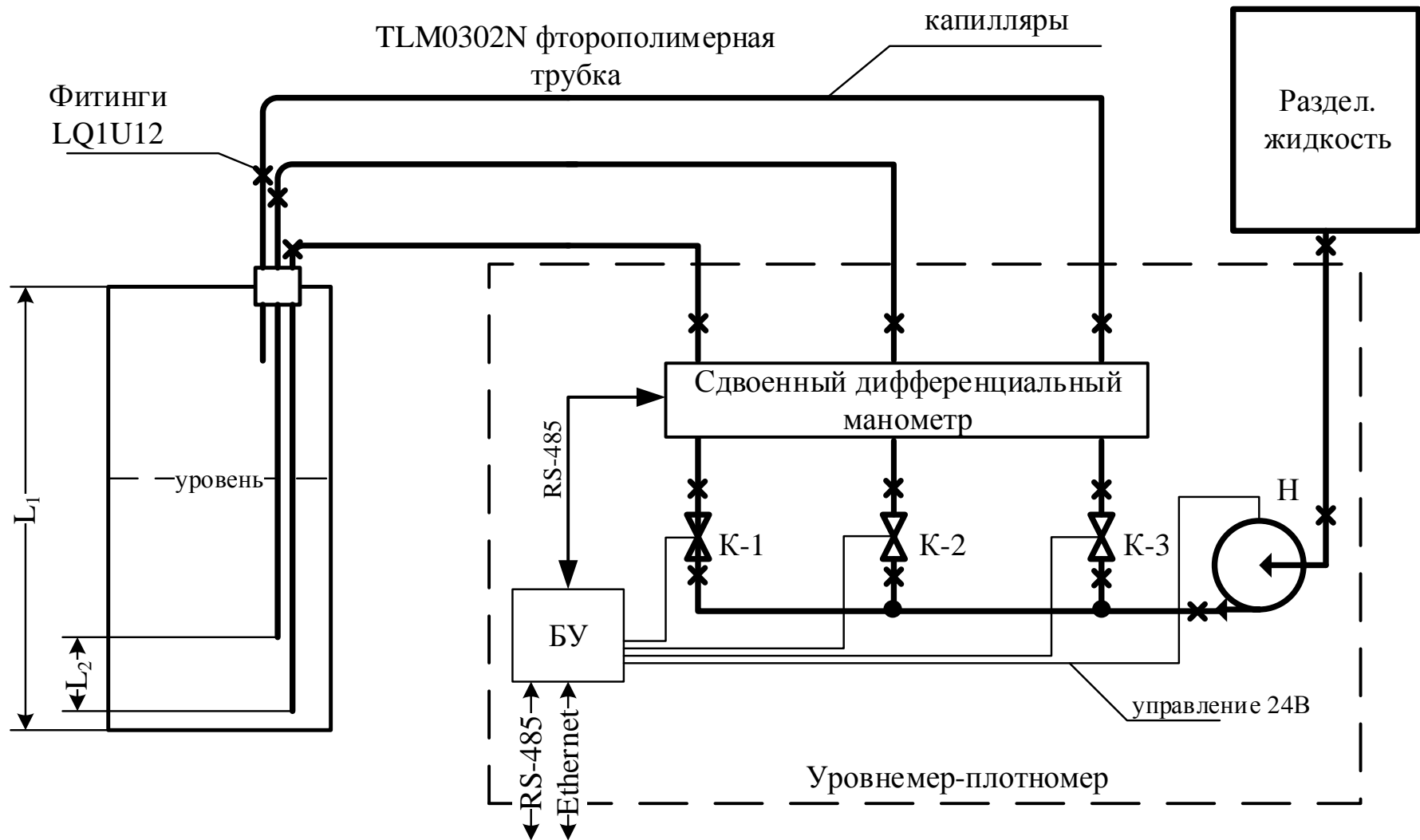


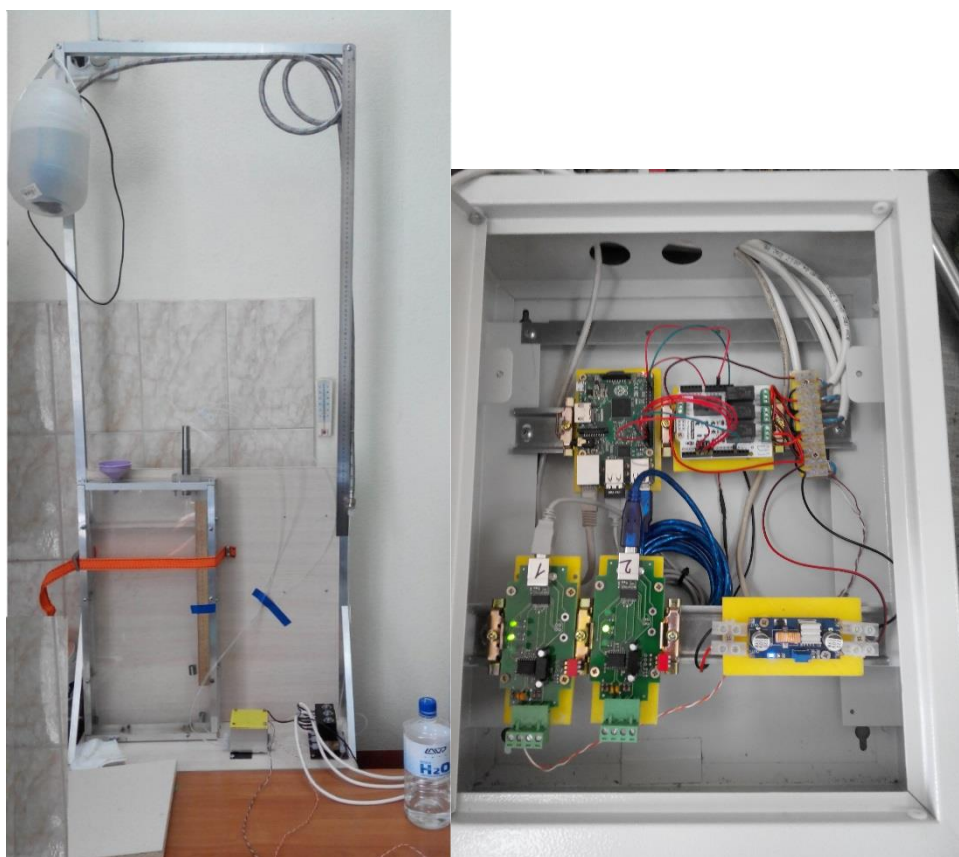
Рисунок 4.11 – Схема лабораторного стенда по исследованию уровнемера-плотномера

Интеллектуальный вторичный преобразователь выполнен на отечественной элементной базе, основные элементы:

- однокристальный микроконтроллер K1986BE93У (ядро ARM Cortex-M3, 2UART, SPI, два 12-bit ADC 16 ch., 2 ch. DAC 12 bit , 3 PWM, 0,5 мА/МГц);
- приемо-передатчик RS-485 5559ИН10АУ;
- стабилизатор питания 1309ЕС015.

HART-модем построен на интегральной микросхеме AD5700, производства Analog Device. В дальнейшем для обеспечения полного замещения импортных комплектующих планируется использование дискретного HART-модема, построенного на отечественной элементной базе.

Испытание модифицированной схемы измерения уровня и плотности производилось на базе лабораторного стенда (см. рисунок 4.11, 4.12).



а)

б)

а – лабораторный стенд; б – шкаф блока управления

Рисунок 4.12 – Внешний вид лабораторного стенда по исследованию уровнемера-плотномера

В отличие от патента [79] в схеме измерения уровня и плотности применен гибкий измерительный щуп (см. рисунок 4.13)

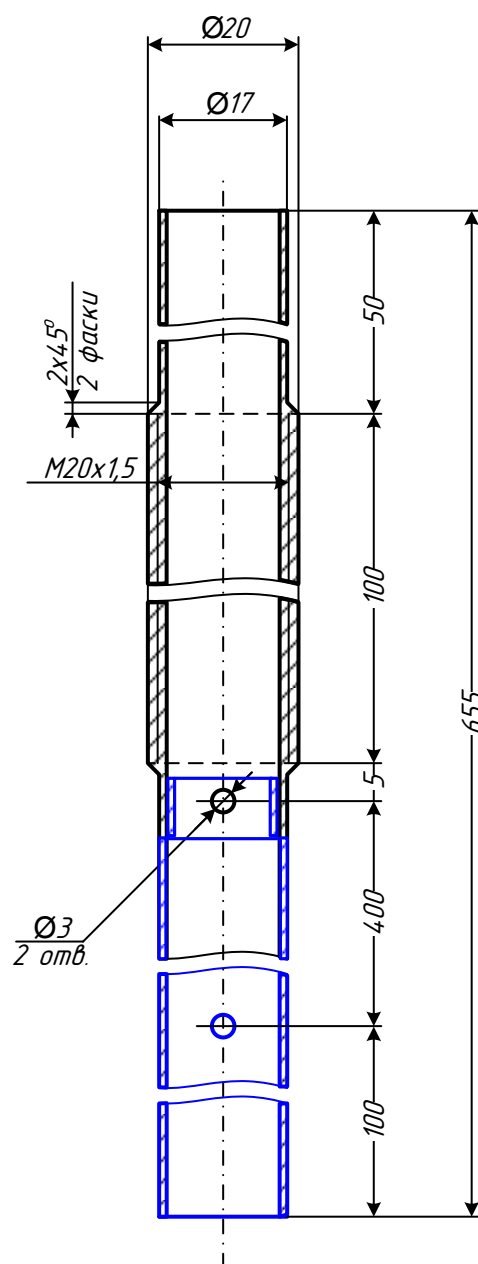


Рисунок 4.13 – Гибкий измерительный щуп плотномера-уровнемера на основе капилляров

Гибкий щуп состоит из 2 частей, первая часть (верхняя) выполнена из нержавеющей стали марки 06ХН28МДТ, вторая часть (нижняя, выделена цветом) выполнена из фторполимерной трубки TLM1210N. Фторполимерная трубка клеивается в трубку из нержавеющей стали на компаунд. Внутри

гибкого щупа устанавливаются три капилляра из фторполимерной трубки TLM0302N согласно рисунку 4.11. Капилляры уплотняются внутри щупа химически-стойким компаундом.

Применение гибкого измерительного щупа (рисунок 4.13) позволяет существенно облегчить эксплуатацию прибора в условиях плотной компоновки аппаратов в горячих камерах новых радиохимических производств.

В экспериментальном образце прибора блок управления БУ выполнен на одноплатном микрокомпьютере с интегрированными периферийными устройствами (линии дискретного ввода/вывода, RS-485, USB, Ethernet и др.). Предусмотрена возможность модификации программного обеспечения в режиме он-лайн (по месту установки прибора).

Питание экспериментального прибора измерения уровня и плотности осуществляется от сети постоянного тока напряжением 24 В.

В серийном образце прибора блок управления будет совмещен с электроникой считывания с сенсоров дифференциального манометра. Электроника будет расположена в корпусе сдвоенного дифференциального манометра (см. рисунок 4.8).

Экспериментальные исследования опытного образца прибора измерения плотности и уровня показали следующие параметры:

- приведенная ошибка измерения перепада давления не более 0,4 %;
- нелинейность шкалы измерения перепада давления не более 0,4 %;
- приведенная ошибка измерения уровня и плотности жидкости в емкости ядерно-безопасной геометрии – не более 1 %.

Лабораторный стенд внедрен в учебный процесс (см. приложение Б).

Работа выполнялась при финансовой поддержке:

- 1) Министерства образования и науки РФ (Задание № 8.3079.2017/ПЧ);
- 2) ОАО «Манотомь» (Договор №18.14-92/2017).

Планируется серийное производство прибора на базе ОАО «Манотомь» (см. приложении В).

4.2 Реализация системы автоматизированного контроля и управления выпарными аппаратами аффинажного стенда СХК

Экспериментальные исследования выпарного аппарата на физической и компьютерной модели (см. раздел 2) показали существенную чувствительность режима работы выпарного аппарата к положению уровня жидкости в камере разделения. Поэтому с учетом результатов исследований, представленных в пункте 3.2.3 предлагается взять за основу «САУ по стоку». Выпарные аппараты аффинажного стенда к моменту выполнения настоящей работы не имели гидрозатвора для слива куба с необходимого уровня в камере разделения. Указанная особенность существенно усложнила реализацию системы автоматического управления. Для решения этой задачи предложено использовать широтно-импульсное управление дискретным выпускным клапаном выпарного аппарата. При этом были сделаны следующие допущения: 1) контур стабилизации уровня в камере разделения обеспечивает ошибку стабилизации уровня не более 1 %; 2) давление в камере разделения изменяется в нормальном режиме работы в пределах не более 1 %. С учетом этих допущений расход кубового раствора при открытии выпускного клапана можно считать условно постоянным.

В результате выполненных исследований разработано программное обеспечение алгоритма управления выпарными аппаратами АВ2 и АВ1 аффинажного стенда.

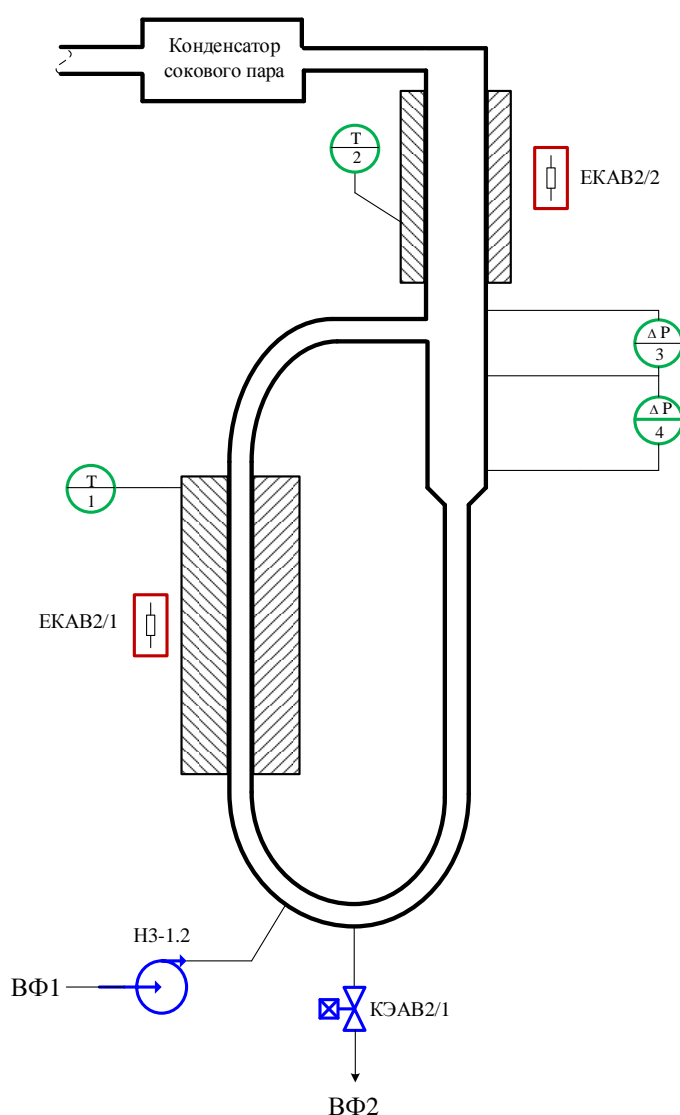
Укрупненная схема для алгоритма управления АВ2 приведена на рисунке 4.14. Программное обеспечение алгоритма управления выпарным аппаратом АВ2 включает 4 локальных регулятора:

- регулятор уровня раствора в камере разделения (управляющим воздействием является заданное значение расхода исходного продукта ВФ1 для перистальтического насоса Н1АВ2);

- регулятор плотности раствора в камере разделения (управляющим воздействием является дискретный сигнал на выдающий клапан КЭАВ2/1 управления отбором куба ВФ2);

- регулятор температуры 1 – температуры греющей камеры (управляющим воздействием является дискретный сигнал на ТЭН ЕКАВ2/1);

- регулятор температуры 2 – температуры в контуре дополнительного обогрева камеры разделения (управляющим воздействием является дискретный сигнал на ТЭН ЕКАВ2/2).



1,2 – датчики температуры 1 и 2, 3,4 – датчики измерения дифференциального давления, ВФ – водная фаза, КЭАВ2 – дискретный клапан, ЕКАВ2 - нагреватель

Рисунок 4.14 – Функциональная схема автоматизации выпарных аппаратов

На рисунке 4.15 приведена укрупненная схема алгоритма программы регулятора уровня раствора в камере разделения выпарного аппарата АВ2, а в таблице 4.2 – описание переменных.

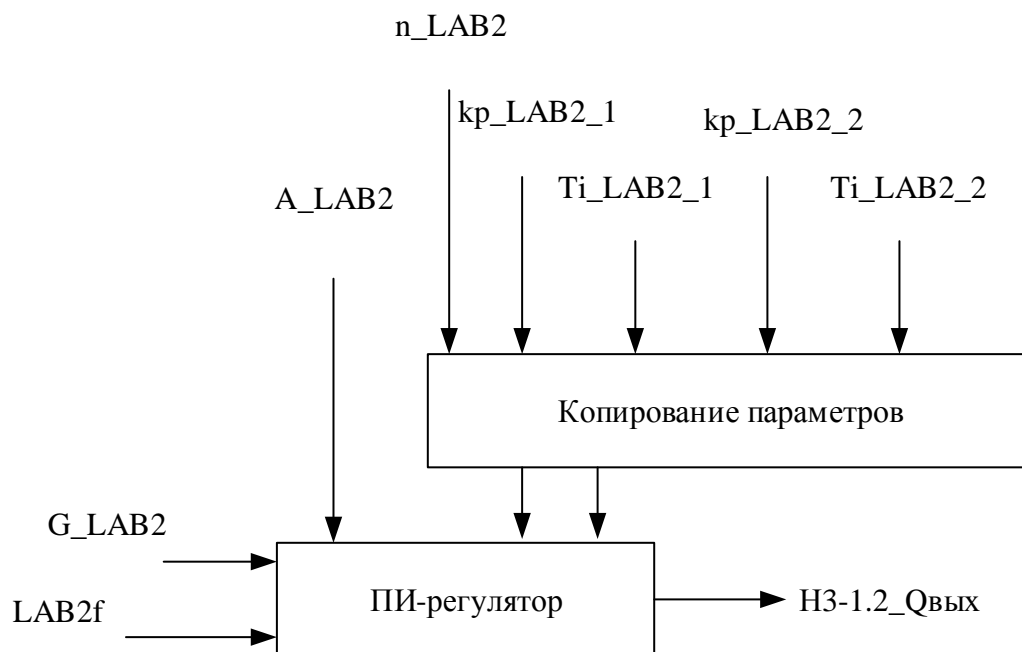


Рисунок 4.15 – Укрупненная схема алгоритма программы регулятора уровня раствора в камере разделения выпарного аппарата АВ2

Таблица 4.2 – Описание переменных регулятора уровня выпарного аппарата АВ2

Название переменной	Описание переменной
G_LAB2	Заданное значение уровня в АВ2
LAB2f	Сглаженное значение уровня в АВ2
H3-1.2_Qвых	Задание расхода насоса H3-1.2
A_LAB2	Автомат/ручной регулятора уровня в АВ2
n_LAB2	Номер параметров для регулятора уровня в АВ2
kр_LAB2_1	Коэффициент передачи регулятора уровня АВ2 (1 подгруппа параметров)
Ti_LAB2_1	Время интегрирования регулятора уровня АВ2 (1 подгруппа параметров)
kр_LAB2_2	Коэффициент передачи регулятора уровня АВ2 (2 подгруппа параметров)
Ti_LAB2_2	Время интегрирования регулятора уровня АВ2 (2 подгруппа параметров)

Алгоритм регулятора работает следующим образом:

- если регулятор находится в ручном режиме ($A_LAB2 = 0$), то заданному значению автоматически присваивается текущее значение уровня в АВ2 ($GLAB2 = LAB2f$), при этом, задание расхода для насоса НЗ-1.2 доступно с мнемосхемы;
- если регулятор находится в автоматическом режиме ($A_LAB2 = 1$), то заданному значению присваивается рассчитанное значение заданного расхода по ПИ-закону регулирования;
- в зависимости от значения переменной n_LAB2 в регулятор поступают параметры настройки либо для 1 подгруппы параметров (в случае $n_LAB2 = 1$) или для 2 подгруппы параметров (в случае $n_LAB2 = 1$).



Рисунок 4.16 – Мнемосхема управления регулятором уровня раствора в камере разделения выпарного аппарата АВ2

На рисунке 4.16 представлена мнемосхема управления регулятором уровня раствора в камере разделения выпарного аппарата АВ2.

На рисунке 4.17 приведена укрупненная схема алгоритма программы регулятора плотности раствора в камере разделения выпарного аппарата АВ2, а в таблице 4.3 – описание переменных.

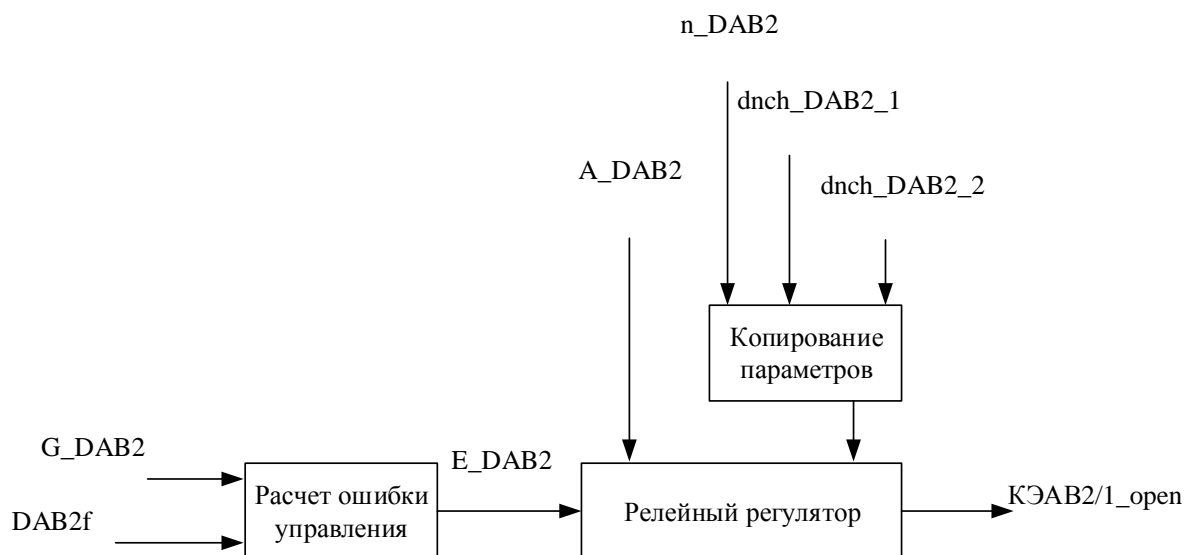


Рисунок 4.17 – Укрупненная схема алгоритма программы регулятора плотности раствора в камере разделения выпарного аппарата АВ2

Таблица 4.3 – Описание переменных регулятора плотности выпарного аппарата АВ2

Название переменной	Описание переменной
G_DAB2	Заданное значение плотности раствора в АВ2
DAB2f	Сглаженное значение плотности раствора в АВ2
E_DAB2	Ошибка регулятора плотности раствора в АВ2
KЭАВ2/1_Open	Открыть клапан КЭАВ2/1
A_DAB2	Автомат/ручной регулятора плотности раствора в АВ2
n_DAB2	Номер параметров для регулятора плотности в АВ2
dnch_DAB2_1	Зона нечувствительности по плотности в АВ2 (1 подгруппа параметров)
dnch_DAB2_2	Зона нечувствительности по плотности в АВ2 (2 подгруппа параметров)

Алгоритм регулятора работает следующим образом:

- если регулятор находится в ручном режиме ($A_{DAB2} = 0$), то заданному значению автоматически присваивается текущее значение плотности

раствора в АВ2 ($G_BAB2 = LAB2f$), при этом, управление клапаном КЭАВ2/1 доступно с мнемосхемы;

- если регулятор находится в автоматическом режиме ($A_DAB2 = 1$), то управление клапаном осуществляется с помощью реле в зависимости от текущего значения ошибки E_DAB2 ;

- в зависимости от значения переменной n_DAB2 в регулятор поступают параметры настройки либо для 1 подгруппы параметров (в случае $n_DAB2 = 1$) или для 2 подгруппы параметров (в случае $n_DAB2 = 2$).

На рисунке 4.18 представлена мнемосхема управления регулятором плотности раствора в камере разделения выпарного аппарата АВ2.

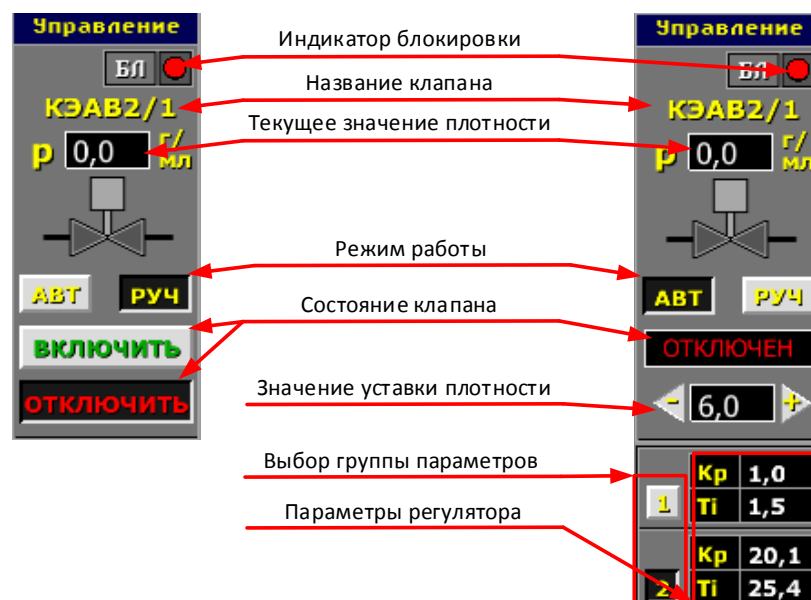


Рисунок 4.18 – Мнемосхема управления регулятором плотности раствора в камере разделения выпарного аппарата АВ2

На рисунке 4.19 приведена укрупненная схема алгоритма программы регулятора температуры 1 (см. рисунок 4.14) выпарного аппарата АВ2, а в таблице 4.4 – описание переменных.

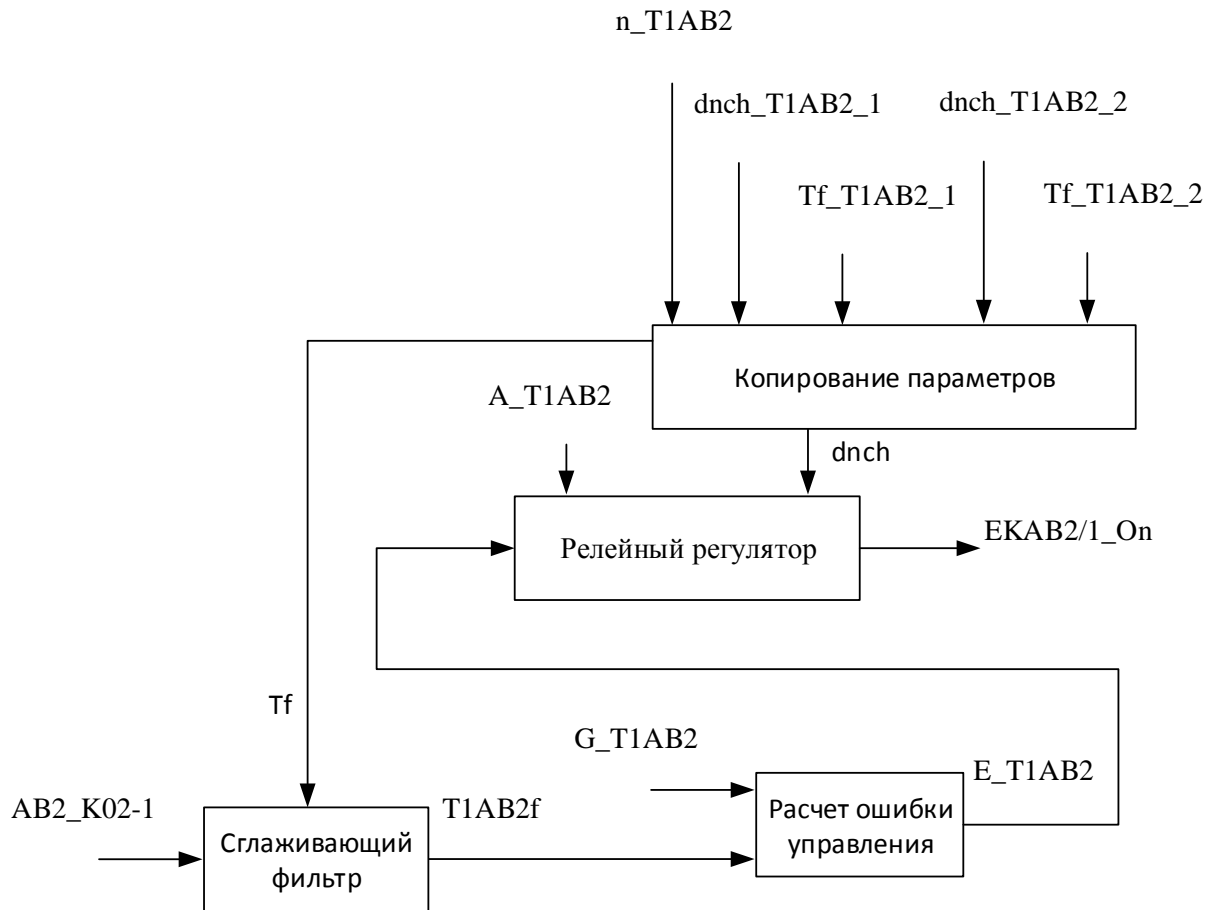


Рисунок 4.19 – Укрупненная схема алгоритма программы регулятора температуры 1 выпарного аппарата AB2

Таблица 4.4 – Описание переменных регулятора температуры 1 выпарного аппарата AB2

Название переменной	Описание переменной
AB2_K02-1	Температура 1 в выпарном аппарате AB2
G_T1AB2	Заданное значение температуры 1 в AB2
T1AB2f	Сглаженное значение температуры 1 в AB2
E_T1AB2	Ошибка регулятора температуры 1 в AB2
EKAB2/1_On	Включить нагрев EKAB2/1
A_T1AB2	Автомат/ручной регулятора температуры 1 в AB2
n_T1AB2	Номер параметров для регулятора температуры 1 в AB2
dnch_T1AB2_1	Зона нечувствительности по температуре 1 в AB2 (1 подгруппа параметров)
Tf_T1AB2_1	Постоянная фильтра регулятора температуры 1 AB2 (1 подгруппа параметров)
dnch_T1AB2_2	Зона нечувствительности по температуре 1 в AB2 (2 подгруппа параметров)
Tf_T1AB2_2	Постоянная фильтра регулятора температуры 1 AB2 (2 подгруппа параметров)

Алгоритм регулятора работает следующим образом:

- если регулятор находится в ручном режиме ($A_T1AB2 = 0$), то заданному значению автоматически присваивается текущее значение плотности раствора в АВ2 ($G_BAB2 = LAB2f$), при этом, управление нагревателем ЕКАВ2/1 доступно с мнемосхемы;
- если регулятор находится в автоматическом режиме ($A_T1AB2 = 1$), то управление клапаном осуществляется с помощью реле в зависимости от текущего значения ошибки E_T1AB2 ;
- в зависимости от значения переменной n_T1AB2 в регулятор и сглаживающий фильтр поступают параметры настройки либо для 1 подгруппы параметров (в случае $n_T1AB2 = 1$) или для 2 подгруппы параметров (в случае $n_T1AB2 = 2$).

На рисунке 4.20 представлена мнемосхема управления регулятором температуры 1 выпарного аппарата АВ2.



Рисунок 4.20 – Мнемосхема управления регулятором температуры 1 выпарного аппарата АВ2

На рисунке 4.21 приведена укрупненная схема алгоритма программы регулятора температуры 2 выпарного аппарата АВ2, а в таблице 4.5 – описание переменных.

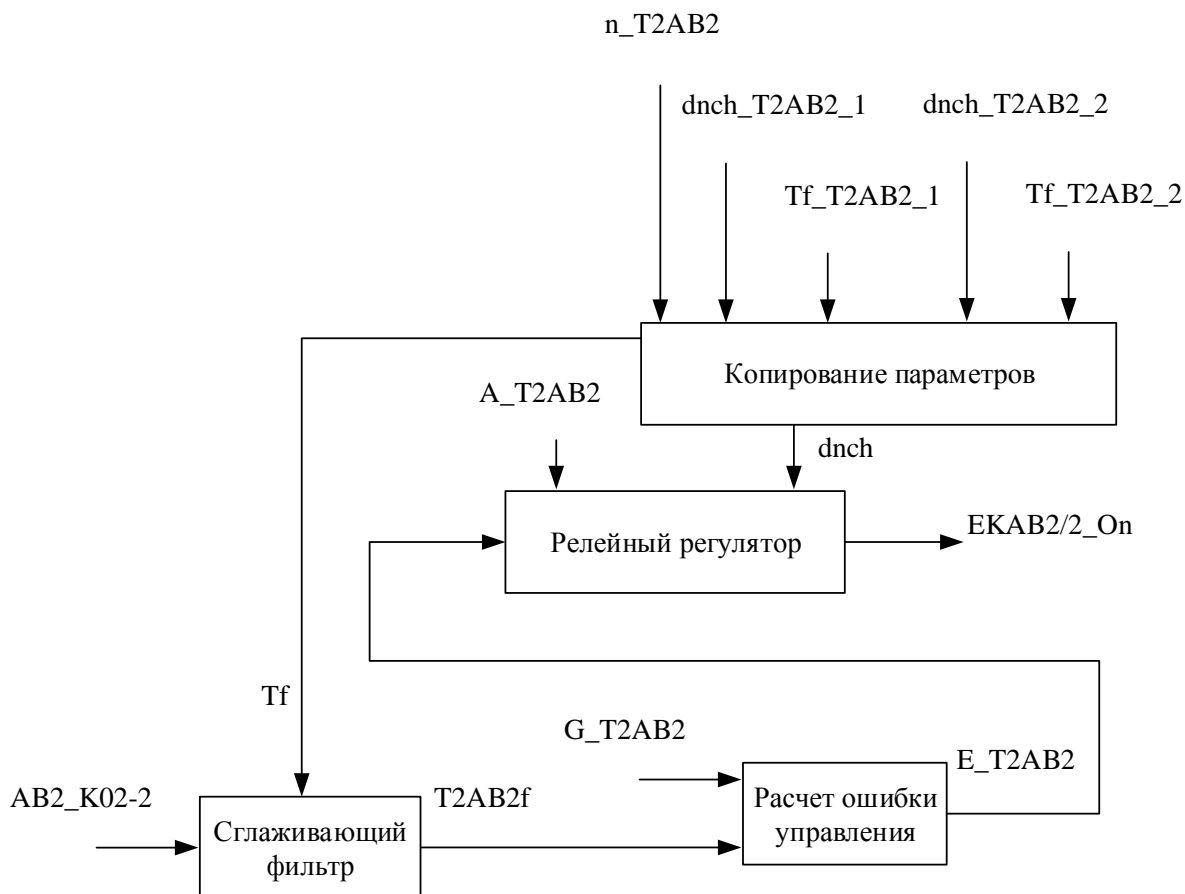


Рисунок 4.21 – Укрупненная схема алгоритма программы регулятора температуры 2 выпарного аппарата АВ2

Таблица 4.5 – Описание переменных регулятора температуры 1 выпарного аппарата АВ2

Название переменной	Описание переменной
AB2_K02-2	Температура в выпарном аппарате АВ2 (МВ-49-1,2)
G_T2AB2	Заданное значение температуры 2 в АВ2
T2AB2f	Сглаженное значение температуры 2 в АВ2
E_T2AB2	Ошибка регулятора температуры 2 в АВ2
EКАВ2/2_On	Включить нагрев ЕКАВ2/2
A_T2AB2	Автомат/ручной регулятора температуры 2 в АВ2
n_T2AB2	Номер параметров для регулятора температуры 2 в АВ2
dnch_T2AB2_1	Зона нечувствительности по температуре 2 в АВ2 (1 подгруппа параметров)

Название переменной	Описание переменной
Tf_T2AB2_1	Постоянная фильтра регулятора температуры 2 АВ2 (1 подгруппа параметров)
dnch_T2AB2_2	Зона нечувствительности по температуре 2 в АВ2 (2 подгруппа параметров)
Tf_T2AB2_2	Постоянная фильтра регулятора температуры 2 АВ2 (2 подгруппа параметров)

Принцип работы регулятора температуры 2 аналогичен регулятору температуры 1. Мнемосхема регулятора приведена на рисунке 4.22.



Рисунок 4.22 – Мнемосхема управления регулятором температуры 2 выпарного аппарата АВ2

Алгоритм программы управления АВ1 аналогичен выше приведенному. Отличается отсутствием контура стабилизации плотности в камере разделения. Вместо данного контура управления применен контур стабилизации кратности выпаривания.

Укрупненная схема регулятора кратности выпарки представлена на рисунке 4.23, а описание переменных – в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Описание переменных регулятора кратности выпарки АВ1

Название переменной	Описание переменной
GFin_AB1	Заданное значение расхода продукта на выпарку (соответствующая уставка для перистальтического насоса – выход регулятора уровня раствора в камере разделения АВ1)
GFout_AB1	Заданное значение расхода кубового продукта (константа или отдельный расчет)
SAB1	Рассчитанное значение кратности выпаривания в АВ1
G_SAB1	Заданное значение кратности выпарки в АВ1
Dout_pwm_AB1	Длительность импульсов ШИМ открытия клапана для слива выходного продукта из АВ1
n_SAB1	Номер группы параметров для регулятора кратности выпаривания АВ1
kp_SAB1_1	Коэффициент передачи регулятора кратности выпаривания АВ1 (1 подгруппа параметров)
Ti_SAB1_1	Время интегрирования регулятора кратности выпаривания АВ1 (1 подгруппа параметров)
Trwm_SAB1_1	Период ШИМ регулятора кратности выпаривания АВ1 (1 подгруппа параметров)
kp_SAB1_2	Коэффициент передачи регулятора кратности выпаривания АВ1 (2 подгруппа параметров)
Ti_SAB1_2	Время интегрирования регулятора кратности выпаривания АВ1 (2 подгруппа параметров)
Trwm_SAB1_2	Период ШИМ регулятора кратности выпаривания АВ1 (2 подгруппа параметров)
A_SAB1	Автомат / ручной регулятора кратности выпаривания АВ1
Dout_AB1_On	Сигнал на открытие клапана для слива куба в АВ1

Контур управления кратности выпаривания работает следующим образом:

- интеграторы 1 и 2 формируют линейно-нарастающие сигналы со скоростями, зависящими от заданного расхода продукта на выпарку GFin_AB1 и расхода куба при открытом выпускном клапане GFout_AB1 соответственно;

- при закрытии выпускного клапана Dout_AB1_On интеграторы сбрасываются в «0» состояние;

- блок деления осуществляет расчет текущего значения кратности выпарки SAB1, при ненулевом значении на выходе интеграла 2;

- в случае, если на выходе интеграла 2 значение 0, тогда блок деления выдает предыдущее значение кратности выпарки.

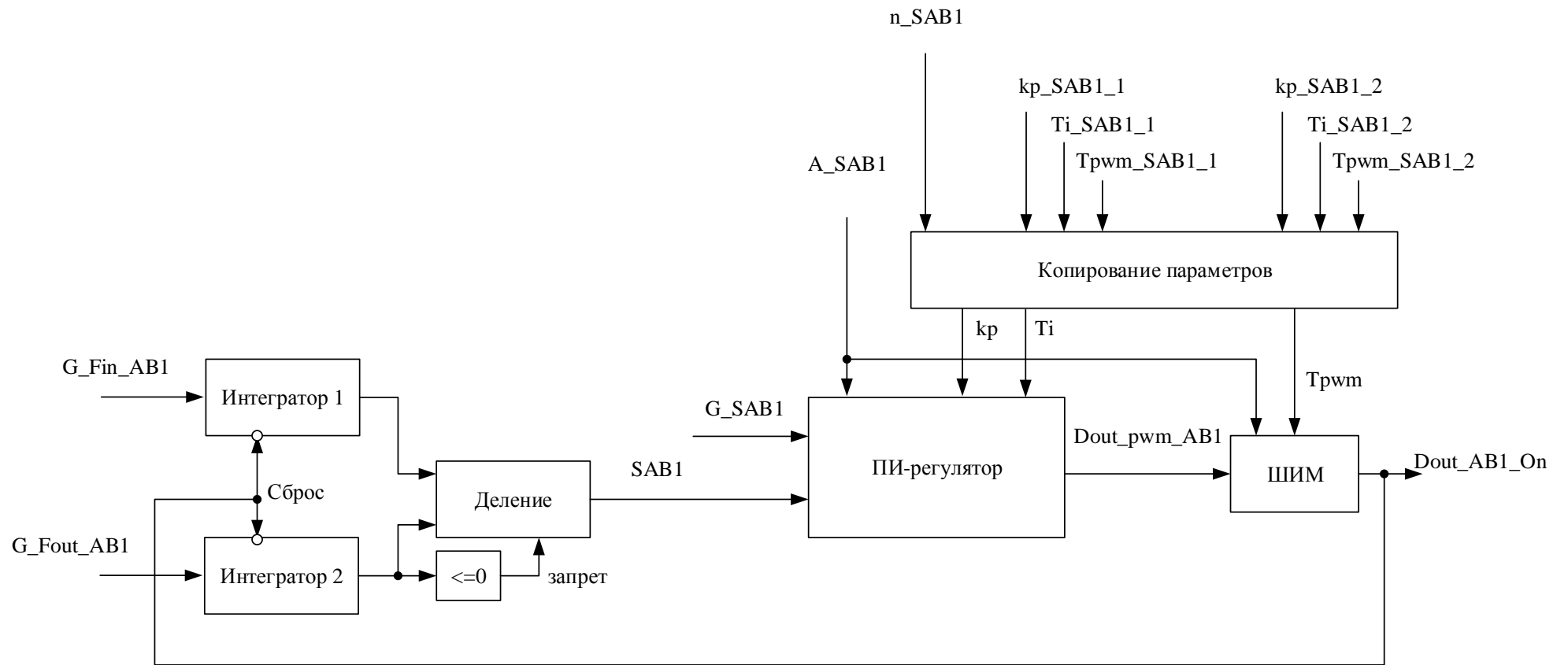


Рисунок 4.23 – Укрупненная схема алгоритма программы регулятора кратности выпаривания AB1

На рисунке 4.24 приведена укрупненная схема АСУ ТП аффинажного стенда с указанием функций программного обеспечения на соответствующих уровнях АСУ ТП.

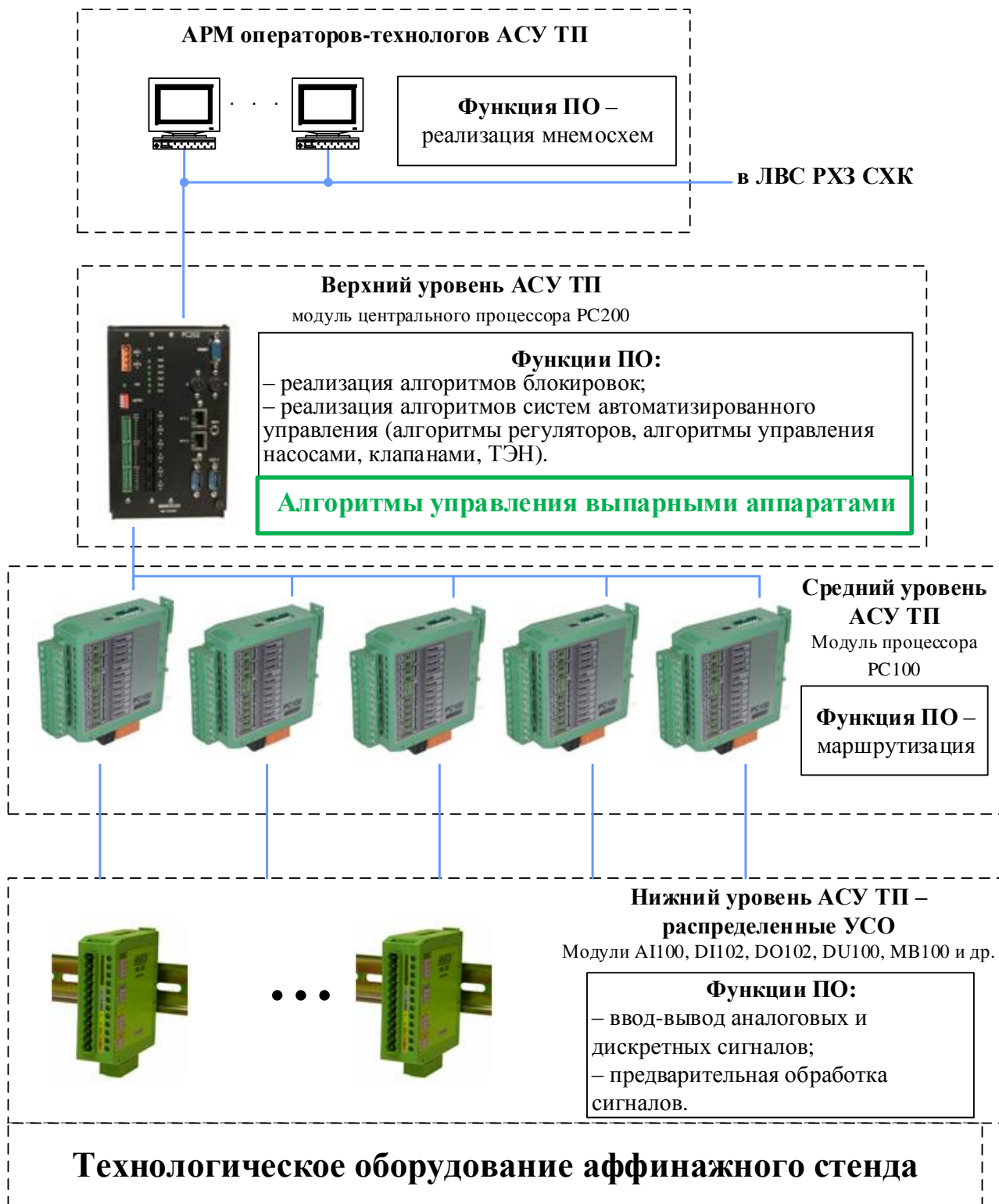


Рисунок 4.24 – Укрупненная схема АСУ ТП аффинажного стенда

Как правило, система автоматизации химических производств обладает трехуровневой структурой. В состав нижнего уровня системы входят такие устройства, как датчики, термопары, расходомеры, уровнемеры и нормирующие преобразователи. Значения физических величин параметров технологического процесса через соответствующие преобразователи и устройства связи с объектами отображаются измерительными приборами, преобразуются в электрические сигналы и поступают на программируемые контроллеры – устройства среднего уровня системы [81, 82].

АСУ ТП аффинажного стенда включает следующие уровни (см. рисунок 4.24):

- автоматизированные рабочие места (АРМ) операторов-технологов;
- верхний уровень АСУ ТП, построенный на модуле центрального процессора PC200 программно-технического комплекса (ПТК) «УМИКОН» [83];
- средний уровень АСУ ТП на основе модулей процессора PC100 [83];
- нижний уровень АСУ ТП включающий распределенные устройства связи с объектом (УСО) на основе различных модулей ввода-вывода ПТК «УМИКОН» [83].

Программное обеспечение АСУ ТП аффинажного стенда реализовано с применением комплекса программного обеспечения «МИКСИС» ПТК «УМИКОН» [5, 83].

На нижнем уровне АСУ ТП программное обеспечение реализует функции:

- управления вводом-выводом аналоговых и дискретных переменных;
- предварительной обработки сигналов, в том числе масштабирование, преобразование шкал КИПиА.

На среднем уровне АСУ ТП программное обеспечение реализует функцию маршрутизации массивов данных контроллеров верхнего уровня и нижнего уровня АСУТП (УСО) на базе ПТК «УМИКОН».

На верхнем уровне АСУ ТП программное обеспечение реализует функции:

- реализации алгоритмов блокировок;
- реализации алгоритмов систем автоматизированного управления и автоматизации исследований аффинажного стенда, в том числе алгоритмы регуляторов САР, алгоритмы управления насосами, клапанами, ТЭН.

Так как технологическое оборудование аффинажного стенда потребовало большого количества межаппаратных блокировок исполнителями настоящей НИР, было принято решение реализовать алгоритмы блокировок и систем управления на верхнем уровне АСУ ТП на базе модуля центрального процессора PC200 (см. рисунок 4.24).

Для программирования контроллеров нижнего, среднего и верхнего уровня использовался комплекс программного обеспечения «МИКСИС», ядро реального времени «MWBridge» [83]. На верхнем уровне АСУ ТП программное обеспечение функционирует под управлением операционной системы «Linux» и ядра реального времени «MLB» (версия MWBridge под Linux).

Реализация человеко-машинного интерфейса реализовано посредством мнемосхем АРМ оператора-технолога, функционирующих на персональных компьютерах с операционной системой «Microsoft Windows», ядром реального времени «MWBridge» и системой отображения – графическим ядром «Display» ПТК «УМИКОН» [83]. Ядро «Display» также включает графический редактор мнемосхем и настроек, посредством, которого, были разработаны мнемосхемы (экраны человеко-машинного интерфейса).

Внедрение алгоритмов контроля и управления выпарными аппаратами в составе АСУ ТП аффинажного стенда РХЗ СХК выполнялось с личным участием автора настоящей работы (см. приложение Г).

4.3 Реализация математической модели выпарного аппарата и системы управления в программном комплексе КОД ТП

Результаты исследований в части компьютерной модели системы контроля и управления выпарным аппаратом использованы при разработке кода оптимизации и диагностики процессов замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) в рамках проекта «ПРОРЫВ» (КОД ТП) Государственной корпорации «Росатом» (см. приложение Д). Программное обеспечение разработано на кафедре ЭАФУ (см. рисунок 4.25) и дает возможность на порядок улучшить качество выполняемых проектов, что позволит до сооружения объекта проверить его работоспособность, как в нормальных режимах, так и во всех режимах отклонения, включая аварийные. Полученный задел позволяет выполнять работы по созданию алгоритмов безопасного и оптимального управления процессами замкнутого ядерно-топливного цикла (ЗЯТЦ) по концепции «Умный завод».

Программный комплекс КОД ТП содержит (см. рисунок 4.25) [84–87]:

- среду динамического моделирования,
- библиотеку базовых элементов: оборудование химических производств и КИПиА,
- специализированные библиотеки, такие как технологическое оборудование ЗЯТЦ,
- численные решатели систем дифференциально-алгебраических уравнений,
- средства визуализации результатов моделирования.

Программное обеспечение компьютерной модели системы контроля и управления выпарным аппаратом реализовано в виде специализированной библиотеки технологического оборудования КОД ТП (см. приложение Е) и позволяет решать задачи синтеза систем управления, исследования систем

управления в динамическом режиме, диагностику работы технологического оборудования процессов выпаривания (см. рисунок 4.26).

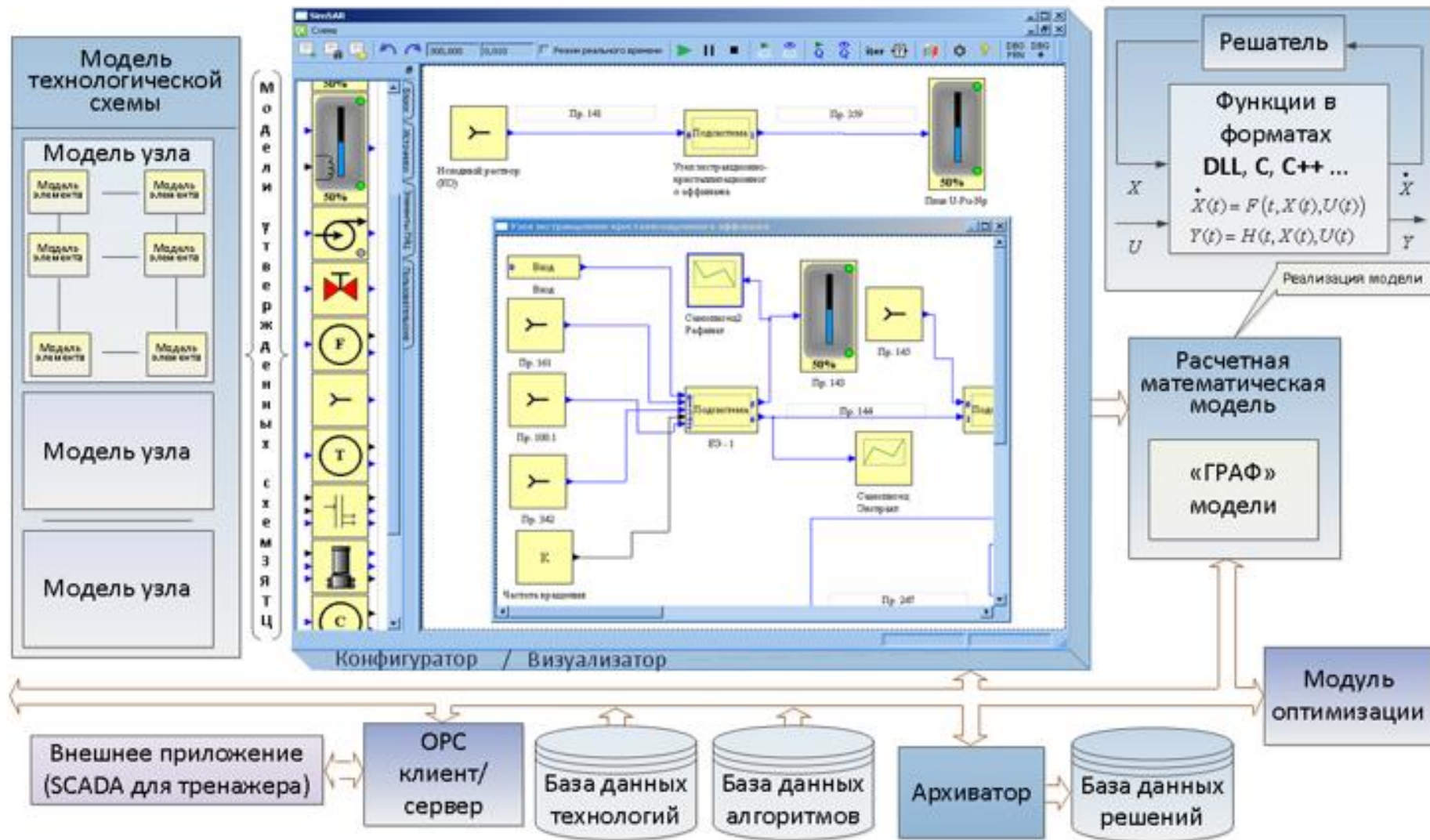


Рисунок 4.25 – Код оптимизации и диагностики технологических процессов (КОД ТП)

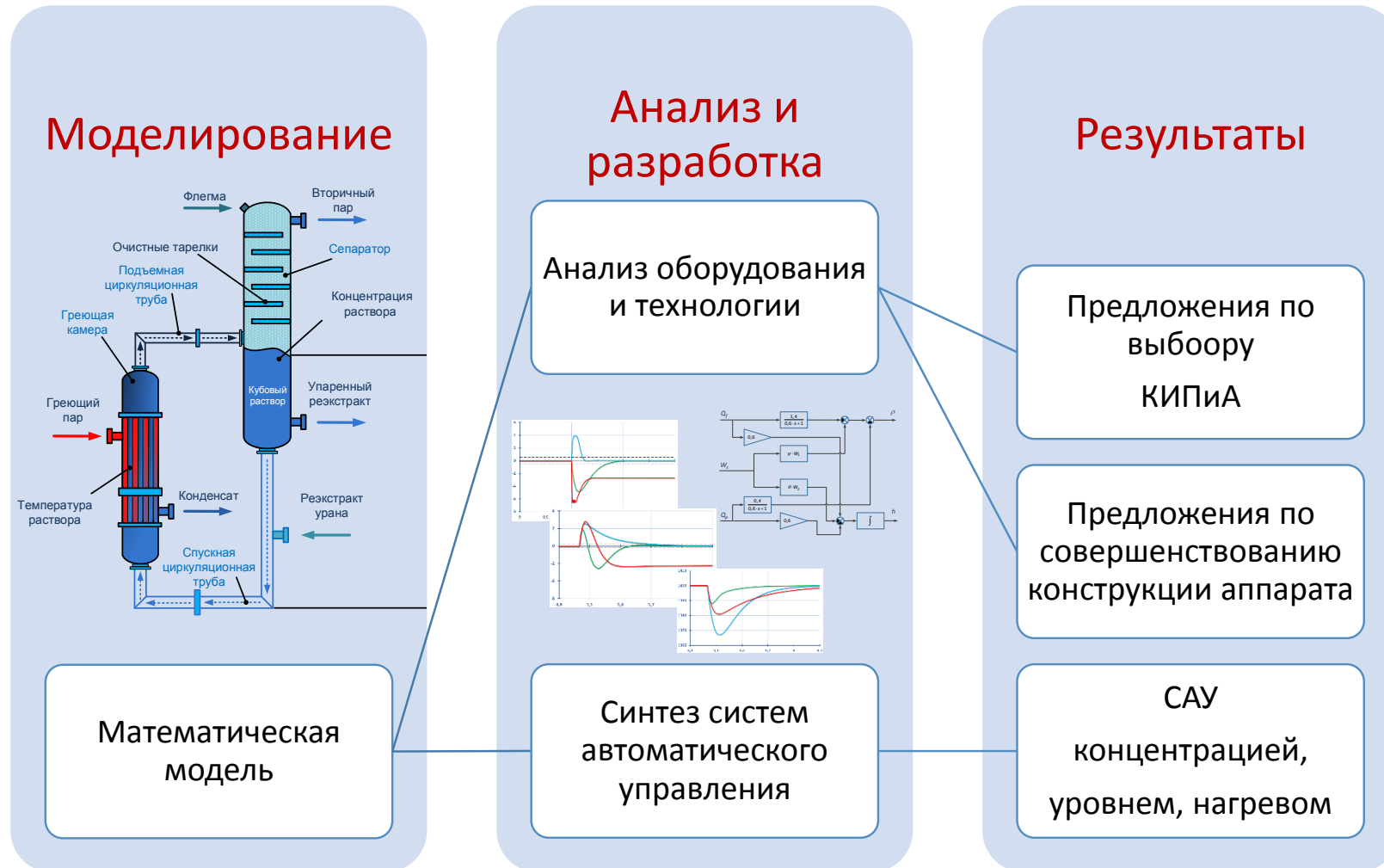


Рисунок 4.26 – Моделирование системы контроля и управления выпарными аппаратами в среде КОД ТП

Компьютерная модель системы контроля и управления выпарным аппаратом использована в составе следующих программных модулей (см. приложение Д):

- 1) Программный модуль имитации концентрирования жидких радиоактивных отходов (ЖРО).
- 2) Программный модуль имитации экстракционно-кристаллизационного аффинажа.

На рисунке 4.27 представлен пример расчетной схемы процесса концентрирования ЖРО методом выпаривания.

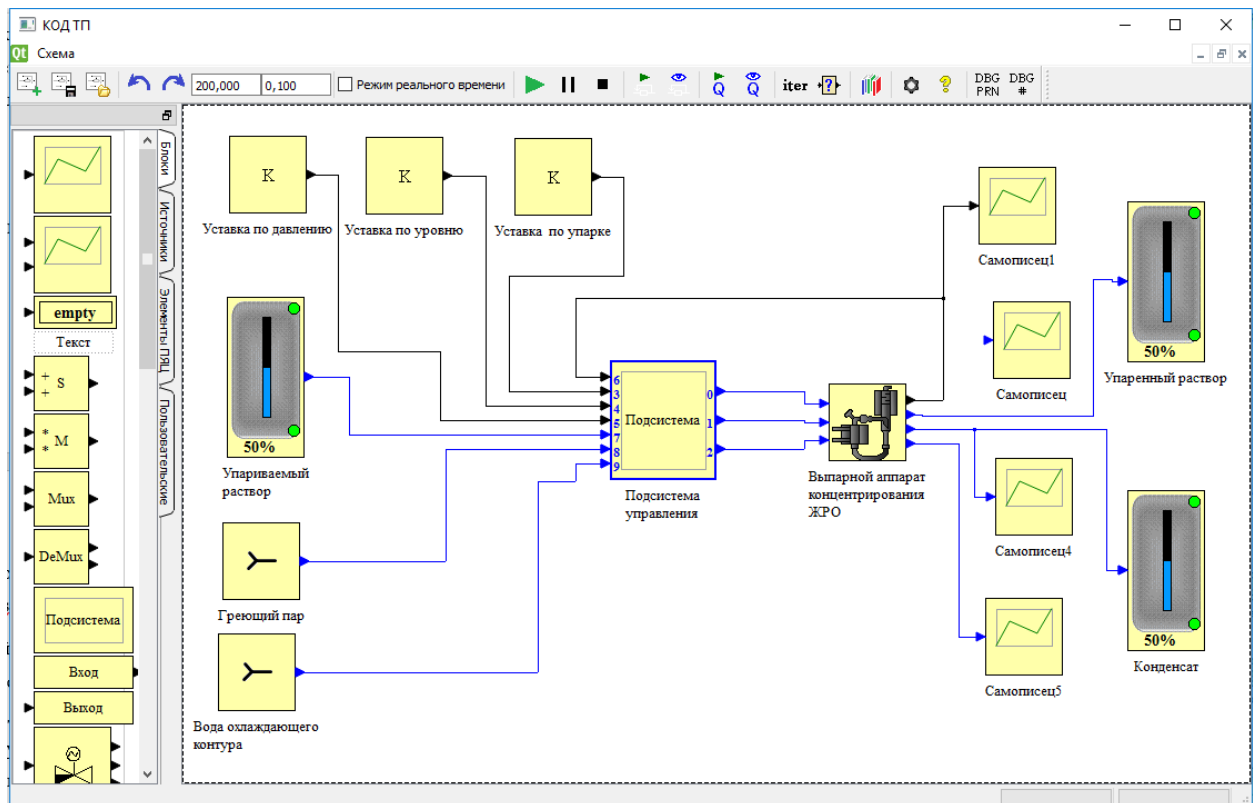


Рисунок 4.27 – Расчетная схема процесса концентрирования ЖРО методом упаривания

Блок «Подсистема управления» реализует модель системы управления выпарным аппаратом и содержит три контура стабилизации: контур стабилизации концентрации кубового раствора посредством регулирования

греющей камеры, контур стабилизации давления пара в аппарате (тем самым стабилизируется температура кипения раствора) посредством регулирования расхода охлаждающей воды через конденсатор сокового пара, а также контур стабилизации уровня раствора в аппарате посредством расхода питающего (исходного) раствора. Расчетная схема блока «Подсистема управления» представлена на рисунке 4.28:

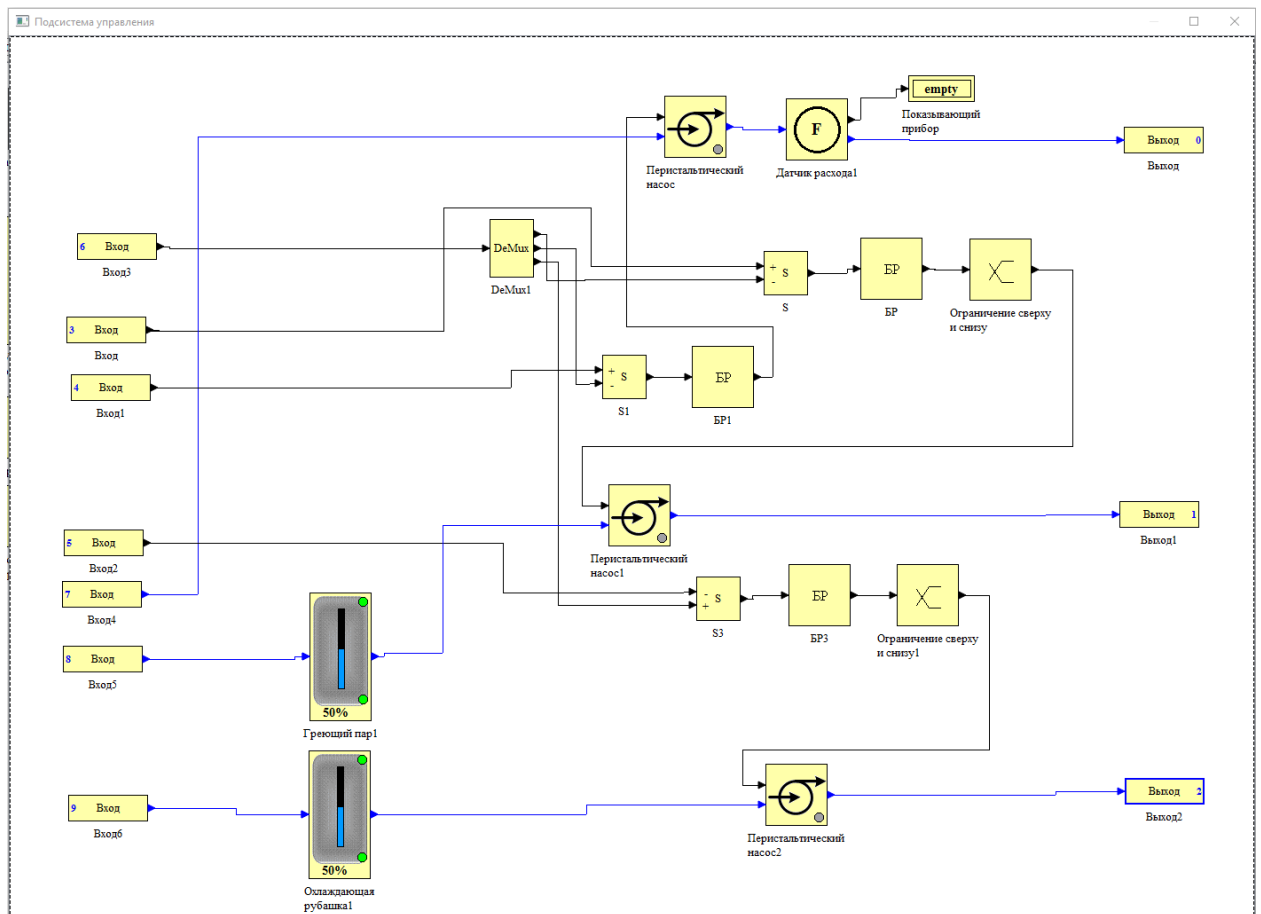


Рисунок 4.28 – Расчетная схема блока «Подсистема управления»

Модель выпарного аппарата для концентрирования ЖРО в программном модуле КОД ТП реализована в блоке «Выпарной аппарат концентрирования ЖРО». Внешний вид этого блока представлен на рисунке 4.29.

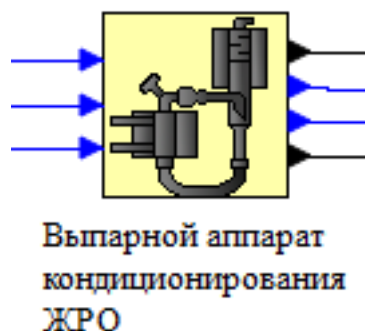


Рисунок 4.29 – Внешний вид блока «Выварной аппарат концентрирования ЖРО»

Указанный блок имеет по три «материальных» входа и выхода (обозначены синим цветом), а также два информационных выхода (черного цвета), необходимых для связи с блоком «Подсистема управления».

Входы блока (нумерация сверху вниз):

- подача питающего раствора, характеризующаяся следующими переменными: объемный расход раствора, его температура и концентрации упариваемых компонентов;
- греющий пар (расход) или подводимая мощность от ТЭНа греющей камеры;
- охлаждающая вода (расход и температура).

Выходы блока (нумерация сверху вниз):

- информационный выход: передача данных для блока «Подсистема управления» (относительный уровень раствора в сепараторе, давление пара в аппарате, концентрация раствора в аппарате);
- материальный выход: выдача кубового раствора (температура и концентрация);
- материальный выход: выдача конденсата (его расход и температура);
- информационный выход: отображение данных о давлении греющего пара и температуры воды на выходе контура охлаждения конденсатора.

Аналогичные схемы были собраны для программного модуля имитации экстракционно-кристаллизационного аффинажа.

Созданные библиотеки в составе КОД ТП позволили произвести компьютерное испытание системы автоматизированного контроля и управления выпарными аппаратами аффинажного стенда СХК на этапе ее внедрения.

4.4 Выводы по разделу

1 В настоящее время промышленностью не выпускаются контрольно-измерительные приборы для измерения уровня, плотности, определения границы раздела фаз, расходов малых количеств вещества для аппаратов в ядерно-безопасном исполнении, однако сведения об указанных технологических переменных необходимы как для соблюдения технологии, так и для обеспечения возможности автоматизации радиохимических производств. Поэтому было принято решение о разработке подобного прибора.

2 За основу была взята схема определения уровня и плотности раствора в емкости путем измерения с помощью капиллярных линий двух перепадов давления в трех точках разделительной камеры. Указанная схема, дополненная системой автоматического дозирования разделительной жидкости, подключенная к управляющему контроллеру, успешно испытана и введена в эксплуатацию на ЭКАС СХК.

3 Для улучшения стоимостных показателей, а также надежности и быстродействия АСУ ТП ЭКАС в целом предложена конструкция сдвоенного дифференциального манометра на основе сенсоров и вторичного преобразователя отечественного производства. Для проверки работоспособности программных и аппаратных средств предложенного способа измерения уровня и плотности

создан лабораторный стенд, позволивший выполнить испытание системы контроля уровня и плотности в аппаратах ядерно-безопасного исполнения.

4 Экспериментальные исследования различных вариантов САУ выпарным аппаратом, проведенные в разделе 3, сделали возможным разработку алгоритмов автоматического управления уровнем, плотностью, температурой и кратностью выпарки растворов в выпарных аппаратах ЭКАС СХК. Указанные алгоритмы реализованы, внедрены в общую АСУ ТП ЭКАС СХК и успешно функционируют.

5 Результаты работ по моделированию, экспериментальному исследованию и внедрению конструктивных, схемотехнических и программных решений, предложенных в разделах 2–4 настоящей работы, позволили создать программные модули имитации концентрирования жидких радиоактивных отходов и экстракционно-кристаллизационного аффинажа в программном комплексе КОД ТП.

Заключение

Целью настоящей работы являлось создание системы автоматизированного контроля и управления выпарными аппаратами ядерно-безопасного исполнения с обеспечением автоматической стабилизации технологических переменных процесса выпаривания. Особое внимание было уделено выпарным аппаратам экстракционно-кристаллизационного аффинажного стенда АО «Сибирский химический комбинат». Указанный стенд создан на Радиохимическом заводе комбината и полностью копирует экстракционно-кристаллизационное отделение модуля переработки отработанного ядерного топлива создаваемого на промышленной площадке комбината опытно-демонстрационного комплекса в составе реакторной установки с пристанционным ядерным топливным циклом и комплексом по производству смешанного уран-плутониевого (нитридного) топлива для реакторов на быстрых нейтронах. Сотрудники кафедры ЭАФУ ТПУ, среди которых автор настоящей работы, разработали и внедрили математическое и программное обеспечение автоматизированной системы управления технологическими процессами стенда, включающих системы управления выпарными аппаратами.

Совокупность технических решений указанных аппаратов, их массогабаритные показатели, производительность, положение в технологической цепочке и место установки выделяют их из ряда выпарных аппаратов химической технологии и не позволяют применить существующие серийно выпускаемые промышленностью контрольно-измерительные приборы. Поэтому и возникла необходимость в разработке новых технических решений по контролю и управлению выпарными аппаратами.

Для создания АСУ процессом выпаривания были разработаны математическая и физическая модели выпарного аппарата. Первая из них реализована в виде компьютерной модели в пакете MATLAB/Simulink и призвана

отражать динамику изменения уровня, плотности и температуры раствора в аппарате, а также учитывать их взаимное влияние. Экспериментальные исследования модели выявили ее адекватность с относительными среднеквадратичными погрешностями менее 9 %. Вторая модель предназначена для обеспечения возможности экспериментальной проверки работоспособности разрабатываемой автоматизированной системы управления выпарным аппаратом.

Серия экспериментов на созданной компьютерной модели по определению статических характеристик объекта по основным технологическим каналам выявила, что рассматриваемый выпарной аппарат характеризуется нелинейностью и многосвязностью. Теоретический анализ же существующих САУ выпарными аппаратами показал, что классические системы управления выпарными аппаратами на основе ПИД-регуляторов обеспечивают требуемое качество регулирования и лишь немногим уступают альтернативным методам управления.

Структурный и параметрический синтез позволил произвести экспериментальные исследования различных вариантов САУ выпарным аппаратом. Были определены основные показатели качества управления, представленные в таблице 3.4. Установлено, что если задачей регулирования аппарата является поддержание постоянной плотности упаренного раствора, то лучшее качество регулирования обеспечивается при выборе в качестве регулирующего воздействия по плотности изменение расхода упариваемого раствора. Если же требуется более качественное регулирование уровня в аппарате, то регулирование концентрации следует осуществлять изменением расхода на выходе, а уровня – на входе.

Исследование переходных процессов при возмущающем воздействии показало, что все рассмотренные системы управления выпарным аппаратом обрабатывают 10 % изменения температуры входного раствора, а также 5 % изменения плотности исходного раствора с приемлемыми показателями качества

(таблица 3.4). Экспериментальные исследования предложенных САУ на физической модели выпарного аппарата показали их работоспособность.

В настоящее время промышленностью не выпускаются контрольно-измерительные приборы для измерения уровня, плотности, определения границы раздела фаз, расходов малых количеств вещества для аппаратов в ядерно-безопасном исполнении. Для решения обозначенной проблемы предложен прибор, действие которого основано на схеме определения уровня и плотности раствора путем измерения двух перепадов давления. Указанная схема, дополненная системой автоматического дозирования разделительной жидкости, подключенная к управляющему контроллеру, успешно испытана и введена в эксплуатацию на ЭКАС СХК.

Для улучшения стоимостных показателей, а также надежности и быстродействия АСУ ТП ЭКАС в целом предложена конструкция сдвоенного дифференциального манометра на основе сенсоров и вторичного преобразователя отечественного производства. Для проверки работоспособности программных и аппаратных средств предложенного способа измерения уровня и плотности создан лабораторный стенд, позволивший выполнить испытание системы контроля уровня и плотности в аппаратах ядерно-безопасного исполнения.

Экспериментальные исследования различных вариантов САУ выпарным аппаратом сделали возможным разработку алгоритмов автоматического управления уровнем, плотностью, температурой и кратностью выпарки растворов в выпарных аппаратах ЭКАС СХК. Указанные алгоритмы реализованы, внедрены в общую АСУ ТП ЭКАС СХК и успешно функционируют.

Результаты работ по моделированию, экспериментальному исследованию и внедрению конструктивных, схемотехнических и программных решений, позволили создать программные модули имитации концентрирования жидких радиоактивных отходов и экстракционно-кристаллизационного аффинажа в программном комплексе КОД ТП.

Разработанное техническое и программное обеспечение испытано в производственных условиях и внедрено в промышленную эксплуатацию. Оригинальность разработок подтверждена свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ, а их внедрение соответствующими актами.

Список сокращений и условных обозначений

АРМ	Автоматизированное рабочее место
АСУ	Автоматизированная система управления
АСУ ТП	Автоматизированная система управления технологическим процессом
ВА	Выпарной аппарат
ВНИИНМ	АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (г. Москва)
ЖРО	Жидкие радиоактивные отходы
ЗЯТЦ	Замкнутый ядерно-топливный цикл
КИПиА	Контрольно-измерительные приборы и автоматика
ОУ	Объект управления
ОЯТ	Отработанное ядерное топливо
РАО	Радиоактивные отходы
РИ	АО «Радиевый институт имени В.Г. Хлопина» (г. Санкт-Петербург)
РУ	Реакторная установка
РХЗ	Радиохимический завод
САУ	Система автоматического управления
СХК	АО «Сибирский химический комбинат» (г. Северск, Томская область)
ТПУ	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»
ЭАФУ	Кафедра электроники и автоматике физических установок Томского политехнического университета

ЭКАС	Экстракционно-кристаллизационный стенд АО «Сибирский химический комбинат»
------	---

Список литературы

1 Паспорт Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 годов и на перспективу до 2020 года» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rosatom.ru/upload/iblock/99f/99fa43f4dfb7fbf8d8dc206435b1ff21.pdf>.

2 Принята новая дорожная карта строительства опытно-демонстрационного энергокомплекса на СХК [Электронный ресурс]. – http://www.rosatom.ru/journalist/news/prinyata-novaya-dorozhnaya-karta-stroitelstva-opytno-demonstratsionnogo-energokompleksa-na-skhk/?sphrase_id=92660.

3 АО «ВНИИНМ» начал проводить НИОКР на аффинажном стенде АО «СХК» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://bochvar.ru/press_center/news/AOVNIINMnachalprovoditNIOKRnaaffinazhnoms tendeAOSKHK/.

4 Разработка системы автоматизированного управления лабораторным аффинажным стендом, предназначенным для отработки экстракционно-кристаллизационной технологии переработки ОЯТ РУ БРЕСТ-ОД-300 [Текст] : отчет о НИР (промежуточ.) / Томский политехнический университет ; рук. Горюнов А. Г. ; исполн.: Ливенцов С. Н., Козин К. А., [и др.]. – Томск, 2014. – 114 с. – Инв. № 18/18.14 от 10.10.2014.

5 Разработка системы автоматизированного управления лабораторным аффинажным стендом, предназначенным для отработки экстракционно-кристаллизационной технологии переработки ОЯТ РУ БРЕСТ-ОД-300 [Текст] : отчет о НИР (заключ.) / Томский политехнический университет ; рук. Горюнов А. Г. ; исполн.: Ефремов Е. В., Зеленецкая Е. П. [и др.]. – Томск, 2015. – 140 с. – Инв. № 18/8437 от 14.10.2015.

6 Таубман, Е. И. Выпаривание [Текст]. – М. : Химия, 1982. – 328 с. : ил.

7 Таубман, Е. И. Расчет и моделирование выпарных установок [Текст]. – М. : Химия, 1970. – 216 с.

8 Гельперин, Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] : в 2-х кн. / Н. И. Гельперин. – М. : Химия, 1981. – 812 с. : ил.

9 Дытнерский, Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии [Текст] : учебник для вузов : в 2-х кн. Ч. 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты / Ю. И. Дытнерский. – 2-е изд. – М. : Химия, 1995. – 400 с. : ил. – ISBN 5-7245-1006-5.

10 Романков, П. Г., Фролов, В. Ф. Теплообменные процессы химической технологии [Текст]. – Л. : Химия, 1982. – 288 с. : ил.

11 Minton, Paul E. Handbook of Evaporation Technology [Text]. – Westwood, New Jersey, U. S. A. : NOYES PUBLICATIONS, 1986. – 407 p. – ISBN 0-8155-1097-7.

12 Анализ отечественных и зарубежных источников по проблемам создания расчетных кодов. Разработка основополагающих принципов функционирования кода оптимизации и диагностики технологических процессов [Текст] : отчет о НИР (промежуточ.) / Томский политехнический университет ; рук. Ливенцов С. Н. ; исполн.: Горюнов А. Г., Чурсин Ю. А., Козин К. А., Ливенцова Н. В., Егорова О. В., Ларионова И. М., Ефремов Е. В., Денисевич А. А. – Томск, 2014. – 51 с. – Инв. № 446/18.14.

13 Игнатович, Э. Химическая техника. Процессы и аппараты [Текст] / Экхард Игнатович ; пер. с нем. – М. : Техносфера, 2007. – 656 с. : ил. – ISBN 978-5-94836-153-6.

14 Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] : пособие по проектированию / Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский и др. ; под. ред. Ю. И. Дытнерского. – 2-е изд., перераб. и дополн. – М. : Химия, 1991. – 496 с. – ISBN 5-7245-0133-3.

15 Товажнянский, Л. Л., Готлинская, А. П., Лещенко, В. А., Нечипоренко, И. А., Чернышов И. В. Процессы и аппараты химической

технологии [Текст] : учебник : в 2-х кн. Ч. 1.; под ред. Л. Л. ТОВАЖНЯНСКОГО. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2004. – 632 с. : ил. – на русск. яз. – ISBN 966-593-351-5.

16 Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] : учебник для вузов. – 10-е изд., стереотипное, доработанное : перепеч. с изд. 1973 г. – М. : ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с. – ISBN 5-98535-004-5.

17 Тимонин, А. С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования [Текст] : справочник : в 3-х т. Т. 2. – 2-е изд., переработанное и дополненное. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. – 851 с. : ил. – ISBN 5-89552-043-X.

18 Теплообменные аппараты и приборы в легкой промышленности [Текст] : учеб. пособие для студ. учеб. заведений / Б. П. Кондауров, Л. Т. Бахшиева, В. С. Салтыкова, В. И. Александров ; под ред. А. А. Захаровой. – М. : Издательский центр «Академия», 2003. – 192 с. – ISBN 5-7695-1012-9.

19 Колач, Т. А., Радун Д. В. Выпарные станции [Текст]. – М. : Машгиз, 1963. – 403 с.

20 Машины и аппараты химических производств [Текст] / Чернобыльский И. И., Бондарь А. Г., Гаевский Б. А., Городинская С. А., Ладиев Р. Я., Тананайко Ю. М., Миргородский В. Т. ; под ред. И. И. Чернобыльского. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1975. – 454 с. : ил.

21 Плановский, А. Н. Процессы и аппараты химической технологии [Текст] : учебник / А. Н. Плановский, В. М. Рамм, С. З. Каган. – 3-е изд., стер. – М. : Химия, 1966. – 847 с. : ил.

22 Kakas, S. Boilers, Evaporators and Condensers [Text]. – JOHN WILEY & SONS, INC, 1991. – 835 p. – ISBN 0-471-62170-6.

23 Советов, Б. Я., Яковлев, С. Я. Моделирование систем [Текст] : учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2001. – 343 с. : ил. – ISBN 5-06-003860-2.

24 Фрэнкс, Р. Математическое моделирование в химической технологии [Текст] / Роджер Фрэнкс ; пер. с англ. – М. : Химия, 1971. – 272 с.

25 Гартман, Т. Н. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов [Текст] : учебное пособие / Т. Н. Гартман, Д. В. Клушин. – М. : Академкнига, 2006. – 416 с. : ил. – ISBN 5-94628-268-9.

26 Кафаров, В. В., Глебов, М. Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств [Текст] : учеб. пособие для вузов. – М. : Высш. шк., 1991. – 400 с. : ил. – ISBN 5-06-002066-5.

27 Eli Nisenfeld, A. Industrial evaporators: principles of operation and control [Text]. – Instrument Society of America, 1985. – 227 p. – ISBN 0876646933, 9780876646939.

28 Llopis, R, Cabello, R., Navarro-Esbri, J., Torella, E. A dynamic mathematical model of a shell-and-tube evaporator. Validation with pure and blend refrigerants [Text] // International Journal of Energy Research. – 2007. – Vol. 31. – P. 232–244. – ISSN 1099-114X.

29 Pedro J. Magon, Louay Chamra, Glenn Steele A simulation model for the performance of a hybrid liquid desiccant system during cooling and dehumidification [Text] // International Journal of Energy Research. – 2006. – Vol. 30. – P. 51–66. – ISSN 1099-114X.

30 Andréa O.S. Costa, Enrique L. Lima Modelling and control of an industrial multiple-effect evaporator system [Text] // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2003. – Vol. 81. – P. 1032–1040. – ISSN 1939-019X.

31 To, L. C., Tade, M. O., Le Page, G. P. Implementation of a differential geometric nonlinear controller on an industrial evaporator system [Text] // Control Engineering Practice. – 1998. – Vol. 6. – № 11. – P. 1309–1319. – ISSN 0967-0661.

32 Atuonwu, J. C., Cao, Y., Rangaiah, G. P., Tade, M. O. Identification and predictive control of a multistage evaporator [Text] // Control Engineering Practice. – 2010. – Vol. 18. – № 12. – P. 1418–1428. – ISSN 0967-0661.

33 Краснодубец, Л. А., Карапетьян, В. А., Черёмухин, Ю. Д. Моделирование технологического процесса выпаривания для тренажеров АЭС [Текст] // Вестник СевНТУ. Автоматизация процессов и управление : сборник научных трудов. – Севастополь : СевНТУ. – 2012. – № 125 – С. 16–20. – ISSN 2307-6488.

34 Montano, A., Silva, G., Hernandez, V. Nonlinear control of a double effect evaporator [Text] // Advanced Control of Chemical Processes. – 1991. – P. 167–172. – ISBN 978-0-08-041267-2.

35 Kam, K. M., Tade, M. O. Simulated nonlinear control studies of five-effect evaporator models [Text] // Computer and Chemical Engineering. – 2000. – Vol. 23. – № 11–12. – P. 1795–1810. – ISSN 0098-1354.

36 Quaak, P., van Wijck, M. P. C. M., van Haren, J. J. Comparison of process identification and physical modelling for falling-film evaporators [Text] // Food Control. – 1994. – Vol. 5. – № 2. – P. 73–82. – ISSN 0956-7135.

37 Lahtinen, S. T. Identification of fuzzy controller for use with a falling-film evaporator [Text] // Food Control. – 2001. – Vol. 12. – № 3. – P. 179–180. – ISSN 0956-7135.

38 Emad Ali, Ashraf Al-Ghazzawi On-line tuning of model predictive controllers using fuzzy logic [Text] // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2003. – Vol. 81. – P. 1041–1051. – ISSN 1939-019X.

39 Emad Ali Automatic tuning of model predictive controllers based on fuzzy logic [Text] // Proc of IASTED Conference on Control and Applications, Banff, Canada, June 27–29, 2001 – P. 136–142.

40 Lozano, J. E., Elustondo, M. P., Romagnoli, J. A. Control studies in an industrial apple juice evaporator [Text] // Journal of Food Science. – 1984. – Vol. 49. – P. 1422–1427. – ISSN 1750-3841.

41 Rangaiah, G. P., Saha, P., Tade, M. O. Nonlinear model predictive control of an industrial four-stage evaporator system via simulation [Text] // Chemical Engineering Journal. – 2002. – Vol. 87. – № 3. – P. 285–299. – ISSN 1385-8947.

42 Allen, R. M., Young, B. R. Gain-scheduled lumped parameter multi-input multi-output models of a pilot plant climbing film evaporator [Text] // Control Engineering Practice. – 1994. – Vol. 2. – № 2. – P. 219–225. – ISSN: 0967-0661.

43 van Wijck, M. P. C. M., Quaak, P., van Haren, J. J. Multivariable supervisory control of a 4-effect falling film evaporator [Text] // Food Control. – 1994. – Vol. 5. – № 2. – P. 83–89. – ISSN 0956-7135.

44 Wang, F. Y., Cameron, I. T. Control studies on a model evaporation process - constrained state driving with conventional and higher relative degree system [Text] // Journal of Process Control. – 1994. – Vol. 4. – № 2. – P. 59–75. – ISSN 0959-1524.

45 Young, B. R., Allen, R. M. Multi-input, multi-output identification of a pilot plant climbing film evaporator [Text] // Control Engineering Practice. – 1995. – Vol. 3. – № 8. – P. 1067–1073. – ISSN 0967-0661

46 Kiew M. Kam, Prabirkumar Saha, Moses O. Tadel, Rangaiah, G. P. Models of an industrial evaporator system for education and research in process control [Text] // Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing. – 2002. – Vol. 10. – № 1–2. – P. 105–127. – ISSN 1932-2143.

47 To, L. C., Tade, M. O., Kraetzl, M., Le Page, G. P. Nonlinear control of a simulated industrial evaporation process [Text] // Journal of Process Control. – 1995. – Vol. 5. – № 3. – P. 173–182. – ISSN 0959-1524.

48 Yonggang Wang, Tianyou Chai, Jun Fu, Jing Sun Adaptive decoupling control of the forced-circulation evaporation system using neural networks and multiple models [Text] // 2011 American Control Conference on O'Farrell Street, San Francisco, CA, USA June 29 – July 01, 2011. – P. 5061–5066. – ISSN 2378-5861.

49 Hawlader, M. N. A., Chou, S. K., Chua, K. J., Ho, J. C., Mujumdar, A. S. [Text] // International Journal of Energy Research. – 2001. – Vol. 25. – P. 859–880. – ISSN 1099-114X.

50 Ефремов, Е.В. Математическая модель выпарного аппарата для создания системы автоматического управления выпарным оборудованием в технологиях переработки отработанного ядерного топлива [Текст] / Е. В. Ефремов,

К. А. Козин, М. И. Грачев // Молодой ученый. – 2015. – № 10. – С. 223–228. – ISSN 2072-0297.

51 Reinhard, B. Evaporation technology: principles, applications, economics [Text]. – VCH Verlagsgesellschaft, 1989. – 317 p. – ISBN 0895738139, 9780895738134.

52 Гурецкий, Х. Анализ и синтез систем управления с запаздываниями [Текст] / Хенрик Гурецкий ; перевод с польского А. Н. Дмитриева. – М. : Машиностроение, 1974.– 328 с.

53 Вопросы теплоотдачи и гидравлики двухфазных сред : сборник статей [Текст] / под ред. С. С. Кутателадзе. – М., Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 392 с. : ил.

54 Луценко, В. А., Финякин, Л. Н. Математическое моделирование химико-технологических процессов на аналоговых вычислительных машинах. Лабораторно-практические работы [Текст]. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Химия, 1984. – 272 с.

55 Луценко, В. А., Финякин, Л. Н. Аналоговые вычислительные машины в химии химической технологии [Текст]. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Химия, 1979. – 248 с.

56 Самарский, А. А., Михайлов, А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры [Текст]. – 2-е изд., испр. – М. : Физматлит, 2001. – 320 с. – ISBN 5-9221-0120-X.

57 Vilnina, A. V., Efremov, E. V., Pletnev, A. O., Chursin, Y. A., Barkov, D. E., Kabrysheva, O. P. Automatic control system of the evaporator in the technology of spent nuclear fuel processing [Text] // Chemical Engineering Transactions. – 2017. – Vol. 61 (in press). – ISSN 2283-9216.

58 Ефремов, Е. В., Барков, Д. Е. Алгоритм управления выпарным аппаратом установки экстракционно-кристаллизационного аффинажа [Текст] // Перспективы науки. – 2017. – № 3(90). – С. 14–18. – ISSN 2077-6810.

59 Ефремов, Е. В., Барков, Д. Е. Модификация математической модели выпарного аппарата радиохимической переработки отработанного ядерного

топлива [Текст] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 3. – С. 104–107. – ISSN 2079-5920.

60 Kozin, K. A., Efremov, E. V., Kabrysheva, O. P., Grachev, M. I. A computer model of the evaporator for the development of an automatic control system [Electronic resource] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 142 : Innovative Technologies in Engineering. – ISSN 1757-899X.

61 Ефремов, Е. В., Барков, Д. Е. Математическая модель выпарного аппарата в технологии переработки отработанного ядерного топлива [Электронный ресурс] // Научная сессия ТУСУР–2017 : материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа, г. Томск 10–12 мая 2017 г. : в 8 частях. – Томск : В-Спектр, 2017. – Ч. 4. – С. 127–129.

62 Chursin, Y. A., Efremov, E. V., Gozhimov, A. I., Kabrysheva, O. P., Barkov, D. E. A Computer Model of the Evaporator and Its Sensors [Text] // Chemical Engineering Transactions. – 2017. – Vol. 61 (in press). – ISSN 2283-9216.

63 Разработка структуры и функций КОД ТП, системы визуализации выполнения функций и результатов, разработка и верификация математических моделей узлов, установок, оборудования технологической схемы и алгоритмов для контроля, диагностики, управления и оптимизации технологических процессов для кода оптимизации и диагностики [Текст] : отчет о НИР (промежуточ.) : Томский политехнический университет; рук. Ливенцов С. Н. – Томск, 2014 – 193 с. – Исполн.: Ефремов Е. В. [и др.] (всего 12 чел.). – Инв. № 852/18.14 от 27.10.14.

64 Ефремов, Е.В. Моделирование выпарного аппарата [Электронный ресурс] / Е. В. Ефремов, С. Н. Ливенцов, А. А. Полосин, П. П. Локтюшин // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции, г. Томск, 3–6 июня 2015 г. / Национальный исследовательский Томский

политехнический университет (ТПУ) ; под ред. А. Н. Дьяченко [и др.]. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – С. 330.

65 Rasmussen, H., Larsen, L. F. S. Non-linear and adaptive control of a refrigeration system [Text] // I E T Control Theory and Applications. – 2011. – Vol. 5. – № 2. – P. 364–378. – ISSN 1751-8644.

66 Куо, Б. Теория и проектирование цифровых систем управления [Текст] / Бенжамин С. Куо ; перевод с англ. В. Г. Дунаева. Б. И. Копылова, А. Н. Косилова ; под ред. П. И. Попова. – М. : Машиностроение, 1986. – 268 с.

67 Бесекерский, В. А., Попов, Е. И. Теория систем автоматического управления [Текст] / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб. : Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с. – ISBN 5-93913-035-6.

68 Чурсин, Ю. А., Ефремов, Е. В., Горюнов, А. Г. Система автоматизированного управления процессом рекстракции в экстракционной колонне [Текст] // Современные техника и технологии : 13-я Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 26–30 марта 2007 г. ; труды в 3 т. / Томский политехнический университет (ТПУ). – 2007. – Т. 2. – С. 471–473.

69 Денисенко, В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Часть I [Текст] // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 4. – С. 86–97. – ISSN 0206-975X.

70 Денисенко, В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Часть II [Текст] // Современные технологии автоматизации. – 2008. – № 1. – С. 86–99. – ISSN 0206-975X.

71 Денисенко, В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации [Текст] // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 66–74. – ISSN 0206-975X.

72 Изерман, Р. Цифровые системы управления [Текст] / Рольф Изерман ; пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 541 с. : ил.

73 Дорф, Р., Бишоп, Р. Современные системы управления [Текст] / Ричард К. Дорф, Роберт Х. Бишоп ; перевод с английского Б. И. Копылова. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 832 с. : ил. – ISBN 5-93208-119-8.

74 Лукас, В. А. Теория управления техническими системами [Текст] : компактный учебный курс для вузов. – 4-е издание, исправленное. – Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2005. – 677 с. : ил. – ISBN 5-8019-0058-6.

75 Наладка средств измерения и систем технологического контроля [Текст] : Справочное пособие / А. С. Клюев, Л. М. Пин, Е. И. Коломиец, С. А. Клюев ; под ред. А. С. Клюева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 400 с. : ил. – ISBN 5-283-01503-3.

76 Воронов, А. А. Основы теории автоматического управления. Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем [Текст]. – 2-е изд., перераб. – М. : Энергия, 1980 – 312 с. : ил.

77 Математическое моделирование технологических процессов водно-экстракционной переработки ядерного топлива [Текст] : монография / А. Г. Горюнов, В. Ф. Дядик, С. Н. Ливенцов, Ю. А. Чурсин. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 236 с. : ил. – ISBN 978-5-98298-813-3.

78 Пат. 2133023 Российская Федерация, МПК G 01 N 9/26. Способ автоматического контроля уровня и плотности раствора в выпарном аппарате [Текст] / Живописцев В. А., Зыков Н. А., Морозов А. А., и [др.] ; заявитель и патентообладатель ОАО «НИУИФ». – № 98102366/25 ; заявл. 10.02.1998 ; опубл. 10.07.1999. – 8 с. : ил.

79 Пат. 102994 Российская Федерация, МПК G 01 F 23/14. Устройство для измерения уровня или плотности жидкости [Текст] / Гофман Ф. Э. ; патентообладатель Гофман Ф. Э. – № 2010114351/28 ; заявл 13.04.2010 ; опубл. 20.03.2011. – 13 с. : ил.

80 Гофман, Ф. Э., Гофман, Р. Д., Зильберман, Б. Я., Рябков, Д. В., Андреева, Е. В. Лабораторный выпарной стенд с автоматизированной системой

управления [Текст] // Химическая технология. – Т. 13. – № 9. – 2012. – С.565–570. – ISSN 1684-5811.

81 Грачев, М. И. Разработка функциональной схемы автоматизации процесса получения кальцитоангидрита [Электронный ресурс] / М. И. Грачев, Е. В. Ефремов, А. А. Денисевич // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов VIII Международной научно-практической конференции, г. Томск, 1–3 июня 2016 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ); под ред. О. Ю. Долматова [и др.]. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – С. 233.

82 Голубятников, В. А., Шувалов, В. В. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности [Текст]: 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1985. – 350 с. : ил.

83 Программно-технический комплекс УМИКОН [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.umikon.ru/produktsiya>.

84 Разработка моделей технологических процессов, узлов и установок технологической схемы переделов ЗЯТЦ, включая обеспечивающие и вспомогательные системы, для КОД ТП. Разработка и отладка программных модулей КОД ТП [Текст] : отчет о НИР (промежуточ.) : Томский политехнический университет; рук. Ливенцов С. Н. – Томск, 2015 – 299 с. – Исполн.: Ефремов Е. В. [и др.] (всего 16 чел.). – Инв. № 4/10.15 от 02.10.15.

85 Завершение разработки и отладки программных модулей КОД ТП, реализующих модели технологических процессов, узлов, установок и алгоритмов технологической схемы переделов ЗЯТЦ [Текст] : отчет о НИР (промежуточ.) : Томский политехнический университет; рук. Ливенцов С. Н. – Томск, 2016 – 315 с. – Исполн.: Ефремов Е. В. [и др.] (всего 13 чел.). – Инв. № 5/05.15 от 25.05.16.

86 Разработка, реализация и тестирование сервера согласования модулей и систем кода оптимизации и диагностики технологических процессов ЗЯТЦ [Текст] : отчет о НИР (промежуточ.) : Томский политехнический университет;

рук. Ливенцов С. Н. – Томск, 2016 – 74 с. – Исполн.: Ефремов Е. В. [и др.] (всего 7 чел.). – Инв. № 8/08.16 от 18.08.16.

87 Формирование базы данных и валидация КОД ТП для проведения расчетных экспериментов и начала исследований по оптимизации технологических схем технологических переделов ЗЯТЦ, формулированию окончательных требований к оборудованию, алгоритмам контроля, диагностики и управления промышленной технологии замкнутого топливного цикла [Текст] : отчет о НИР (заключ.) : Томский политехнический университет; рук. Ливенцов С. Н. – Томск, 2016 – 189 с. – Исполн.: Ефремов Е. В. [и др.] (всего 10 чел.). – Инв. № 9/10.16 от 10.10.16.

Приложение А

Акт приемки-сдачи системы автоматизированного управления лабораторным аффинажным стандом

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»
634050, Российская Федерация, г. Томск, проспект Ленина, дом 30
УФК по Томской области (ФГАОУ ВО НИ ТПУ л/сч 306561Ц45270)
ИНН 7018007264
Расчетный счет 40501810500002000002
Банк получателя: Отделение Томск
БИК 046902001
Кор.счет: нет
ОКАТО 69401363000
ОКТМО 69701000
КПП 701701001 - для платежей
КПП 701750001 - для оформления счетов-фактур

Акционерное общество «Сибирский химический комбинат»
ИНН 7024029499, КПП 702450001,
Юридический адрес:
636039, Российская Федерация,
г. Северск, Томская обл., ул. Курчатова, 1
Банковские реквизиты:
к/с 30101810800000000758
р/с. 40702810010000001510
ФИЛИАЛ ГПБ (АО) в г. Томске.
БИК 046902758
Коды:
ОКПО 07622928, ОКВЭД 23.30
ОГРН 1087024001965

АКТ №2 от 15.10.2015

сдачи – приемки научно-исследовательских работ

по договору № 0-119/14У от «19» июня 2014г. (11/652-Д от 21.05.2014 г.)

Наименование научно-исследовательских работ и этапа работ:

НИР по теме «Разработка системы автоматизированного управления лабораторным аффинажным стандом, предназначенным для отработки экстракционно-кристаллизационной технологии переработки ОЯТ РУ БРЕСТ-ОД-300»; этап №2.

Мы, нижеподписавшиеся, ИСПОЛНИТЕЛЬ в лице заместителя проректора по научной работе и инновациям Байдали Сергея Анатольевича с одной стороны, и ЗАКАЗЧИК в лице технического директора Крутых Виктора Николаевича с другой стороны, составили настоящий акт о том, что научно-исследовательские работы выполнены в полном объеме на общую сумму 3 000 000 (три миллиона) руб. 00 коп., в том числе НДС 457 627,12 (четыреста пятьдесят семь тысяч шестьсот двадцать семь) руб. 12 коп., в том числе по этапам:

№ этапа	Стоимость работ, руб.
1	1 500 000
2	1 500 000

Краткое описание работы: Этап №2 «Разработка и внедрение программного обеспечения установок аффинажного станда». Разработано и внедрено программное обеспечение. Выпущен заключительный отчет о НИР от «14» октября 2015 г № 18/8437.

Следует к получению по настоящему акту

1 500 000 руб.

От исполнителя

Заместитель проректора по научной работе и инновациям
ФГАОУ ВО НИ ТПУ

С.А. Байдали

От заказчика

Технический директор
АО «СХК»

В.Н. Крутых

Приложение Б

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования в учебный процесс

TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY



ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Ministry of Education and Science of the Russian Federation
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
"National Research Tomsk Polytechnic University" (TPU)
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia
Tel. (3822) 56 63 33, (3822) 70 17 79,
Fax (3822) 56 38 65, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
OKPO (National Classification of Enterprises and Organizations):
02069303,
Company Number: 1027000890168,
VAT / KPP (Code of Reason for Registration)
7018007264/701701001, BIC 046902001

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет» (ТПУ)
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия
тел.: (3822) 56 63 33, (3822) 70 17 79,
факс: (3822) 56 38 65, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
ОКПО 02069303, ОГРН 1027000890168,
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 046902001

АКТ

01.09.2017 № 569/18

УТВЕРЖДАЮ

Директор физико-технического института
ФГАУ ВО НИ ТПУ

« »

О.Ю. Долматов
2017 г.



Комиссия в составе:

Председателя

Зав. каф. ЭАФУ

А.Г. Горюнов

Членов комиссии:

Доцент кафедры ЭАФУ

В.Ф. Дядик

Доцент кафедры ЭАФУ

Н.В. Ливенцова

Доцент кафедры ЭАФУ

А.В. Вильнина

Ассистент кафедры ЭАФУ

А.А. Денисевич

рассмотрела результаты работ полученных при непосредственном участии сотрудника кафедры «Электроника и автоматика физических установок» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» Ефремова Евгения Викторовича и составила настоящий акт об использовании в учебном процессе на кафедре «Электроника и автоматика физических установок» результатов, вошедших в диссертационные исследования (далее Результаты).

Комиссия подтверждает, что Результаты используются в учебном процессе на кафедре «Электроника и автоматика физических установок» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Предложенная в диссертации система контроля уровня и плотности растворов в аппаратах ядерно-безопасного исполнения использована в лабораторном стенде для исследования методов косвенного измерения уровня, плотности и границы раздела

многофазных сред. Результаты внедрены в учебные курсы: Средства автоматизации и приборы контроля химического производства, Процессы и оборудование атомных электростанций, как технологические объекты управления, Методы контроля технологических переменных ядерных энергетических установок, Процессы и оборудование производств ядерного топливного цикла, как технологические объекты управления, Методы контроля технологических переменных в производствах ядерного топливного цикла.

Председатель



А.Г. Горюнов

Члены комиссии



В.Ф. Дядик

Н.В. Ливенцова

А.В. Вильнина

А.А. Денисевич

Приложение В

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования

ОАО «Манотомь»



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО Надежность наших приборов проверена временем

MANOTOMЬ



пр. Комсомольский, 62, г. Томск, Россия, 634061
 Генеральный директор (3822) 44 26 28, факс (3822) 44 29 06, e-mail: priem@manotom-tmz.ru
 Отдел продаж (3822) 28 88 99, 90 34 54, e-mail: sbt@manotom-tmz.ru
 Группа маркетинга (3822) 28 88 79, 90 34 45, e-mail: marketing@manotom-tmz.ru
 факс (3822) 44 28 43, 44 29 06
<http://www.manotom-tmz.ru>
 ОКПО 00225590 ИНН/КПП 7021000501/701701001

**made
inTomsk**

20.09.2017 г. № 84/137

Комиссия Технического совета ОАО «Манотомь» в составе председателя – заместителя Генерального директора Свинолупова Ю.Г., руководителя Технического совета – Технического директора ОАО «Манотомь» Стародубцева Д.Ю., руководителя конструкторско-технологической службы ОАО «Манотомь» Везнера С.М. рассмотрела результаты работ, проведенных при непосредственном участии Ефремова Евгения Викторовича, ассистента кафедры «Электроника и автоматика физических установок» Томского политехнического университета, по разработке системы контроля уровня и плотности растворов в аппаратах ядерно-безопасной геометрии, и составила настоящий акт о внедрении этих результатов, вошедших в диссертационные исследования Ефремова Е.В., на ОАО «Манотомь»,

Ефремов Е.В. является исполнителем государственного Задания №8.3079.2017/ПЧ Министерства образования и науки РФ и договора с промышленным партнером ОАО «Манотомь» №18.14-92/2017 от 17.04.2017 г. по теме «Разработка интеллектуального датчика дифференциального давления с улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками для серийного освоения комплекса новых приборов стратегических отраслей Российской Федерации».

Комиссия подтверждает, что в соответствии с календарным планом Задания №8.3079.2017/ПЧ при непосредственном участии Ефремова Е.В. был создан лабораторный стенд по исследованию системы контроля уровня и плотности в аппаратах ядерно-безопасной геометрии, построенной на основе сдвоенного дифференциального измерителя давления, на основе сенсоров и вторичного преобразователя отечественного производства.

Для повышения стабильности работы прибора в части дрейфа нуля предложено использовать парное включение мостов подобранных сенсоров давления. Такое решение по отношению к аналогам позволило существенно снизить себестоимость прибора при сохранении стабильности работы прибора. Сдвоенный дифференциальный манометр имеет один единый интеллектуальный вторичный преобразователь, что также обеспечило снижение себестоимости прибора по отношению к аналогам. Разработанный прибор будет использован для серийного освоения комплекса новых приборов стратегических отраслей Российской Федерации на базе ОАО «Манотомь».

По оценке комиссии, личный вклад Ефремова Е.В. в результаты работ по созданию системы контроля уровня и плотности растворов в аппаратах ядерно-безопасной геометрии составляет не менее 70%.

Генеральный директор

А.Ю.Гетц

Заместитель генерального директора

Ю.Г. Свинолупов

Технический директор

Д.Ю. Стародубцев

Начальник конструкторско-технологической службы

С.М. Везнер



Приложение Г

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования

АО «Сибирский химический комбинат»



СИБИРСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ
 ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»
 Акционерное общество
 «СИБИРСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ»
 (АО «СХК»)
 РАДИОХИМИЧЕСКИЙ ЗАВОД
 (РХЗ)
 АКТ
 06.09.2017 № 11-40/05-09-900/149-ВБ
 по результатам работы

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор АО «СХК»

С.А. Котов

05.09. 2017г.

Комиссия в составе:

Председатель комиссии:
 Члены комиссии

С.Г. Терентьев
 А.И. Сильченко
 С.А. Пашков
 О.И. Николаенков
 Э.Ю.Шенцов

рассмотрела результаты работ, проведенных при непосредственном участии Ефремова Евгения Викторовича, ассистента кафедры «Электроника и автоматика физических установок» Томского политехнического университета, по разработке алгоритма контроля и управления выпарными аппаратами аффинажно-экстракционно-кристаллизационного стенда (АЭКС) РХЗ АО «СХК», и составила настоящий акт о внедрении этих результатов, вошедших в диссертационные исследования.

Ефремов Е.В. являлся исполнителем НИОКР СХК № 11/652-Д от 21.05.2014 г. по теме «Разработка системы автоматизированного управления лабораторным аффинажным стендом, предназначенным для отработки экстракционно-кристаллизационной технологии переработки ОЯТ РУ БРЕСТ-ОД-300».

Комиссия подтверждает, что в соответствии с актом сдачи-приемки №2 от 15.10.2015 г. по договору №11/652-Д от 21.05.2014 г. при непосредственном участии Ефремова Е.В. были разработаны и внедрены алгоритмы контроля и управления выпарными аппаратами АЭКС, включающим контур управления уровнем в камере разделения, плотностью кубового раствора и степени выпарки.

Внедрение разработанных алгоритмов позволило реализовать систему автоматизированного контроля и управления выпарными аппаратами ядерно-безопасной геометрии, обеспечивающую автоматическую стабилизацию технологических переменных процесса выпаривания.

По оценке комиссии, личный вклад Ефремова Е.В. в результаты работ по созданию алгоритмов контроля и управления выпарными аппаратами составляет не менее 70%.

Заместитель руководителя дирекции ОДЭК
 по проекту «Прорыв»

С.Г. Терентьев

Главный инженер РХЗ АО «СХК»

А.И. Сильченко

Главный технолог РХЗ АО «СХК»

С.А. Пашков

Главный специалист
 (по техническому развитию)

О.И. Николаенков

Начальник УЭ КИПиА

Э.Ю.Шенцов

Приложение Д

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования

АО «ВНИИНМ»

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО



ВНИИНМ
имени А.А.Бочвара

«ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ИМЕНИ
АКАДЕМИКА А.А. БОЧВАРА» (АО «ВНИИНМ»)

123060, Москва, в/л 369, АО «ВНИИНМ»; Телеграф: 123060, Москва, «ПЕРЕКАТ»; Телетайп: 111674, Москва, «ДИВО»; Телефон: 8 (499) 190-4994.
Факс: 8 (499) 196-4168, 8 (495) 742-5721. <http://www.bochvar.ru>. E-mail: post@bochvar.ru
ОКПО 07625329, ОГРН 5087746697198, ИНН/КПП 7734598490/773401001



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
АО «ВНИИНМ»
Л.А. Карпюк
_____ 2017 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Ефремова Евгения Викторовича на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе:
председатель

Кашеев В.А.	–	Директор научно-технологического отделения АО «ВНИИНМ», канд. физ.-мат. наук
Шадрин А.Ю.	–	Главный эксперт АО «ВНИИНМ», д-р хим. наук
Шмидт О.В.	–	Ведущий эксперт АО «ВНИИНМ», канд. хим. наук
Веселов С.Н.	–	Начальник отдела АО «ВНИИНМ»

члены комиссии

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Система автоматизированного контроля и управления выпарными аппаратами аффинажного стенда АО «Сибирский химический комбинат», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены при выполнении работ по проектному направлению «ПРОРЫВ» Госкорпорации «Росатом» в АО «Высокотехнологичный научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ») при разработке кода оптимизации и диагностики технологических процессов (КОД ТП), позволяющего имитировать работу будущего производства замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) реактора на быстрых нейтронах «БРЕСТ-300», в виде:

- математических моделей технологических процессов выпаривания;
- методик расчета и моделирования алгоритмов и систем управления выпарными аппаратами, используемыми в ЗЯТЦ, в частности на аффинажном производстве;

- программы имитации функционирования технологических схем, и систем автоматизированного управления выпарными аппаратами в составе КОД ТП;
- результатов расчетных экспериментов по исследованию эффективности разрабатываемых технологий и систем управления.

Внедрение указанных результатов позволило повысить качество проектирования узлов и систем управления замкнутого ядерного топливного цикла, эффективность моделирования технологических схем и систем управления процессами выпаривания ЗЯТЦ, сократить затраты на проведение работ и повысить производительность труда при разработке КОД ТП.

Результаты внедрялись при выполнении НИР и ОКР по темам:

1 «Разработка кода оптимизации и диагностики технологических процессов (КОД ТП) Этапы 2014 – 2016 гг.» договор на выполнение НИОКР между АО «ВНИИНМ» и ФГАОУ ВО НИ ТПУ № 0-116/14 от 14.05.2014.

2 «Моделирование ключевых технологических процессов замкнутого топливного цикла и его организации. Этапы 2014 – 2016 гг.» договор на выполнение НИОКР между АО «ВНИИНМ» и ИБРАЭ РАН № 1037/2014/01 от 03.04.2014.

Работы выполнены согласно приказу Госкорпорации «Росатом» от 19.07.2011 г. № 1/619-П «О реализации задачи по разработке реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым ядерным топливным циклом», ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период до 2010 – 2015 годов и на перспективу до 2020 года» и проекта «Новая технологическая платформа: замкнутый ядерно-топливный цикл с реакторами на быстрых нейтронах».

Результаты диссертационной работы опубликованы в научных отчетах:

1 Анализ отечественных и зарубежных источников по проблемам создания расчетных кодов. Разработка основополагающих принципов функционирования кода оптимизации и диагностики технологических процессов: отчет о НИР (промежут.) / ТПУ; рук. Ливенцов С.Н.; исполн.: Горюнов А.Г, Ефремов Е.В. [и др.]. – Томск, 2014. – 47 с. – Инв. № 446/18.14 от 22.05.2014.

2 Разработка структуры и функций КОД ТП, системы визуализации выполнения функций и результатов, разработка и верификация математических моделей узлов, установок, оборудования технологической схемы и алгоритмов для контроля, диагностики, управления и оптимизации технологических процессов для кода оптимизации и диагностики: отчет о НИР (промежут.) / ТПУ; рук. Ливенцов С.Н.; исполн.: Горюнов А.Г, Ефремов Е.В. [и др.]. – Томск, 2014. – 47 с. – Инв. № 852/18.14 от 27.10.2014.

3 Завершение разработки и отладки программных модулей КОД ТП, реализующих модели технологических процессов, узлов, установок и алгоритмов технологической схемы переделов ЗЯТЦ: отчет о НИР (промежут.) / ТПУ; рук. Ливенцов С.Н.; исполн.: Горюнов А.Г, Ефремов Е.В. [и др.]. – Томск, 2016. – 315 с. – Инв. № 5/05.15 от 25.05.2016.

4 Формирование базы данных и валидация КОД ТП для проведения расчетных экспериментов и начала исследований по оптимизации технологических схем технологических переделов ЗЯТЦ, формулированию окончательных требований к оборудованию, алгоритмам контроля, диагностики и управления промышленной технологии замкнутого топливного цикла: отчет о НИР (заключительный) / ТПУ; рук. Ливенцов С.Н.; исполн.: Горюнов А.Г, Ефремов Е.В. [и др.]. – Томск, 2016. – 189 с. – Инв. № 9/10.16 от 10.10.2016.

5 Разработка модели растворения ОЯТ или продуктов пирохимического передела в статическом режиме. Анализ проблем создания и разработка концепции кода оптимизации и диагностики технологических процессов: Отчет о НИОКР (промежут.) / ОАО «ВНИИНМ»; рук.

Шмидт О.В.; исполн.: Полуэктов П.П., Кашеев В.А., Ливенцов С.Н., Ефремов Е.В. [и др.]. – Москва, 2014. – 56 с. – Инв. № 12096 – ДСП.

6 Моделирование ключевых технологических процессов замкнутого топливного цикла и его организации. Этап 2014 года: Отчет о НИОКР (промежут.) / ОАО «ВНИИНМ»; рук. Шмидт О.В.; исполн.: Полуэктов П.П., Кашеев В.А., Рубисов В.Н. [и др.] (всего 54 чел). – Москва, 2014. – 535 с. – Инв. № 12130 – ДСП.

7 Моделирование ключевых технологических процессов замкнутого топливного цикла и его организации. Этап 2014-2016 гг. Опытная эксплуатация кода БЕРКУТ и кросс-верификация с твэльным кодом ОАО «ВНИИНМ» Отчет о НИОКР АО «ВНИИНМ» (промежуточный), рук. Шмидт О.В.; исполн.: Кашеев В.А., Третьякова С.Г., Ливенцов С.Н., Ефремов Е.В. [и др.]. – Москва, 2015. - Инв. № 12214 –ДСП, 91 с.

8 Моделирование ключевых технологических процессов замкнутого топливного цикла и его организации. Этап 2014-2016 гг. Опытная эксплуатация кода БЕРКУТ и кросс-верификация с твэльным кодом ОАО «ВНИИНМ» Отчет о НИОКР АО «ВНИИНМ», этап 6, рук. Шмидт О.В.; исполн.: Кашеев В.А., Третьякова С.Г., Ливенцов С.Н., Ефремов Е.В. [и др.]. – Москва, 2015. - Инв. № 1382 кт от 28.10.2015 (Часть 1), - 329 с.

6. Моделирование ключевых технологических процессов замкнутого топливного цикла и его организации. Этап 2014-2016 гг. Опытная эксплуатация кода БЕРКУТ и кросс-верификация с твэльным кодом ОАО «ВНИИНМ» Отчет о НИОКР АО «ВНИИНМ» (заключительный), рук. Шмидт О.В.; исполн.: Кашеев В.А., Евсюкова Ю.А., Ливенцов С.Н., Ефремов Е.В. [и др.]. – Москва, 2016 - Инв. № 1390 кт от 01.11.2016 (Часть 2), - 496 с.

Председатель комиссии



В.А. Кашеев

Члены комиссии:



А.Ю. Шадрин



О.В. Шмидт



С.Н. Веселов

Приложение Е

Свидетельства о Государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2017617525

**Дистанционный контроль и управление уровнем
высокоактивных растворов**

Правообладатель: *федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический
университет» (RU)*

Авторы: *Надеждин Игорь Сергеевич (RU), Гожимов Александр
Игоревич (RU), Горюнов Алексей Германович (RU), Ефремов Евгений
Викторович (RU), Денисевич Александр Александрович (RU), Ливенцов
Сергей Николаевич (RU)*

Заявка № **2017614566**
Дата поступления **19 мая 2017 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **06 июля 2017 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017611430

Программный модуль имитации
экстракционно-кристаллизационного аффинажа КОД ТП
замкнутого ядерного топливного цикла. Версия 1.0

Правообладатель: *Российская Федерация, от имени которой
выступает Государственная корпорация по атомной энергии
«Росатом» (Госкорпорация «Росатом») (RU)*

Авторы: *Гожимов Александр Игоревич (RU), Горюнов Алексей
Германович (RU), Ефремов Евгений Викторович (RU), Зеленецкая
Екатерина Петровна (RU), Козин Кирилл Андреевич (RU), Очоа Бикэ
Антон Орландович (RU), Чурсин Юрий Александрович (RU)*

Заявка № 2016663436

Дата поступления 09 декабря 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 02 февраля 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 *Ф.И. Измаев*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017611620

Программный модуль имитации концентрирования жидких радиоактивных отходов КОД ТП замкнутого ядерного топливного цикла. Версия 1.0

Правообладатель: *Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (Госкорпорация «Росатом») (RU)*

Авторы: *Ефремов Евгений Викторович (RU), Козин Кирилл Андреевич (RU), Чурсин Юрий Александрович (RU)*

Заявка № 2016663413

Дата поступления 09 декабря 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Ресстре программ для ЭВМ 07 февраля 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.И. Полежаев Г.И. Полежаев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017614219

Программный модуль сервера согласования модулей и систем кода оптимизации и диагностики технологических процессов ЗЯТЦ. Версия 1.0

Правообладатель: *Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (Госкорпорация «Росатом») (RU)*

Авторы: *Гожимов Александр Игоревич (RU), Ефремов Евгений Викторович (RU), Чурсин Юрий Александрович (RU)*

Заявка № 2017611450

Дата поступления 22 февраля 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 апреля 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ильев

