

На правах рукописи



Ефремов Евгений Викторович

**Система автоматизированного контроля и управления выпарными  
аппаратами аффинажного стенда  
АО «Сибирский химический комбинат»**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2017 г.

Работа выполнена на кафедре «Электроника и автоматика физических установок» (ЭАФУ) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ).

**Научный руководитель**

**Ливенцов Сергей Николаевич,**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты**

**Кишкин Александр Анатольевич**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск, заведующий кафедрой «Холодильной, криогенной техники и кондиционирования»

**Дмитриев Вячеслав Михайлович**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», профессор кафедры «Моделирования и системного анализа»

**Ведущая организация**

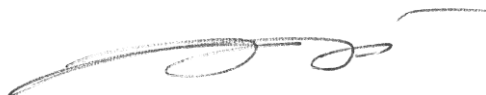
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

Защита состоится «27» декабря 2017 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 212.269.14 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 2, 10-й корпус, ауд. 340.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ, расположенной по адресу: г. Томск, ул. Белинского, д. 53а, и на сайте <http://portal.tpu.ru:7777/council/4060/worklist>

Автореферат разослан «\_\_» октября 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



И.И. Жерин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 топливным циклом для атомных станций.

Для достижения поставленной цели Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (ГК «Росатом») реализует на территории АО «Сибирский химический комбинат» (СХК) проект «Прорыв». Одним из его направлений является строительство опытно-демонстрационного комплекса в составе реакторной установки с пристанционным топливным циклом и комплексом по производству смешанного уран-плутониевого (нитридного) топлива для реакторов на быстрых нейтронах. АО «СХК» в рамках указанного проекта выполнило работы по созданию на Радиохимическом заводе (РХЗ СХК) экстракционно-кристаллизационного аффинажного стенда (ЭКАС), необходимого для отработки технологии экстракционного и кристаллизационного аффинажа смеси U-Pu-Np. 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, в том числе для систем автоматизированного контроля и управления выпарными аппаратами (ВА).

**Актуальность** создания указанных систем обусловлена:

- высокими требованиями к обеспечению безопасности организации технологического процесса;
- уникальностью конструкции ВА 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 ВА, с точки зрения теории управления являющихся объектами без самовыравнивания.

**Степень разработанности темы** исследования можно оценить по работам Таубмана Е.И., Гельперина Н.И., Романкова П.Г., Фролова В.Ф., Дытнерского Ю.И., Minton P.E. Большинство из них посвящено ВА большой производительности. Вклад в разработку способов управления ВА радиохимического производства внесли сотрудники кафедры ЭАФУ ТПУ: под руководством Ливенцова С.Н. созданы системы управления ВА переработки облученного ядерного топлива РХЗ СХК, а под руководством Горюнова А.Г. – АСУ ТП выпаривания реэкстракта урана. В настоящей же работе новым является ее направленность на исследование, разработку и внедрение системы управления уникальным объектом – выпарным аппаратом ядерно-безопасного исполнения.

Технические решения, массогабаритные показатели, положение в технологической цепочке и производительность выделяют ВА ЭКАС СХК из ряда выпарных аппаратов химической технологии и не позволяют применить существующие серийно выпускаемые промышленностью контрольно-измерительные приборы, в частности, уровнемеры и концентратомеры.

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.

**Целью** диссертационной работы является создание системы автоматизированного контроля и управления выпарными аппаратами ядерно-безопасного исполнения с обеспечением автоматической стабилизации технологических переменных процесса выпаривания.

**Задачи**, решение которых 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 системы 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 ЭКАС СХК в части процесса выпаривания, контрольно-измерительные приборы, алгоритмы управления, программное обеспечение АСУ ТП стенда.

**Предметом исследования** являются технологические процессы выпаривания растворов, содержащих отработанное ядерное топливо (ОЯТ) и радиоактивные отходы; математические модели ВА; структурный и параметрический синтез систем автоматического управления, а также автоматизированные системы управления (АСУ) процессами выпаривания.

**Научную новизну** составляют следующие результаты исследования:

- разработана математическая модель уникального выпарного аппарата ядерно-безопасного исполнения, отличающаяся учетом электрического обогрева греющей камеры и дискретного управления отводом кубового раствора, 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 двоянных 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 исследования в АСУ ТП ЭКАС СХК с обеспечением существенного снижения 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 АСУ ВА 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 ОАО «Манотомь»;

- в применении результатов исследования при создании учебно-лабораторного стенда для исследования методов косвенного измерения уровня, плотности и определения границы раздела фаз, предназначенного для обеспечения учебных дисциплин подготовки специалистов по специальности 14.05.04 «Электроника и автоматика физических установок» ТПУ.

**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 науке;

- 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, использованный 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.

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

**Апробацию** диссертация прошла на XIII Международной конференции «Современные техника и технологии» (Томск, 2007); VII и VIII Международных конференциях «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» (Томск, 2015, 2016); Международной конференции «Научная сессия ТУСУР – 2017» (Томск, 2017); XIX Международной конференции «Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction» (Тяньцзинь, 2017 г.).

**Публикации** по теме диссертации составляют перечень из 22 работ: 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК; 1 статья в российском журнале; 3 статьи в зарубежных изданиях, индексируемых Scopus; 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 «Разработка кода оптимизации и диагностики технологических процессов (КОД ТП). Этап 2014–2016 г.». Разработаны и внедрены модели ВА в программные модули имитации концентрирования и аффинажа.

- договор № 0-119/14У от 06.06.2014 между ТПУ и СХК «Разработка системы автоматизированного управления лабораторным аффинажным стендом, предназначенным для отработки экстракционно-кристаллизационной технологии переработки ОЯТ РУ БРЕСТ-ОД-300». Разработан и внедрен алгоритм контроля и управления ВА ЭКАС СХК.

- Государственное Задание № 8.3079.2017/ПЧ Минобрнауки РФ и договор с ОАО «Манотомь» № 18.14-92/2017 от 17.04.2017 «Разработка интеллектуального датчика дифференциального давления с улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками для серийного освоения комплекса новых приборов стратегических отраслей РФ». Разработана система контроля уровня и плотности растворов в аппаратах ядерно-безопасного исполнения.

**Диссертация** состоит из введения, 4-х разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 87 источников, 6-и приложений и включает 63 рисунка и 12 таблиц. Работа изложена на 162 страницах, из них приложения – на 12 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первом разделе** проанализирована укрупненная схема ЭКАС СХК (см. рисунок 1), которая предусматривает возможность очистки U-Pu-Np-продуктов 2 способами: по схеме, предложенной АО «ВНИИНМ», или по схеме, предложенной АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина». В обоих случаях после

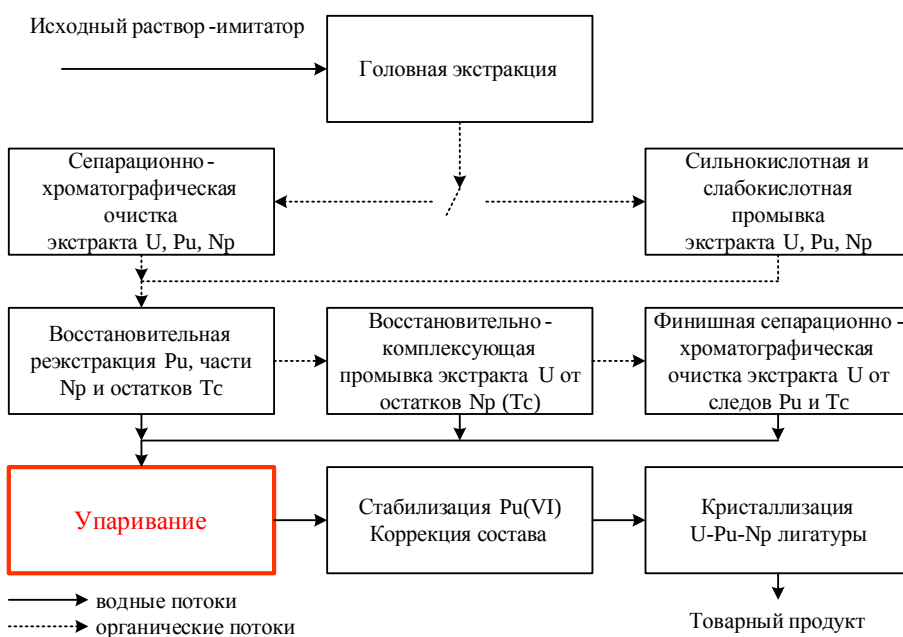


Рисунок 1 – Укрупненная схема ЭКАС СХК

ряда радиохимических переделов водные потоки, содержащие целевые компоненты, поступают на кристаллизационный аффинаж, первой стадией которого является упаривание растворов до требуемых кондиций по урану и плутонию. В ЭКАС применяется еще один ВА, предназначенный для выпарки рафинатов, образовавшихся на прочих участках ЭКАС. Аппараты полностью идентичны, различаются лишь схемой включения и являются аппаратами с естественной циркуляцией раствора, с вынесенной электрически обогреваемой поверхностью нагрева, имеют малые размеры из-за относительно небольшого масштаба производства в защитном исполнении и обеспечения ядерной безопасности.

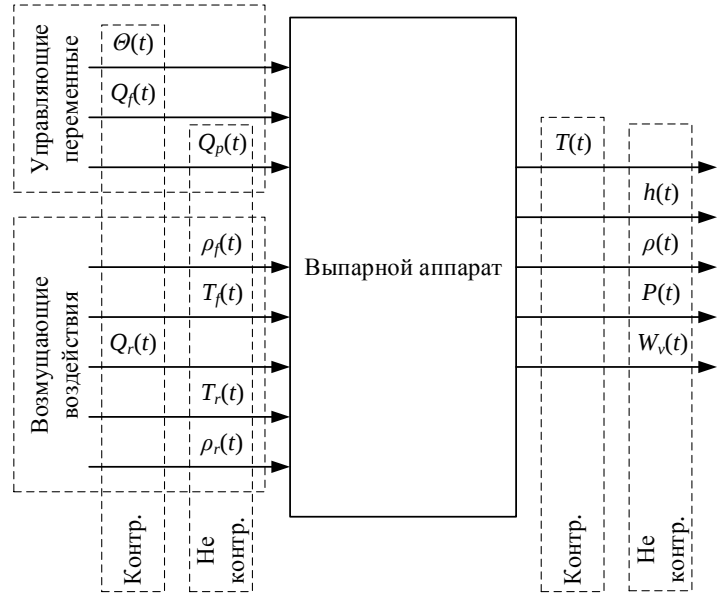
Анализ основного ВА стенда показал, что для стабильного протекания процесса выпаривания необходимо обеспечить интенсивную циркуляцию и стабилизацию уровня раствора. Однако в силу конструктивных особенностей существуют ограничения на интенсивность кипения (а значит и на скорость циркуляции) раствора.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

Для создания САУ ВА принято решение о необходимости разработки математической модели ВА. Для этого были определены основные входные и выходные переменные и предложена информационная модель (рисунок 2). В ка-

честве управляющих воздействий выбраны расходы исходного и упаренного растворов, а также электрическая мощность нагревателя греющей камеры.

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

Во втором разделе на основании предъявленных требований и принятых допущений была разработана математическая модель ВА ЭКАС СХК (1). Будучи реализованной в пакете MATLAB/Simulink, она отражает динамику изменения уровня, плотности и температуры раствора в ВА и учитывает их взаимное влияние.



$\Theta(t)$  – кол-во теплоты, подводимое к греющей камере;  $Q_f(t)$ ,  $Q_p(t)$ ,  $Q_r(t)$  – объемные расходы исходного и упаренного растворов и расход флегмы (при наличии);  $\rho_f(t)$ ,  $\rho_r(t)$  – плотность исходного раствора и флегмы;  $\rho_f(t)$ ,  $\rho_r(t)$  – плотность исходного раствора и флегмы;  $T(t)$ ,  $h(t)$ ,  $\rho_r(t)$ ,  $P(t)$ ,  $W_v(t)$  – температура, уровень и плотность раствора в ВА, давление и расход пара

Рисунок 2 – Формальная информационная модель выпарного аппарата

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dh}{dt} = \frac{1}{A} \cdot \left( Q_f + Q_r - Q_p - \frac{W_v}{\rho_w} \right), \\ \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{Ah} \left( W_v \left( \frac{\rho}{\rho_w} - 1 \right) - Q_f \rho_f \left( \frac{\rho}{\rho_f} - 1 \right) \right), \\ \frac{dT}{dt} = \frac{\left[ W_s (i_s - i_c) + Q_f \rho_f (i_f - i) + Q_r \rho_r (i_r - i) + W_v (i_v - i) - L(T - T_{ar}) \right]}{\rho_f c_f Ah}, \\ W_v = \frac{Q_f \rho_f c_f T_f - Q_p \rho c T + Q_r \rho_r i_r + W_s i_s}{i_v}, \\ i_{s,v} = 2,5 \cdot 10^6 + 1813 \cdot T_{sat} + 0,417 \cdot T_{sat}^2 - 0,11 \cdot T_{sat}^3 + 2090 \cdot (T_{s,v} - T_{sat}), \\ T_{sat} = \frac{2147}{(10,76 - \lg(P_s))} - 273,2, \\ i_c = (-0,0051 \cdot T_s^2 - 1,5595 \cdot T_s + 2467,1) \cdot 10^3. \end{array} \right. \quad (1)$$

На рисунках 3–5 представлены результаты экспериментальных исследований модели путем сравнения ее реакции на входное ступенчатое воздействие с экспериментальными данными, полученными при исследовании аналогичных установок.

Исследования компьютерной модели выявили ее адекватность по воспроизведению уровня, плотности и температуры раствора с относительными среднеквадратичными погрешностями менее 9 %, 5 % и 7 % соответственно, подтвердив возможность ее применения при разработке АСУ.

Для экспериментальной проверки работоспособности разрабатываемой САУ ВА был создан лабораторный стенд, включающий физическую модель ВА, оснащенный необходимыми средствами КИПиА, работающий под управлением SCADA-системы (рисунк 6).

В третьем разделе для определения наиболее оптимальных с точки зрения разработки системы стабилизации каналов управления ВА были проведены эксперименты на компьютерной модели. Выявлено, что каналы управления, обозначенные как  $W_s \rightarrow \rho$ ,  $Q_f \rightarrow \rho$ , существенно нелинейны, а каналы  $Q_p \rightarrow \rho$ ,  $Q_p \rightarrow h$ ,  $Q_f \rightarrow h$  –

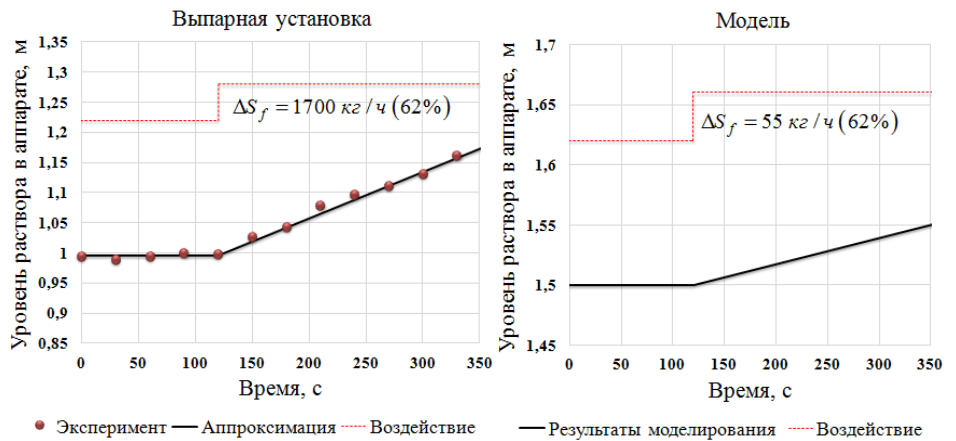


Рисунок 3 – Переходные процессы по уровню

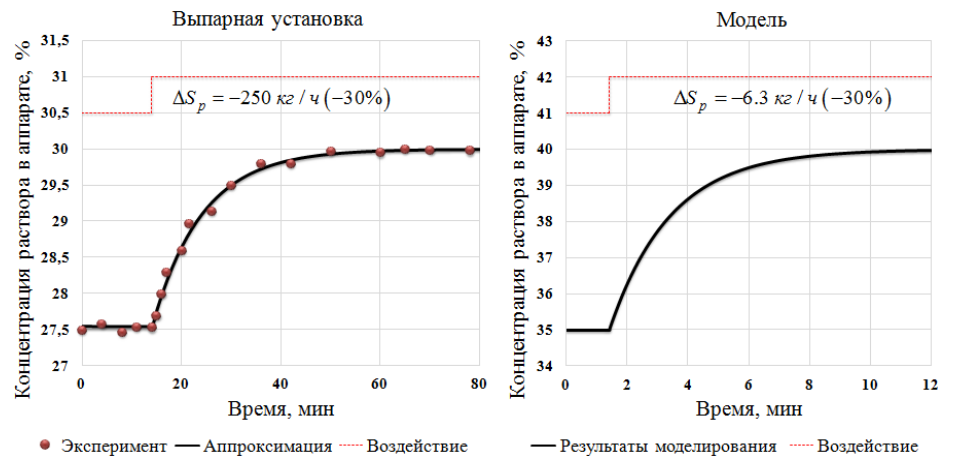


Рисунок 4 – Переходные процессы по концентрации

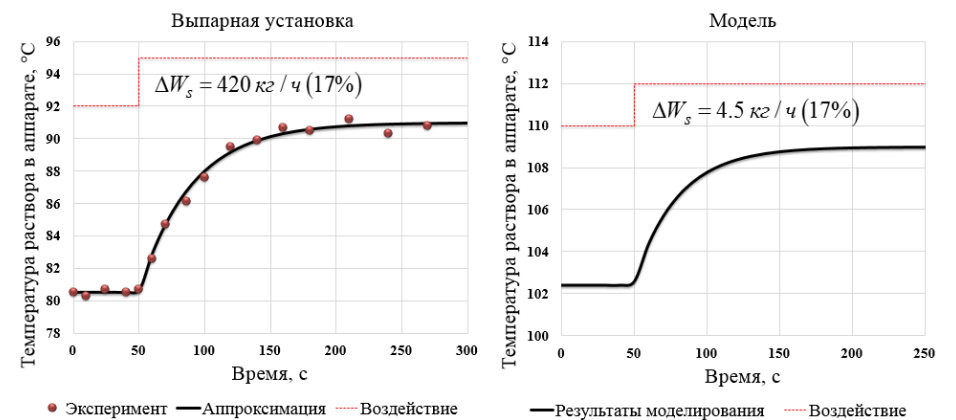


Рисунок 5 – Переходные процессы по температуре

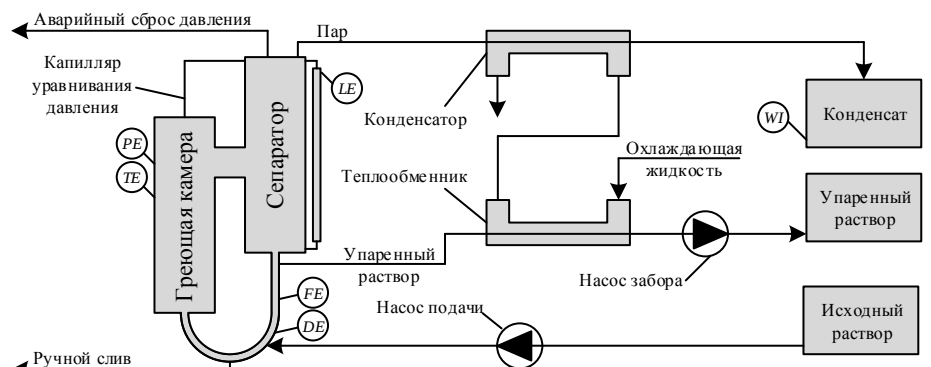


Рисунок 6 – Структурная схема лабораторного стенда

линейны. Кроме того, установлено, что рассматриваемый ВА является нелинейным и многосвязным.

Теоретический анализ показал, что классические САУ ВА с ПИД-регуляторами обеспечивают требуемое качество регулирования и почти не уступают альтернативным.

Были синтезированы и экспериментально исследованы различные варианты САУ ВА, структурные схемы которых представлены на рисунках 7–11. Параметрический синтез позволил произвести экспериментальные исследования различных вариантов САУ. Было определено, что передаточная функция  $W_{Q_f, \rho}(s)$  ВА как объекта управления по каналу  $Q_f \rightarrow \rho$  и передаточная функция  $W_{Q_p, \rho}(s)$  ВА по каналу  $Q_p \rightarrow \rho$  имеют вид (2):

$$W_{Q_f, \rho}(s) = \frac{K_{Q_f, \rho}}{T_{Q_f, \rho}s + 1},$$

$$W_{Q_p, \rho}(s) = \frac{K_{Q_p, \rho}}{T_{Q_p, \rho}s + 1},$$
(2)

где  $K$  и  $T$  с соответствующими индексами – коэффициенты передачи и постоянные времени по соответствующим каналам.

Каналы  $Q_f \rightarrow h$  и  $Q_p \rightarrow h$  можно описать идеальными интегрирующими звеньями с передаточными функциями вида (3):

$$W_{Q_f, h}(s) = \frac{\varepsilon_{Q_f, h}}{s},$$

$$W_{Q_p, h}(s) = \frac{\varepsilon_{Q_p, h}}{s},$$
(3)

где  $\varepsilon$  с соответствующими индексами – добротности по скорости объекта по соответствующим каналам.

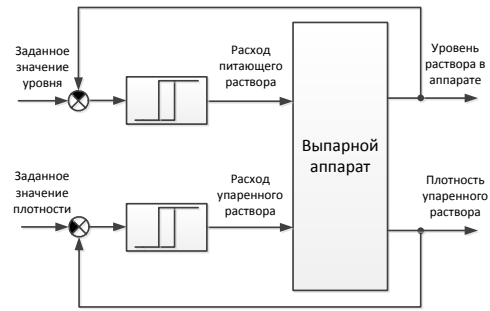


Рисунок 7 – Релейная САУ по стоку

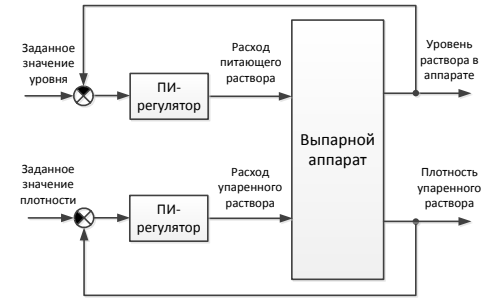


Рисунок 8 – Непрерывная САУ по стоку

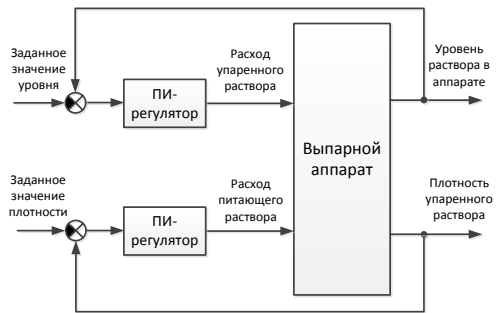


Рисунок 9 – Непрерывная САУ по притоку

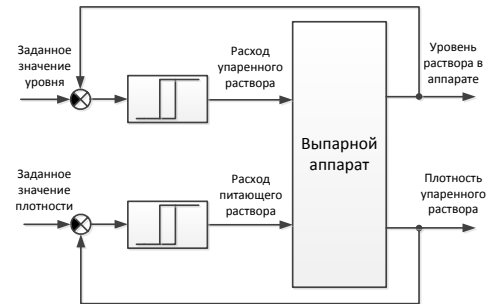


Рисунок 10 – Релейная САУ по притоку

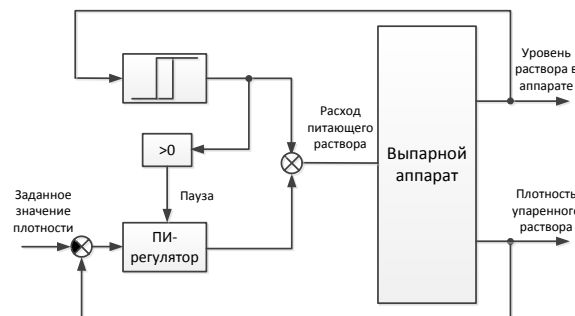


Рисунок 11 – Позиционная САУ по притоку

Отсутствие запаздывания по исследуемым каналам позволило предположить нецелесообразность использования ПИД-закона или более сложных законов регулирования. Параметры настройки ПИ-регуляторов были рассчитаны с использованием программного комплекса «SAR-sintez» (2 метода, см. таблицу 1) и приложения Simulink – «Control Design PID Tuner».

Сравнение прямых показателей качества управления (перерегулирования  $\sigma$  и времени регулирования  $T_{\text{рег}}$ ) для каждого исследуемого линеаризованного канала, показало, что регуляторы, настроенные при помощи «PID Tuner» обеспечивают лучшие показатели качества управления (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры настройки и прямые показатели качества управления

| Канал                    | Метод динамической компенсации |      |                                |              | Метод оптимального модуля |       |                                |              | PID Tuner           |       |                                |              |
|--------------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|--------------|---------------------------|-------|--------------------------------|--------------|---------------------|-------|--------------------------------|--------------|
|                          | Параметры настройки            |      | Показатели качества управления |              | Параметры настройки       |       | Показатели качества управления |              | Параметры настройки |       | Показатели качества управления |              |
|                          | $Kr$                           | $Ti$ | $T_{\text{рег, мин}}$          | $\sigma, \%$ | $Kr$                      | $Ti$  | $T_{\text{рег, мин}}$          | $\sigma, \%$ | $Kr$                | $Ti$  | $T_{\text{рег, мин}}$          | $\sigma, \%$ |
| $Q_{f \rightarrow \rho}$ | 2,183                          | 0,62 | 12,46                          | 1,53         | 0,704                     | 0,413 | 13,46                          | 1,53         | 0,332               | 0,183 | 11,23                          | 0,74         |
| $Q_{p \rightarrow \rho}$ | 8,28                           | 0,58 | 13,64                          | 2,52         | 2,857                     | 0,386 | 16,93                          | 0,95         | 1,329               | 0,172 | 14,68                          | 1,05         |
| $Q_{f \rightarrow h}$    | -                              | -    | -                              | -            | -                         | -     | -                              | -            | 8,345               | 5,231 | 1,05                           | 0,28         |
| $Q_{p \rightarrow h}$    | -                              | -    | -                              | -            | -                         | -     | -                              | -            | 8,214               | 5,654 | 1,12                           | 0,26         |

Для исследования САУ ВА была проведена серия вычислительных экспериментов на синтезированных моделях САУ 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 обеспечивают требуемое качество управления, поэтому их дальнейшее исследование не является целесообразным.

Анализ переходных процессов позволил определить основные показатели качества управления (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Прямые показатели качества исследуемых САУ

| Управление                | «САУ по притоку»         |                       |                       |                     |                          |                       | «САУ по стоку»           |                       |                          |                       |                     |                  | «Позиционная САУ по притоку» |                       |                       |                     |                          |                       |
|---------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------|------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|
|                           | $T_{\rho}^y, \text{мин}$ | $\sigma_{\rho}^y, \%$ | $\Delta_{\rho}^y, \%$ | $T_h^y, \text{мин}$ | $\sigma_h^y, \%$         | $\Delta_h^y, \%$      | $T_{\rho}^y, \text{мин}$ | $\sigma_{\rho}^y, \%$ | $\Delta_{\rho}^y, \%$    | $T_h^y, \text{мин}$   | $\sigma_h^y, \%$    | $\Delta_h^y, \%$ | $T_{\rho}^y, \text{мин}$     | $\sigma_{\rho}^y, \%$ | $\Delta_{\rho}^y, \%$ | $T_h^y, \text{мин}$ | $\sigma_h^y, \%$         | $\Delta_h^y, \%$      |
| $\Delta \rho = 7\%$       | 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                | $T_{\rho}^b, \text{мин}$ | $\Delta_{\rho}^b, \%$ | $T_h^b, \text{мин}$   | $\Delta_h^b, \%$    | $T_{\rho}^b, \text{мин}$ | $\Delta_{\rho}^b, \%$ | $T_h^b, \text{мин}$      | $\Delta_h^b, \%$      | $T_{\rho}^b, \text{мин}$ | $\Delta_{\rho}^b, \%$ | $T_h^b, \text{мин}$ | $\Delta_h^b, \%$ | $T_{\rho}^b, \text{мин}$     | $\Delta_{\rho}^b, \%$ | $T_h^b, \text{мин}$   | $\Delta_h^b, \%$    | $T_{\rho}^b, \text{мин}$ | $\Delta_{\rho}^b, \%$ |
| $\Delta \rho_f = \pm 5\%$ | 33                       | 0,8                   | 32                    | 5                   | 60                       | 2,1                   | 39                       | 1,7                   | 32                       | -1                    | -                   | -5               | 32                           | -1                    | -                     | -                   | -5                       | -5                    |
| $\Delta \rho_f = -8\%$    | 80                       | -1,3                  | 460                   | -10                 | 510                      | -3,3                  | 78                       | 3                     | 120                      | -2                    | -                   | -6               | 120                          | -2                    | -                     | -                   | -6                       | -6                    |
| $\Delta T_f = \pm 10\%$   | 14                       | 0,1                   | 17                    | 0,3                 | 6                        | 0,1                   | 14                       | 0,4                   | 75                       | 0,6                   | -                   | 0,8              | 75                           | 0,6                   | -                     | -                   | 0,8                      | 0,8                   |
| $\Delta T_f = \pm 20\%$   | 62                       | -0,2                  | 86                    | 2                   | 65                       | -0,5                  | 83                       | 1,8                   | 150                      | 1,2                   | -                   | 8                | 150                          | 1,2                   | -                     | -                   | 8                        | 8                     |
| $\Delta W_s = \pm 10\%$   | 31                       | -1,2                  | 25                    | 2,5                 | 18                       | -0,7                  | 44                       | 2,5                   | 112                      | -2                    | -                   | 2,8              | 112                          | -2                    | -                     | -                   | 2,8                      | 2,8                   |
| $\Delta W_s = \pm 20\%$   | 84                       | -4,6                  | 93                    | -13                 | 65                       | 3,2                   | 81                       | 12                    | 127                      | -4                    | -                   | 6                | 127                          | -4                    | -                     | -                   | 6                        | 6                     |

Видно, что если задачей регулирования аппарата является поддержание постоянной плотности упаренного раствора, то лучшее качество регулирования обеспечивается при выборе в качестве регулирующего воздействия по плотности изменения расхода упариваемого раствора. Если же требуется более каче-

ственное регулирование уровня в аппарате, то регулирование концентрации следует осуществлять изменением расхода на выходе, а уровня – на входе.

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 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 возмущениях плотности.

Экспериментальные исследования предложенных САУ на физической модели ВА лабораторного стенда (см. рисунок 6 выше) показали их работоспособность, позволили подтвердить результаты экспериментальных исследований компьютерной модели и выявили существенную чувствительность режима работы ВА к положению уровня жидкости в камере разделения, что должно быть учтено при реализации САУ ВА.

**В четвертом разделе** определена необходимость разработки прибора для измерения уровня, плотности и определения границы раздела фаз для аппаратов в ядерно-безопасном исполнении, так как на момент выполнения настоящей работы промышленностью РФ подобные контрольно-измерительные приборы не выпускаются, однако сведения об указанных технологических переменных необходимы как для соблюдения технологии, так и для обеспечения возможности автоматизации радиохимических производств.

За основу была взята известная схема, поясняемая рисунком 12 и предназначенная для определения уровня и плотности раствора в емкости путем измерения двух перепадов давления. Применение указанной схемы требует установки датчиков давления непосредственно в ВА, поэтому для повышения радиационной стойкости схемы потребуется отдельная установка сенсоров и вторичных преобразователей, что приведет к существенному снижению помехоустойчивости схемы и надежности ее работы.

Однако аналитический обзор показал, что уровень и плотность раствора в ВА целесообразно определять с применением капиллярных линий, заполненных разделительной жидкостью. В этом случае необходимость в разделительных мембранах пропадает, а, следовательно, уменьшается погрешность измерения давления. При этом перемешивания контролируемого раствора и разделительной жидкости избегают путем периодического дозирования малых порций последней. Описанные технические решения успешно реализованы на лабораторном ВА АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» и ООО «Сенсор».

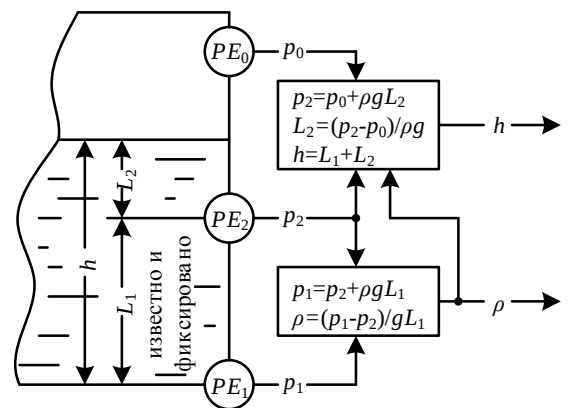


Рисунок 12 – К объяснению гидростатического способа определения уровня и плотности

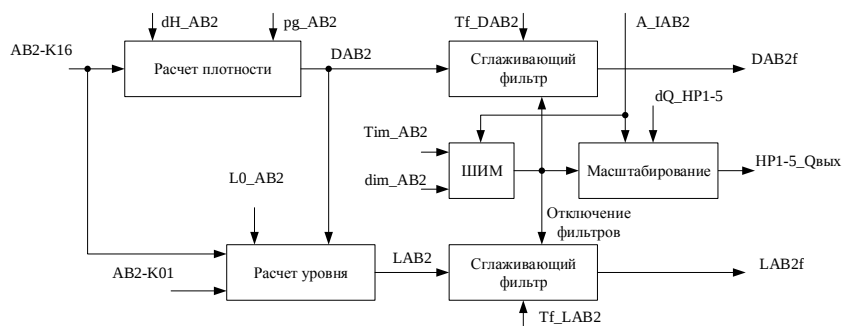
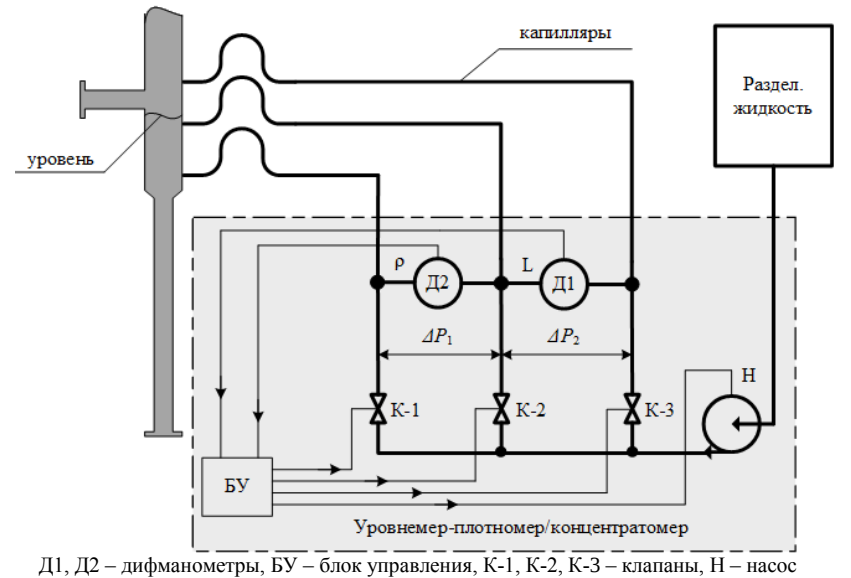
Указанная схема, дополненная системой автоматического дозирования разделительной жидкости, подключенная к управляющему контроллеру, реализующему разработанный алгоритм (см. рисунок 13), успешно испытана и введена в эксплуатацию на ЭКАС СХК, что подтверждено актом сдачи-приемки соответствующей НИР.

Экспериментальные исследования ВА на физической и компьютерной модели (см. разделы 2, 3) определили возможность применения «САУ по стоку». При ее реализации для управления расходом упаренного раствора предложено применить широтно-импульсное управление дискретным выпускным клапаном. Это позволило реализовать САУ ВА, включающую 4 локальных регулятора:

- регулятор уровня раствора в камере разделения (управляющее воздействие – расход исходного раствора для перистальтического насоса);
- регулятор плотности раствора в камере разделения (управляющее воздействие – дискретный сигнал на выпускной клапан);
- регулятор температуры греющей камеры (управляющее воздействие – дискретный сигнал на ТЭН);
- регулятор температуры в контуре дополнительного обогрева камеры разделения (управляющее воздействие – дискретный сигнал на ТЭН).

Указанные алгоритмы контроля и управления ВА ЭКАС основаны на результатах настоящей работы, их внедрение позволило реализовать систему автоматизированного контроля и управления ВА ядерно-безопасного исполнения, обеспечивающую автоматическую стабилизацию технологических переменных процесса выпаривания, и подтверждено соответствующим актом СХК.

Стоит отметить, что применение отдельных дифференциальных манометров существенно увеличивает стоимость реализации измерений технологиче-



AB2-K16, AB2-K01 – плотность и уровень по давлению в ВА; A\_IAB2 – автомат/ручной для дозатора разделительной жидкости; dH\_AB2 – расстояние между штуцерами; pg\_AB2 – плотность разделительной жидкости; L0\_AB2 – постоянная для уровня (балансировка «0»); Tim\_AB2, dim\_AB2 – период следования импульсов и их длительность для дозатора разделительной жидкости; Tf\_DAB2, Tf\_LAB2 – постоянная фильтра для плотности и уровня; dQ\_HP1-5 – величина расхода для насоса; HP1-5\_Qвых – задание расхода насоса HP1-5 (продувка капилляров); DAB2f, LAB2f – сглаженное значение плотности и уровня

Рисунок 13 – Способ и алгоритм программы определения уровня и плотности раствора в ВА

ских переменных в ВА по отношению к типовым приборам определения уровня и плотности, а реализация алгоритма их расчета (см. рисунок 13) увеличивает нагрузку на промышленный контроллер АСУ ТП ЭКАС СХК. Кроме того, в условиях плотной компоновки в горячих камерах новых радиохимических производств зачастую оказывается затрудненным монтаж капиллярных трубок в внутри аппаратов.

Для облегчения монтажа и эксплуатации, улучшения стоимостных показателей, а также надежности и быстродействия АСУ ТП ЭКАС в целом предлагается:

- для измерения двух перепадов давления создать сдвоенный дифференциальный манометр на сенсорах давления отечественного производства;
- для работы со сдвоенным дифманометром разработать вторичный преобразователь, основанный на элементах отечественного производства и собранный с дифманометром в едином корпусе;
- для обеспечения возможности монтажа в аппараты в стесненных условиях горячей камеры применить гибкий измерительный шуп.

Перечисленные решения применены при разработке устройства, укрупненная структурная схема которого приведена на рисунке 14.

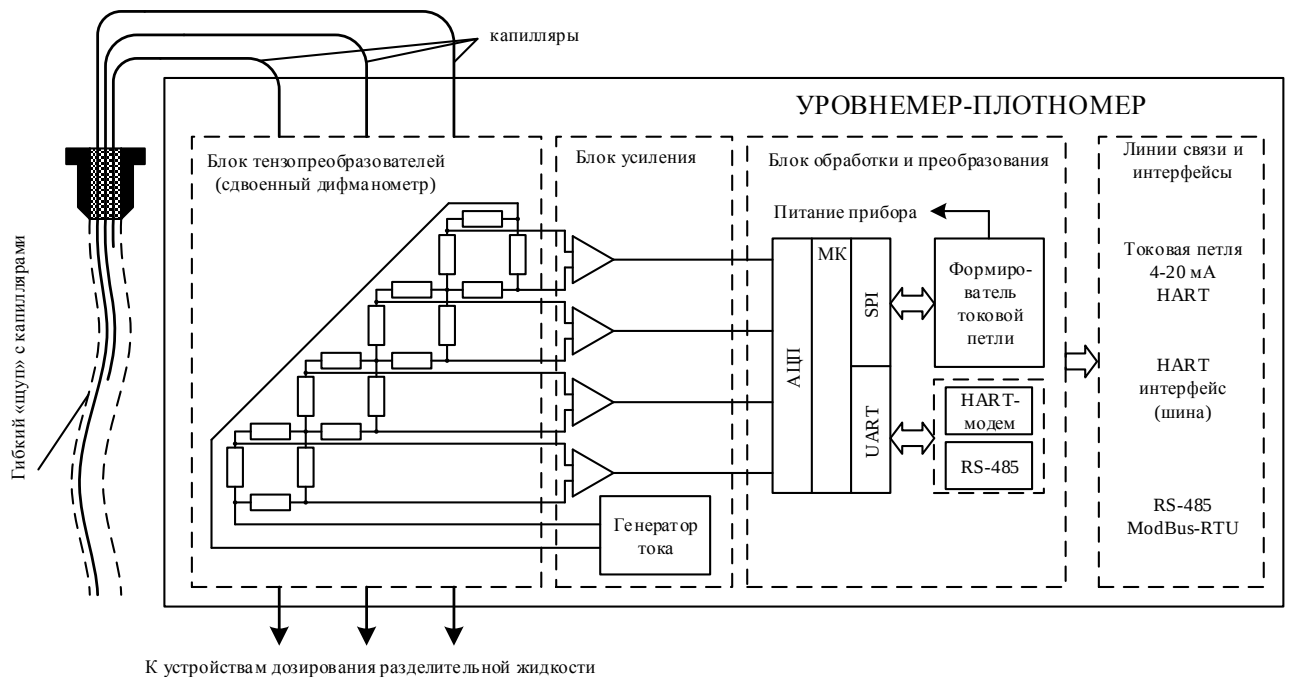


Рисунок 14 – Укрупненная структурная схема универсального уровнемера-плотнoмера

Для проверки работоспособности программных и аппаратных средств предложенного способа измерения уровня и плотности создан лабораторный стенд, структурная схема которого отличается от схемы, представленной на рисунке 13, лишь тем, что измерение уровня и плотности производится с помощью устройства, представленного на рисунке 14.

Экспериментальные исследования опытного образца прибора измерения уровня и плотности с помощью созданного лабораторного стенда выявили следующее:

- приведенная ошибка измерения перепада давления составляет не более 0,4 %;

- нелинейность шкалы измерения перепада давления составляет не более 0,4 %;

- приведенная ошибка измерения уровня и плотности жидкости составляет не более 1 %.

Достигнутые результаты позволили внедрить лабораторный стенд в образовательный процесс на кафедре ЭАФУ ТПУ, а также сделать возможным применение разработанного устройства для серийного освоения комплекса новых приборов. Оба обстоятельства подтверждены соответствующими актами ТПУ и ОАО «Манотомь».

Результаты исследований в части компьютерной модели системы контроля и управления выпарным аппаратом применены при разработке кода оптимизации и диагностики процессов замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) в рамках проекта «Прорыв» ГК «Росатом». Программное обеспечение (КОД ТП) разработано на кафедре ЭАФУ и дает возможность улучшить качество выполняемых проектов, что позволит до сооружения объекта проверить его работоспособность, как в нормальных режимах, так и во всех режимах отклонения, включая аварийные.

Программный комплекс КОД ТП содержит:

- 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 и позволяет решать задачи синтеза систем управления, исследования систем управления в динамическом режиме, производить диагностику работы технологического оборудования процессов выпаривания.

Компьютерная модель системы контроля и управления выпарным аппаратом использована в составе следующих программных модулей:

- программный модуль имитации концентрирования жидких радиоактивных отходов (ЖРО);

- программный модуль имитации экстракционно-кристаллизационного аффинажа.

На рисунке 15 представлен пример расчетной схемы процесса концентрирования ЖРО методом выпаривания.

Модель ВА для концентрирования ЖРО в программном модуле КОД ТП реализована в блоке «Выпарной аппарат концентрирования ЖРО». Блок «Подсистема управления» реализует модель системы управления ВА и содержит три

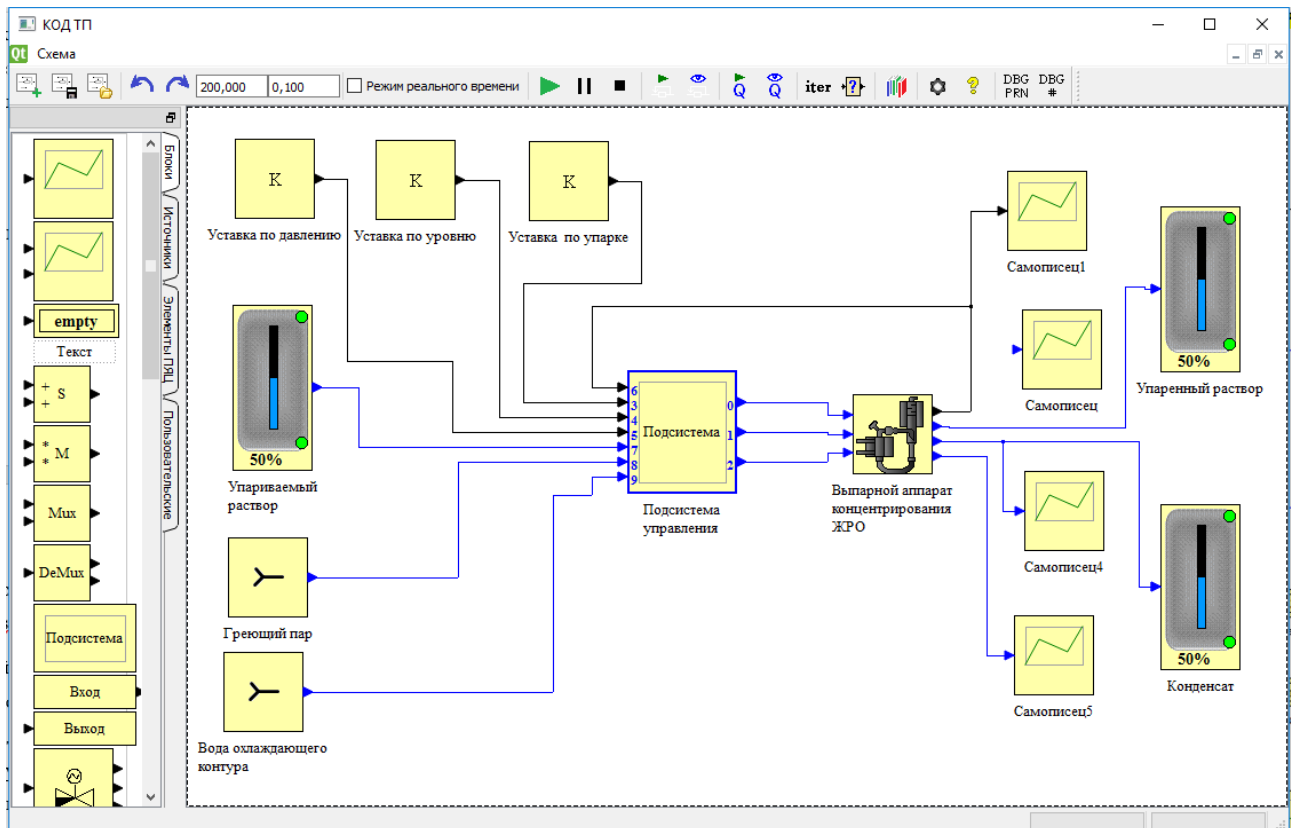


Рисунок 15 – Расчетная схема процесса концентрирования ЖРО методом упаривания в программном комплексе КОД ТП

контура стабилизации: контур стабилизации концентрации кубового раствора, контур стабилизации давления пара в аппарате, а также контур стабилизации уровня раствора в аппарате. 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.

Факт создания программного обеспечения компьютерной модели системы контроля и управления выпарным аппаратом подтвержден актом АО «ВНИИ-ИНМ», четырьмя свидетельствами о регистрации программы для ЭВМ и семью отчетами о НИР.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

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 переменных. 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.

Структурный и параметрический синтез позволил произвести экспериментальные исследования различных вариантов САУ выпарным аппаратом. Были определены основные показатели качества управления. 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 изменения 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 по возмущающему воздействию показало, что все рассмотренные системы управления выпарным аппаратом отрабатывают 10 % возмущения температуры входного раствора, а также 5 % возмущения плотности исходного раствора с приемлемыми показателями каче-

ства. 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 облегчения монтажа и эксплуатации и 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 4-мя свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ, а их внедрение – соответствующими актами ТПУ, АО «Сибирский химический комбинат», АО «ВНИИНМ», ОАО «Манотомь».

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:**

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

2. 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.

### **Статьи в изданиях, индексируемых базой данных Scopus:**

3. Kozin K.A., Eremov 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, Volume 142, Number 1.

4. 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. – P. 1441–1446.

5. 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. – P. 1435–1440.

### **Другие издания:**

6. Чурсин, Ю. А., Ефремов, Е. В., Горюнов, А. Г. Система автоматизированного управления процессом ректификации 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.

7. Ефремов, Е. В., Козин, К. А., Грачев, М. И. Математическая модель выпарного аппарата для создания системы автоматического управления выпарным оборудованием в технологиях переработки отработанного ядерного топлива [Текст] // Молодой ученый. – 2015. – № 10. – С. 223–228.

8. Ефремов, Е. В., Ливенцов, С. Н., Полосин, А. А., Локтюшин, П. П. Моделирование выпарного аппарата [Электронный ресурс] // 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.

9. Козин, К. А., Ефремов, Е. В., Грачев, М. И. Исследование различных вариантов систем автоматического управления выпарным оборудованием в технологиях переработки отработанного ядерного топлива [Электронный ресурс] // 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. 306.

10. Грачев, М. И., Ефремов, Е. В., Денисевич, А. А. Разработка функциональной схемы автоматизации процесса получения кальцитогидрата [Электронный ресурс] // 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.

11. 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.

**Документы, подтверждающие наличие исключительных прав на объекты интеллектуальной собственности:**

12. Гожимов, А. И., Горюнов, А. Г., Ефремов, Е. В., Зеленецкая, Е. П., Козин, К. А., Очоа-Бикэ, А. О., Чурсин, Ю. А. Программный модуль имитации экстракционно-кристаллизационного аффинажа КОД ТП замкнутого ядерного топливного цикла. Версия 1.0. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017611430

13. Козин, К. А., Ефремов, Е. В., Чурсин, Ю. А. Программный модуль имитации концентрирования жидких радиоактивных отходов КОД ТП замкнутого ядерного топливного цикла. Версия 1.0. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017611620

14. Гожимов, И. С., Горюнов, А. Г., Денисевич, А. А., Ефремов, Е. В., Ливенцов, С. Н., Надеждин, И. С. Дистанционный контроль и управление уровнем высокоактивных растворов. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017617525.

15. Гожимов, А. И., Ефремов, Е. В., Чурсин, Ю. А. Программный модуль сервера согласования модулей и систем кода оптимизации и диагностики технологических процессов ЗЯТЦ. Версия 1.0. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614219.

**Отчеты о НИР:**

16. 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. – Томск, 2015. – 140 с. – Исполн.: Ефремов Е. В. [и др.] (всего 16 чел.). – Инв. № 18/8437 от 14.10.2015.

17. Анализ отечественных и зарубежных источников по проблемам создания расчетных кодов. Разработка основополагающих принципов функционирования кода оптимизации и диагностики технологических процессов [Текст] : отчет о НИР (промежуточн.) : Томский политехнический университет; рук. Ливенцов С. Н. – Томск, 2014 – 51 с. – Исполн.: Ефремов Е. В. [и др.] (всего 9 чел.). – Инв. № 446/18.14 от 22.05.2014.

18. 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 (промежуточн.) : 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.