

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

На правах рукописи

Иванов Константин Александрович

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ПОТОКА
ОРГАНИЧЕСКОЙ ФАЗЫ В КАСКАДЕ ЭКСТРАКЦИОННЫХ
КОЛОНН**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Горюнов Алексей Германович

Томск – 2018 г.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	3
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	11
1 ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Обзор рынка услуг по конверсии и обогащению урана.....	11
1.2 Экстракционная технология аффинажа оксидов урана.....	13
1.3 Анализ технологического процесса переработки оксидов урана	22
1.4 Выводы к главе.....	27
2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАСКАДА ЭКСТРАКЦИОННЫХ КОЛОНН	28
2.1 Методология моделирования каскада экстракционных колонн.....	28
2.2 Имитационная модель буферной ёмкости	33
2.3 Имитационная модель экстракционной колонны	51
2.4 Имитационная модель каскада экстракционных колонн.....	55
2.5 Выводы к главе.....	61
3 СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОЙ ФАЗЫ.....	63
3.1 Предпосылки создания системы стабилизации расхода органической фазы.....	63
3.2 Система стабилизации расхода органической фазы	76
3.3 Двухконтурная адаптивная системы стабилизации расхода органической фазы.....	81
3.4 Введение второго канала управления.....	89
3.5 Сравнение систем стабилизации расхода органической фазы	94
3.6 Выводы к главе.....	99
4 ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОЙ ФАЗЫ	101
4.1 Техническая реализация системы автоматизированной стабилизации на РХЗ.....	101
4.2 Эффект от внедрения системы автоматизированной стабилизации на РХЗ.....	106
4.3 Выводы к главе.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	119
ПРИЛОЖЕНИЕ А РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ЧП DANFOSS FC200 НА СТЕНДЕ	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Б РАБОЧИЙ РЕЖИМ МОДЕЛИ КЭК.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ В СХЕМА РАБОТЫ САР УРОВНЯ ПК И ГРФ.....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Г АКТ ВНЕДРЕНИЯ НА АО «СХК»	132

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АО «СХК» – Акционерное Общество «Сибирский химический комбинат»;
АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;
БЕ – буферная ёмкость;
БС – бак сборник;
ВН – выносной центробежный насос;
ВОЗ – верхняя отстойная зона;
ВФ – водная фаза;
ГРФ – граница раздела фаз;
ДФ – дисперсная фаза;
ДУП – дистанционный указатель положения;
ЗДФ – задержка дисперсной фазы;
ИМ – исполнительный механизм;
КЭК – каскад экстракционных колонн;
МСКТП – микропроцессорная система контроля технологического процесса;
НИР – научно-исследовательская работа;
НОЗ – нижняя отстойная зона;
ННС – нечёткая нейронная сеть;
ОФ – органическая фаза;
П – пульсатор;
ПВ – промывная вода (промвода);
ПК – пульскамера;
ПКМ – показатель (индикатор) концентрации металла;
Р-1,2,3 – ресивер №1, №2, №3;
РР – реэкстракт;
РФ – рафинат;
С_и, С_к – концентрация урана и кислоты;
САУ – система автоматического управления;
СКО – среднеквадратичное отклонение;
СОЗ – средняя отстойная зона;
СП – сепаратор;

СПЛ – сплошная фаза;

ССР ОФ – система стабилизации расхода органической фазы;

ТОУ – технологический объект управления;

ТП – технологический процесс;

ТБФ – трибутилфосфат;

УН – уранилнитрат;

ЧП – частотный привод;

ШИМ – широтно-импульсный модулятор;

Э – экстракт;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

ЭК – экстракционная колонна;

ЯТЦ – ядерно-топливный цикл.

ВВЕДЕНИЕ

Невозможно переоценить вклад ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) в развитие экономики и обороноспособности страны. Развитие ЯТЦ нельзя представить без развития радиохимического производства. Поскольку радиохимия является неотъемлемой частью ЯТЦ, то научно-исследовательские работы по её совершенствованию весьма актуальны и своевременны. С другой стороны, высокие требования, предъявляемые к безопасности и качеству ведения технологических процессов, ставят новые задачи по эффективному и надёжному управлению этими процессами. Анализ аварий на ядерно-опасном производстве показал, что создание полностью безопасных установок невозможно. Поэтому соблюдение дополнительных мер безопасности (таких как контроль массообменных процессов) повышает общий уровень надёжности установки [12, 13, 2].

Руководством ГК «Росатом» в 2011 году было принято решение по концентрации конверсии производства урана на площадке АО «СХК». Объем инвестиций на создание завода, где сосредоточится вся конверсия урана России, превысит 7 миллиардов рублей. Получение высококачественного уранового сырья с минимальной себестоимостью - это те требования, которые руководство ГК «Росатом» поставило перед Сибирским химическим комбинатом [14].

В технологии производства урана наиболее эффективным методом получения высококачественных соединений является экстракционный аффинаж. Суть данной технологии заключается в процессе водно-экстракционного растворения урана и последующей очистки. Для выделения и очистки в качестве экстрагента используется раствор трибутилфосфата (ТБФ) в легком углеродном разбавителе [1,12]. Такая технология переработки урана применяется на Радиохимическом заводе (РХЗ) АО «СХК».

Начиная с 1984 года, проводятся исследования каскада экстракционных колонн в качестве объекта автоматизации. Исследования проводились сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института

неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара. Данные исследования послужили основой для создания первых систем контроля и управления технологического процесса в КЭК [15, 16]. Дальнейшими исследованиями занимались сотрудники кафедры электроники и автоматики физических установок Томского политехнического университета. Результатом их работы является разработка систем автоматизированного управления технологическими процессами КЭК [3, 10, 11, 18].

Из-за повышенных требований, предъявляемых к промышленной безопасности и качеству управления, в 2006 году на РХЗ была реализована современная МСКТП, с последующей модернизацией в 2013-2015 годах. Из особенностей МСКТП можно выделить:

- использование ИМ постоянной скорости с цифровыми средствами управления;
- управление частотой работы насосов с помощью частотного привода (ЧП).

Начиная с 2011 года, на РХЗ проводятся исследования по увеличению производственной программы в связи с концентрацией конверсии производства урана. Новые режимы работы КЭК потребовали новых исследований с дальнейшей модернизацией действующей системы автоматизированного управления.

Подводя итог вышесказанному, актуальность данной работы определяется:

- высокими требованиями к безопасности ведения технологического процесса;
- необходимостью повышения эффективности производства конечного продукта (нитрат уранила);
- необходимостью повышения производительности КЭК;
- использованием современных программно-технических средств;
- необходимостью обеспечения устойчивой работы КЭК на новых режимах.

Целью работы является стабилизация потока органической фазы средствами системы автоматизированного управления, обеспечивающей повышение

производительности и надёжности работы каскада экстракционных колонн. Данная цель достигалась решением следующих задач:

- исследование каскада экстракционных колонн как объекта управления;
- создание математической модели каскада экстракционных колонн для решения задач синтеза и анализа систем управления;
- разработка алгоритма системы стабилизации потока органической фазы в каскаде экстракционных колонн;
- внедрение предложенной системы стабилизации потока органической фазы на действующее производство;

Для решения поставленных задач в работе использовались методы:

- теории автоматического управления;
- математического и компьютерного моделирования;
- метод декомпозиции;
- теории адаптивных систем управления;
- натурные испытания на производстве.

При разработке моделей каскада экстракционных колонн, а также алгоритма функционирования АСУ, использовался программный комплекс Matlab.

Научная новизна данной работы заключается в том, что:

1. Разработана математическая модель каскада экстракционных колонн, описывающая динамику прохождения органической фазы, позволяющая синтезировать и испытывать алгоритмы управления действующими аппаратами. Модель основана на использовании нейронечёткой логики, позволившей существенно увеличить ее точность в условиях ограниченного количества экспериментальных данных в сравнении с традиционными методами (полиномиальными, сплайн и т.д.);

2. Разработан алгоритм управления системы стабилизации потока органической фазы в каскаде экстракционных колонн, отличающийся одновременным управлением частотами вращения валов двигателей насосов и напором, что позволило повысить производительность и надёжность работы каскада экстракционных колонн.

3. Разработан алгоритм, отличающийся применением нейронечеткой логики в математической модели каналов управления для решения задачи адаптации системы стабилизации потока органической фазы в каскаде экстракционных колонн, что позволило повысить производительность и надёжность работы каскада экстракционных колонн.

Практическая значимость работы заключается в том, что основная часть полученных результатов исследований внедрена на производстве, что подтверждено актом внедрения результатов диссертационных исследований, представленном в приложении Г. Разработанные алгоритмы, вошедшие в состав САУ экстракционного каскада, приняты в промышленную эксплуатацию приказом по РХЗ от 19.05.2014, что подтверждается актом внедрения, представленном в приложении Г. Внедрение модернизированной САУ стабилизации ОФ на РХЗ позволило повысить качество управления каскадом экстракционных колонн, сократить количество внеплановых остановок технологического оборудования, а также увеличить межремонтные сроки насосного оборудования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель каскада экстракционных колонн, описывающая динамику прохождения органической фазы и позволяющая синтезировать и испытать алгоритмы управления действующими аппаратами. Главным отличием модели от существующих является использование нейронечёткой логики, позволившей существенно увеличить точность модели в условиях ограниченного количества экспериментальных данных в сравнении с другими методами (полиномиальными, сплайн и т.д.).

2. Алгоритм управления системы стабилизации потока органической фазы в каскаде экстракционных колонн, отличающийся одновременным управлением частотами вращения вала двигателей насосов и напором, что обеспечивает существенное демпфирование расхода органической фазы в каскаде экстракционных колонн. Данный алгоритм универсален и может использоваться в задачах двухканального управления.

3. Алгоритм адаптации системы стабилизации потока органической фазы в каскаде экстракционных колонн с применением нейронечеткой логики, позволяющий существенно снизить низкочастотные колебания расхода потока органической фазы, а также повысить производительность и надёжность работы каскада экстракционных колонн.

Проверка на адекватность подтверждается ошибкой аппроксимации экспериментальных зависимостей, которая не превышает 0,5%, а также успешными испытаниями разработанных алгоритмов в условиях действующего производства.

Основные положения и результаты диссертационных исследований были представлены в докладах на следующих конференциях:

- Школа-конференция молодых атомщиков Сибири, г. Томск, 5-6 октября 2011.
- Международная заочная научно-практическая конференция, г. Тамбов, 31 мая 2012.
- Российская научно-практическая конференция, г. Железногорск, 24–25 октября 2012.
- Всероссийская научно-практическая конференция, приуроченная к 105-летию со дня рождения Б.В. Громова, г. Томск, 1 – 3 октября 2014.
- VI Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности», г. Томск, июнь 2014.
- Российская научно-практическая конференция, г. Железногорск, октября 2015.

По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе: 4 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК; 1 статья в зарубежном издании; 8 тезисов докладов на Российских и Международных конференциях.

В первой главе диссертационной работы раскрывается тема объекта исследования. Проводится анализ состояния отрасли, обзревается технология

производства оксидов урана, используемая на РХЗ. Завершается глава анализом технологического процесса переработки оксидов урана.

Вторая глава посвящена математическому моделированию каскада экстракционных колонн. Выбирается методология моделирования. Оговариваются допущения, принятые в модели. Далее аппроксимируются экспериментальные данные, полученные на действующем оборудовании. Используя современный подход с применением нейронных сетей с нечёткой логикой, была получена адекватная имитационная модель каскада экстракционных колонн. Глава завершается проверкой адекватности полученной модели КЭК.

В третьей главе описывается процесс синтеза автоматизированной системы стабилизации расхода органической фазы (ССР ОФ). Рассматриваются предпосылки создания такой системы: эволюция АСУ ТП на РХЗ и опыт предыдущих исследователей. Используя модель каскада экстракционных колонн, разрабатывается и исследуется двухконтурная двухканальная система автоматизированной стабилизации расхода органической фазы. В конечном итоге сравниваются вновь созданная автоматизированная ССР ОФ и действующая на РХЗ автоматизированная система. Глава завершается анализом полученных результатов.

Четвертая глава имеет практическую направленность: в ней описан процесс внедрения полученных результатов на РХЗ. Начинается глава с описания технической базы для реализации ССР ОФ. Рассматриваются этапы внедрения системы в технологический процесс. Завершается глава расчётом экономического эффекта от внедрения ССР ОФ.

В заключении диссертационной работы приведены основные выводы по результатам проделанной работы.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Объект исследования

В первой главе раскрывается тема объекта исследования. Проводится анализ состояния отрасли, исследуются технологии, применяемые на РХЗ. Дается обзор технологии производства оксидов урана. Проводится структурный анализ установки по переработке оксидов урана. Результатом анализа является определение связи потока ОФ с основными показателями качества протекания технологического процесса.

1.1 Обзор рынка услуг по конверсии и обогащению урана

На сегодняшний день ядерная энергетика вырабатывает около 20% мировой электроэнергии. Основным энергоносителем ядерной энергетики является уран. Урановая промышленность охватывает все стадии производства урана от разведки месторождений до получения тепловыделяющих сборок (ТВС) [19, 20].

Обогащение урана является одним из основных этапов начальной стадии ядерного топливного цикла (ЯТЦ). Продукты, предлагаемые на рынке услуг по конверсии и обогащению урана: обогащенный урановый продукт и услуга по обогащению урана, измеряемая в единицах работ разделения (ЕРР). В 2013 году ёмкость мирового рынка услуг по обогащению урана составила ~ 51 млн. ЕРР. К 2020 году потребность в услугах по обогащению урана может увеличиться до 57 млн. ЕРР, к 2030 году – до 86 млн. ЕРР [23].

Основными игроками по обогащению урана на мировом рынке являются:

- ГК «Росатом» (Россия);
- URENCO (Великобритания, Германия, Нидерланды);
- AREVA (Франция);
- USEC (США).

Данные компании совместно контролируют около 85 % рынка. Однако, в последнее время позиции USEC существенно ослабились. Нарастает

конкурентное давление со стороны китайского поставщика услуг по обогащению урана – компании CNEIC. В 2013 году ГК «Росатом» обеспечила почти половину потребностей в услугах по обогащению урана, имея значительную долю на всех основных географических сегментах этого рынка (48%). Основным конкурентом ГК «Росатом» на рынке обогащения урана является URENCO [23].

Основным источником сырья для ЯТЦ России в настоящее время являются большие складские запасы различной оборонной продукции. Однако к 2020 году значительная часть будет исчерпана, а доля производства природного урана в общем балансе не превышает 20%. С учетом особенностей закупки урана на мировом рынке и вводом санкций, единственным источником, способным покрыть возможный дефицит, является природный уран, добываемый на собственных рудниках. В современных реалиях устойчивые позиции на мировом рынке производства ядерного топлива может занимать та компания, которая обеспечена сырьевой базой на долгосрочную перспективу. Корпорация «ТВЭЛ» — единственная компания в России, которая занимается производством ядерного топлива и его компонентов и при этом обладает собственной сырьевой базой [22].

В настоящее время в ядре корпорации «ТВЭЛ» действует четыре обогатительных комбината: АО «Ангарский электролизный химический комбинат» (г. Ангарск, Иркутская область), АО «ПО «Электрохимический завод» (г. Зеленогорск, Красноярский край), АО «Уральский электрохимический комбинат» (г. Новоуральск, Свердловская область), АО «Сибирский химический комбинат» (г. Северск, Томская область) [24]. И, как отмечалось выше, руководством ГК «Росатом» в 2011 году было принято решение о концентрации конверсионного производства урана на площадке АО «СХК» [14].

1.2 Экстракционная технология аффинажа оксидов урана

В современном ЯТЦ существуют различные способы получения оксидов урана из природного урана или отработанного топлива. Однако на Радиохимическом заводе АО «СХК» используется технология экстракционного аффинажа. Суть технологии заключается в процессе водно-экстракционного растворения урана и последующей очистки [12].

Установка экстракционной очистки урана включает: 4 экстракционные тарельчатые пульсационные колонны (ЭК-1,2,3,4); 3 буферные ёмкости (БЕ-1,2,3); бак сборник (БС); 4 ресивера сжатого воздуха (Р-1,2,3,4); 4 выносных центробежных насоса (ВН-1,2,3,4). Технологическая схема каскада экстракционных колонн представлена на рисунке 1, а в таблице 1 – параметры основных потоков экстракционного каскада [25].

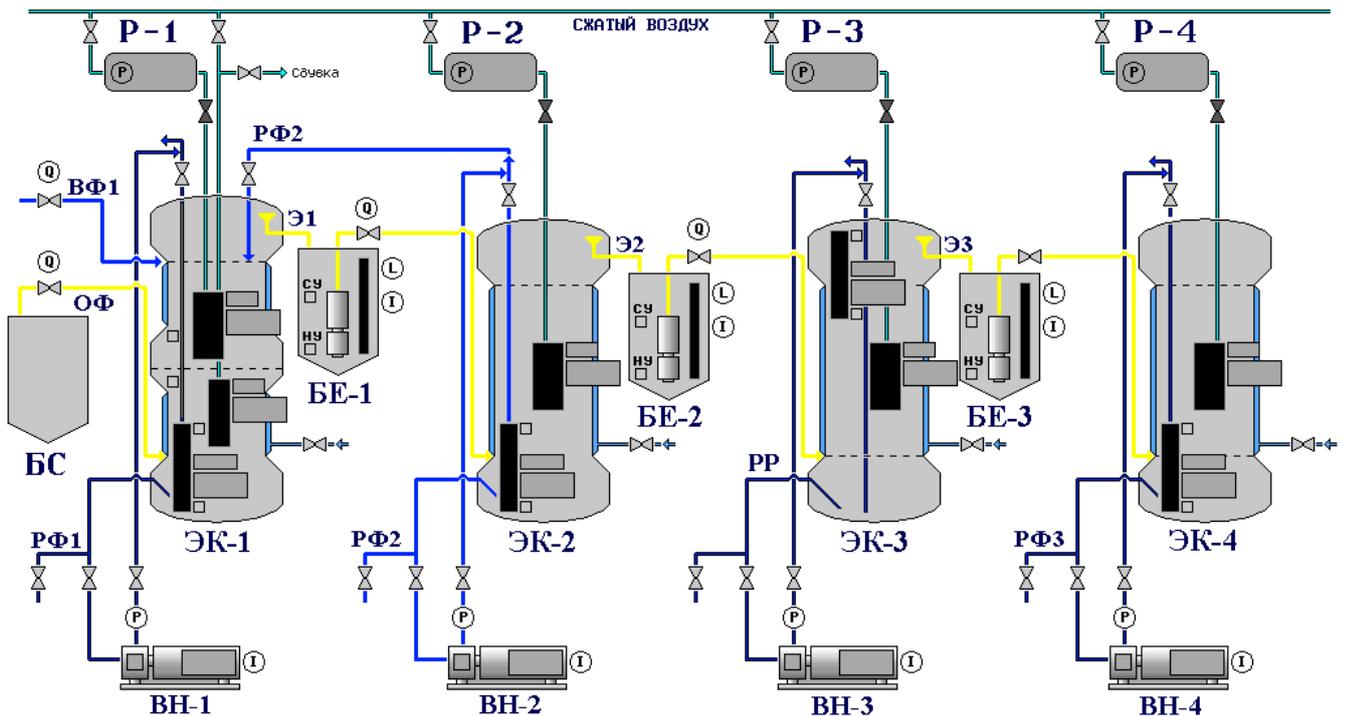


Рисунок 1 Технологическая схема каскада экстракционных колонн

Таблица 1 Материальные потоки экстракционного каскада

Обозначение потока	Название потока	Фаза	Примечание
1	2	3	4
ОФ	Оборотный экстрагент	ОФ	Управление
ВФ1	Азотнокислый раствор урана	ВФ	Управление
РФ1	Рафинат исходного раствора	ВФ	Возмущение
Э1	Экстрагент, насыщенный ураном	ОФ	Управление
РФ2	Азотнокислый раствор от промывки насыщенного экстракта	ВФ	Возмущение
ПР1	Азотнокислый промывной раствор	ВФ	Возмущение
Э2	Экстракт, отмытый от примесей	ОФ	Управление
ПР2	Конденсат сокового пара	ВФ	Возмущение
РР	Резэкстракт урана	ВФ	Возмущение
ПР3	Раствор соды	ВФ	Возмущение
Э3	Экстракт, после резэкстракции	ОФ	Управление
РФ3	Раствор после промывки органики	ВФ	Возмущение

1.2.1 Теоретические основы жидкостной экстракционной переработки

Экстракционная переработка растворов основана на свойствах некоторых органических веществ (экстрагентов), которые не смешиваются с водой и могут селективно извлекать ценные составляющие (уран (U)). При контакте водных и органических растворов U, примеси, продукты деления, которые находятся в растворах в разнообразной форме (соли, кислоты, катион, анион), распределяются между водной и органической фазами в зависимости от целого ряда условий проведения процесса экстракции. Эти условия можно подобрать таким образом, чтобы количественно извлечь уран, оставив примеси и продукты деления в водной фазе.

Процесс экстракционной переработки на урановом цикле состоит из следующих технологических операций: растворение оксидов урана, экстракция, сепарация, промывка, резэкстракция, регенерация экстрагента. Для лучшего понимания технологического объекта управления рассмотрим ключевые этапы более подробно.

1.2.2 Экстракция

Экстракция из азотнокислых растворов описывается следующими уравнениями:



Константа равновесия (K) данных реакций характеризуется выражением:

$$K = \frac{K_p}{[\text{HNO}_3]^2 \cdot [\text{ТБФ}]^2}, \text{ откуда} \quad (3)$$

$$K_p = K \cdot [\text{NO}_3^-]^2 \cdot [\text{ТБФ}]^2, \text{ где} \quad (4)$$

K_p – коэффициент распределения урана;

$[\text{NO}_3^-]$ – концентрация нитрат-иона в растворе;

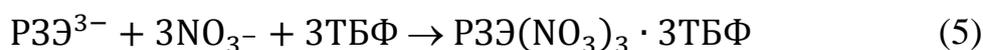
$[\text{ТБФ}]$ – концентрация свободного ТБФ.

Из приведенного выражения видно, что извлечение урана в органическую фазу можно регулировать, меняя концентрацию нитрат-иона ($[\text{NO}_3^-]$) в растворе и концентрацию свободного ТБФ. Кроме указанных факторов, на извлечение урана и степень его очистки от продуктов деления и примесей оказывают влияние: концентрация ТБФ в разбавителе, температура проведения процесса экстракции, наличие комплексообразователей, режим работы экстрактора (интенсивность пульсации, наличие эмульсии). Присутствие в водном растворе азотной кислоты оказывает значительное влияние на экстракцию нитратов урана. Азотная кислота служит поставщиком нитрат-ионов, благодаря чему является высаливателем для нитратов урана. При недостатке кислоты в исходном растворе в рафинат уходит значительное количество урана (до 35 г/л). В то же время азотная кислота сама хорошо экстрагируется, связывая свободный экстрагент. Наиболее заметно это проявляется при концентрации ее в водном растворе более 6 моль/л. ТБФ дает с экстрагируемыми соединениями относительно прочные соединения, что приводит к конкуренции между ними за свободный экстрагент и, как следует из этого, к вытеснению одних соединений другими. Особенно сильной вытесняющей

способностью обладает уранил-нитрат ($\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$), который уже при умеренной концентрации его в растворе способен вытеснять азотную кислоту, примеси и продукты деления из органической фазы.

С целью получения необходимой очистки от продуктов деления экстракция проводится при максимальном насыщении экстрагента (90-95 % его ёмкости).

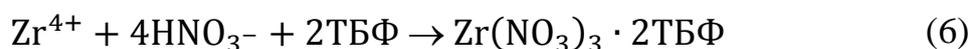
Экстракция урана резко ухудшается при наличии в растворе примесей анионов, например, сульфат-иона (SO_4^{2-}), фосфат-иона (PO_4^{3-}), фтор-иона (F^-), оксалат-иона ($\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$). Учитывая, что концентрация этих примесей очень мала, с комплексообразующим их влиянием можно не считаться. Редкоземельные элементы (РЗЭ) экстрагируются ТБФ по реакции:



Коэффициенты распределения этих веществ низкие. Цезий и стронций практически не экстрагируются ТБФ.

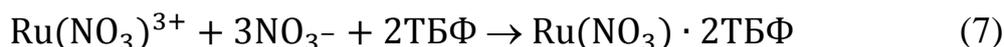
При экстракции наиболее трудно отделяются от урана цирконий (Zr) и рутений (Ru).

Цирконий экстрагируется по уравнению:



Ниобий при очень низких концентрациях ($5 \cdot 10^{-6}$ моль/л) присутствует в растворах в полимеризованном виде и в виде нитратных и гидроксонитратных комплексов. Поведение ниобия сходно с поведением циркония, и они рассматриваются вместе.

Рутений в азотнокислых растворах присутствует в виде комплексов нитрозил рутения с нитрит-ионами. Часть этих комплексов экстрагируется по реакции:



Другая часть не экстрагируется или плохо экстрагируется. Коэффициенты распределения циркония и ниобия увеличиваются с увеличением кислотности водной фазы.

Коэффициент распределения рутения уменьшается с увеличением концентрации HNO_3 в водной фазе. Оптимальная кислотность исходного раствора $\cong 1$ моль/л.

В растворах, содержащих азотную кислоту и восстановитель, всегда образуется какое-то количество азотистой кислоты (HNO_2), которая относительно хорошо экстрагируется ТБФ. Уран(IV) окисляется ею в органической и водной фазах до урана(VI). С целью предохранения урана(IV) от окисления азотистой кислотой, в растворы добавляются вещества, которые реагируют с азотистой кислотой быстрее, чем с ураном(IV). К таким веществам относится гидразингидрат. Его достоинства: небольшой расход, высокая скорость взаимодействия с азотистой кислотой и низкая скорость взаимодействия с азотной кислотой. Недостаток: малый коэффициент распределения между органической и водной фазами. Продукты разложения с HNO_2 : N_2 , NH_3 , HN_3 .

При длительной работе колонны в процессе экстракции на поверхности раздела фаз возможно накопление межфазных образований, несущих на себе значительную γ -активность. С целью исключения загрязнения экстракта урана этими межфазными образованиями (или осадками), используется одно из важных преимуществ колонных экстракторов, обеспечивающего непрерывное удаление осадков с ГРФ вместе с рафинатом.

1.2.3 Реэкстракция

Реэкстракция из экстракта проводится водой, подкисленной азотной кислотой до 1-3 г/л при температуре $(50 \div 70)^\circ\text{C}$. Подкисление воды производится для предотвращения гидролиза и улучшения расслаивания фаз в реэкстракционной колонне. Увеличение концентрации азотной кислоты в реэкстракте выше указанной понижает эффективность процесса реэкстракции.

Реэкстракция протекает по реакции:



Разложение сольвата урана – процесс эндотермический. Повышение температуры процесса улучшает условия массопередачи, понижает вязкость

растворов и увеличивает скорость диффузии, что способствует более полному протеканию процесса реэкстракции.

Водная фаза, выходящая из колонны реэкстракции, представляет собой раствор уранилнитрата с концентрацией (110÷140) г/л. Полученный раствор направляется на концентрирование и дальнейшую переработку. Органическая фаза подвергается операции регенерации.

1.2.4 Принцип работы колонны

На установке «М-1345» используются пульсационные аппараты колонного типа (экстракционные колонны – ЭК-1,2,3,4), рисунок 2. Экстракционная колонна состоит из реакционной зоны и вспомогательных частей. Реакционная зона состоит из цилиндрического корпуса с расположенными внутри насадками «КРИМЗ» и специальной камеры (пульскамера). Пульсационная камера соединена через пульсопровод с источником передачи импульса пульсации в колонну – пульсатором.

Процесс массообмена в колонне интенсифицируется подводом дополнительной энергии за счет пульсации сжатым воздухом, в результате чего происходит возвратно-поступательное движение контактирующих фаз. Энергия возвратно-поступательного движения характеризуется интенсивностью:

$$J = \Psi \cdot A \text{ где:} \quad (9)$$

Ψ – частота колебаний в минуту, $\text{мм} \cdot \text{мин}^{-1}$

A – размах колебаний в мм (расстояние между верхним и нижним положением границы раздела фаз в колонне при пульсации).

Благодаря пульсации можно получить капли различного размера. В экстракционной колонне органическая фаза является сплошной, водная – дисперсной, распределяющаяся в колонне в виде капель. Оптимальный размер капель дисперсной фазы (0,8÷1,2) мм. Пульсация жидкости в колонне дополнительно дробит капли дисперсной фазы, увеличивая площадь межфазного взаимодействия, тем самым улучшая процесс экстракции.

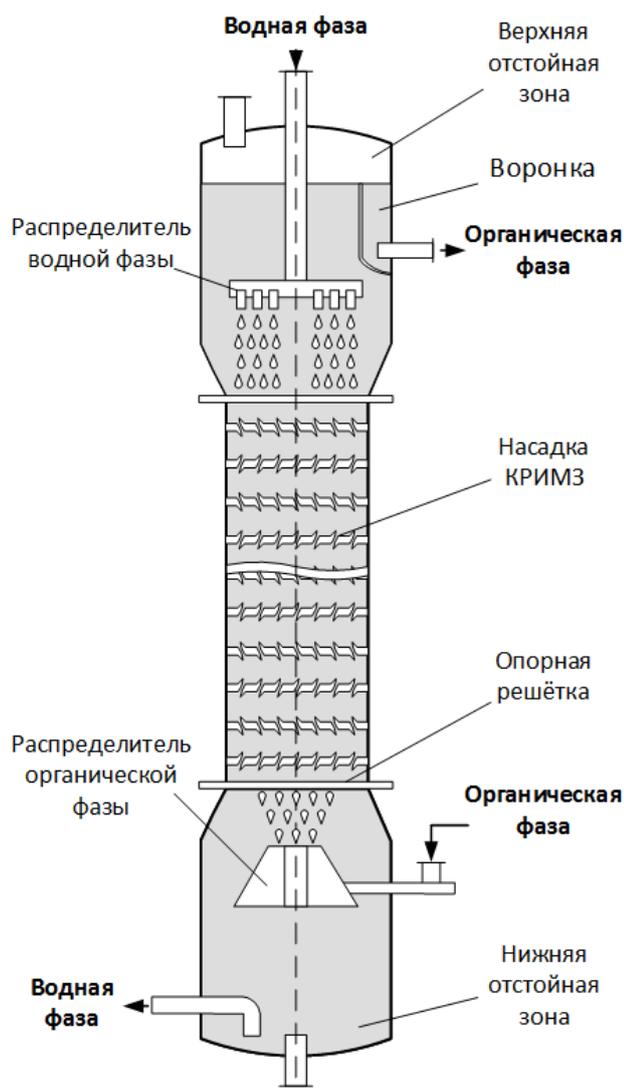


Рисунок 2 Упрощенная схема ЭК

Органическая фаза вводится в колонну в нижнюю часть, а водная фаза – в верхнюю. Противоточное движение двух фаз в колонне осуществляется за счет разности их плотностей.

Удерживающая способность колонны, или задержка, характеризуется количеством дисперсной фазы, находящейся в насадочной части колонны при данном режиме работы. Эта величина выражается в объемных процентах. Задержка вместе с размером капли определяет поверхность массообмена, а ее излишнее увеличение приводит к захлебыванию колонны. Захлебывание колонны наступает в тот момент, когда какой-либо её участок полностью заполняется дисперсной фазой.

Причиной захлебывания может быть:

- рост нагрузки по дисперсной фазе;
- увеличение нагрузки по сплошной фазе;
- увеличение нагрузки по обеим фазам;
- увеличение интенсивности пульсации;
- малая разность плотности дисперсной и сплошной фаз.

С ростом нагрузки по дисперсной фазе увеличивается задержка в колонне, в результате уменьшается количество сплошной фазы, и, следовательно, возрастает ее скорость, препятствующая противоточному движению дисперсной фазы, что в свою очередь ведет также к увеличению задержки.

Величина нагрузки захлебывания (предельная производительность) в колонне растет с уменьшением интенсивности пульсации. Эффективность процесса, т.е. полнота извлечения из водной фазы, будет максимальной при оптимальной интенсивности пульсации и будет уменьшаться при отклонениях от оптимальной величины.

Рабочая нагрузка на колонну (сумма расходов водной и органической фаз) не должна превышать (80÷85) % от нагрузки захлебывания.

Пройдя насадочную часть колонны, органическая фаза отстаивается в верхней отстойной зоне.

Из нижней части отстойной зоны водная фаза передается пульс-насосами в сборники водно-хвостовых растворов или реэкстракта.

Органическая фаза, двигаясь снизу-вверх, перетекает самотеком в соответствующую буферную ёмкость, а из нее погружным насосом в следующую колонну.

Граница раздела фаз устанавливается с расчетом вывода «медузы» с тем продуктом, загрязнение которого не влияет на качество конечного продукта. «Медуза» является продуктом деструкции органики и концентрирует в себе различные примеси, не позволяя им уходить из колонны с водными потоками.

В колоннах экстракции и промывки экстракта ГРФ поддерживается в нижней отстойной зоне, “медуза” частично уходит с водно-хвостовыми растворами.

В колонне реэкстракции ГРФ поддерживается в верхней отстойной зоне, и “медуза” попадает с органической фазой в следующую колонну регенерации органики.

В колонне промывки экстракционной смеси ГРФ может устанавливаться в верхней или нижней отстойной зоне. При поддержании ГРФ в нижней отстойной зоне повышается унос органической фазы и, соответственно, ее потери. При верхнем расположении ГРФ несколько хуже отмывка экстрагента.

1.3 Анализ технологического процесса переработки оксидов урана

Для составления структурной схемы объекта управления воспользуемся технологической схемой, рисунок 1, и таблицей материальных потоков, таблица 1. Так как объект состоит из набора однотипных аппаратов и его состояние описывается большим количеством переменных, то вначале проведём декомпозицию и рассмотрим каждый элемент отдельно.

Основными типовыми элементами объекта управления являются: колонны (ЭК-1,2,3), буферные ёмкости (БЕ-1,2,3) и бак сборник (БС). Ресиверы (Р-1,2,3,4) и выносные центробежные насосы (ВН-1,2,3,4) можно включить в состав ЭК, т.к. они служат дополнительными элементами для расширения динамических свойств колонн и отдельно не используются.

Структура взаимосвязи технологических параметров колонны приведена на примере головной колонны ЭК-1, рисунок 3. Здесь: $Q_{ВФ1}$ – расход азотнокислого раствора, поступающего на переработку в колонну; $C_{иВФ1}$ – концентрация урана в азотнокислом растворе поступающего, на переработку в колонну; $Q_{РФ2}$ – расход азотнокислого раствора после промывки в ЭК-2; $C_{иРФ2}$ – концентрация урана в азотнокислом растворе после промывки в ЭК-2; $Q_{ОФ}$ – расход органической фазы, поступающей для экстракции в колонну; $Q_{Э1}$ – расход экстрагента на выходе колонны; $C_{иЭ1}$ – концентрация урана, унесённого экстрагентом, один из основных параметров качества экстракции; $Q_{РФ1}$ – расход рафината после экстракции в ЭК-1; $C_{иРФ1}$ – концентрация урана в рафинате после экстракции в ЭК-1, один из основных параметров качества экстракции. Экстрагент выводится из колонны самотеком через сливную воронку, поэтому его расход будет зависеть от уровня в верхней отстойной зоне $L_{ВОЗ}$. Расходы $Q_{ВФ1}$, $Q_{РФ2}$, и $Q_{ОФ}$ непосредственно влияют на $L_{ВОЗ}$, а расход рафината $Q_{РФ1}$ – через уровень ГРФ в колонне $L_{ГРФ}$. При этом колебания $L_{ГРФ}$ вызывают изменения расхода $Q_{РФ1}$. На $L_{ВОЗ}$ будет влиять также и изменение уровня в пульс-камере колонны, однако исследования показали, что это влияние невелико и им можно пренебречь. Расходы $Q_{ВФ1}$, $Q_{РФ2}$, и $Q_{ОФ}$ для колонны являются входными, их использование для стабилизации расхода $Q_{Э1}$

невозможно по условиям ведения технологического процесса, поэтому для установки в целом они являются возмущающими воздействиями. Расход $Q_{\text{рф1}}$ является выходным и не оказывает влияния на $Q_{\text{э1}}$. Поскольку каждое из возмущений влияет на $L_{\text{воз}}$ по-своему, то для уменьшения количества рассматриваемых возмущающих воздействий целесообразно ввести эквивалентное возмущение, действие которого приводит к изменению расхода $Q_{\text{э1}}$. Этим возмущением является изменение уровня в ВОЗ ΔL , которое и приводит к изменению расхода ОФ на выходе колонны относительно стационарного значения. Так же это удобно еще и тем, что уровень ВОЗ колонны является измеряемой величиной, поведение которой во времени описано ниже.

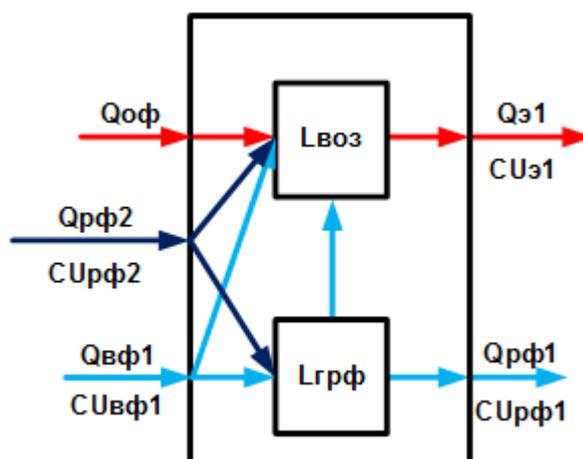


Рисунок 3 Структура взаимосвязи технологических параметров в ЭК

Следствием из вышесказанного является то, что колонна является основным источником возмущений для потока ОФ, поэтому для решения задачи стабилизации этого потока используется буферная ёмкость.

Структура взаимосвязи технологических параметров буферной ёмкости приведена на рисунке 4, на примере БЕ-1. Здесь $Q_{\text{э1}}$ – расход ОФ на входе ёмкости; $Q_{\text{э'1}}$ – расход ОФ на выходе ёмкости; $L_{\text{БЕ}}$ – уровень органической фазы в ёмкости; $\mu_{\text{БЕ1}}$ – ход регулирующего органа (вентиля), влияющего на напор погружного насоса; $N_{\text{БЕ1}}$ – частота вращения вала погружного насоса. Управляющими переменными здесь являются $\mu_{\text{БЕ1}}$ и $N_{\text{БЕ1}}$, возмущением – расход $Q_{\text{э1}}$, зависящий от $L_{\text{ВОЗ}}$. Конкретное значение уровня $L_{\text{БЕ}}$ не важно, необходимо

лишь не допускать его выхода за верхнюю и нижнюю границы, чтобы не опорожнить и не переполнить ёмкость.

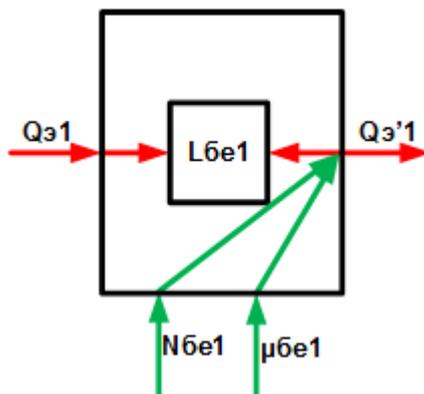


Рисунок 4 Структура взаимосвязи технологических параметров в БЕ

Структура взаимосвязи технологических параметров бака сборника приведена на рисунке 5. Здесь $Q_{вэ}$ – расход возвратного экстрагента, $Q_{оф}$ – расход ОФ, $L_{бс}$ – уровень в БС. Расходом $Q_{оф}$ задается производительность всего каскада, поэтому он является управляющим воздействием. $Q_{вэ}$ является возмущающим воздействием, приводящим к изменению уровня $L_{бс}$. Однако изменение уровня в БС практически не влияет на расход ОФ, поэтому этим возмущением можно пренебречь. В то же время, изменение уровня в баке может служить критерием качества работы синтезируемой системы стабилизации.

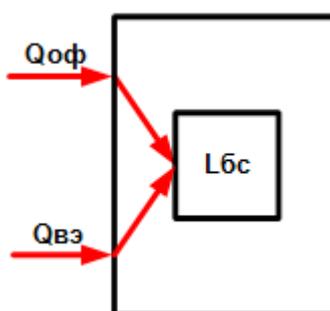


Рисунок 5 Структура взаимосвязи технологических параметров в БС

Обобщённая схема информационных потоков установки по переработке оксидов урана в целом, как объект управления, приведена на рисунке 6.

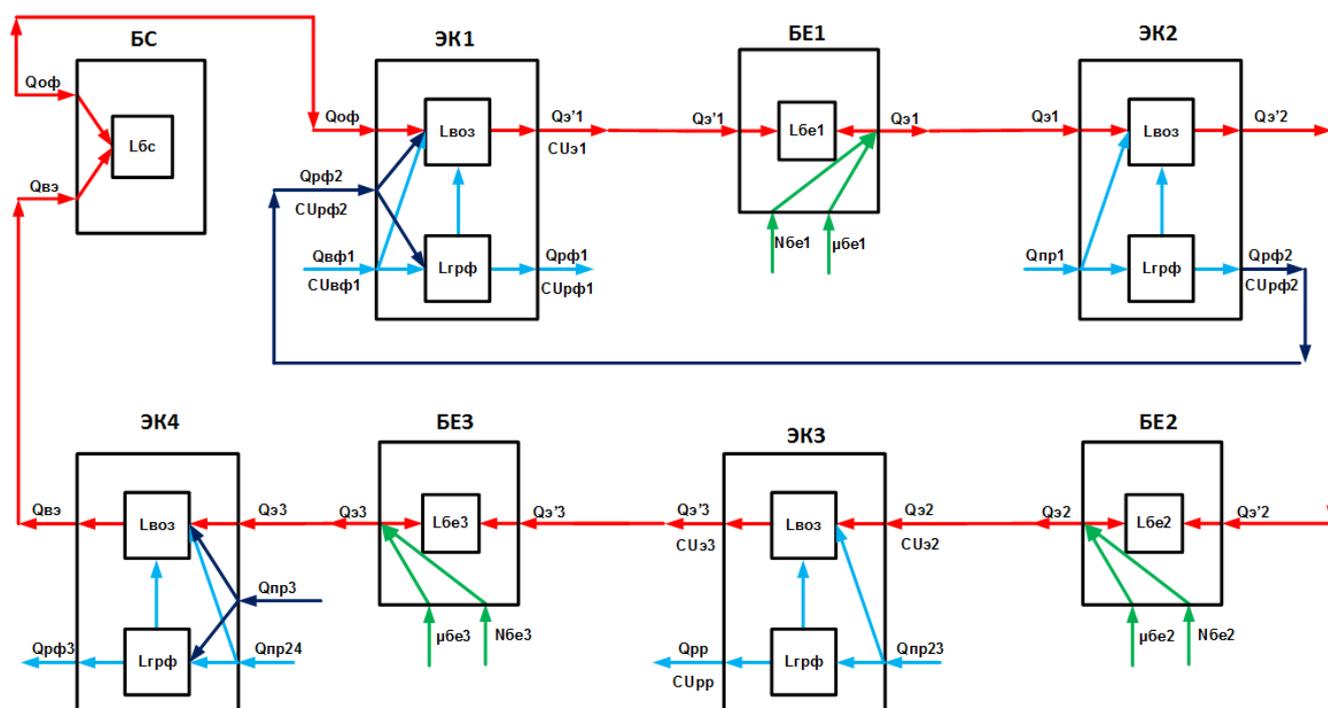


Рисунок 6 Структура взаимосвязи технологических параметров КЭЖ

В ходе анализа процессов, протекающих в объекте управления, было выявлено, что основная цель технологического процесса – это извлечение урана из азотнокислых растворов. Основными управляемыми переменными, характеризующими технологический процесс количественно, являются концентрация урана в реэкстракте и рафинате. Концентрация урана в реэкстракте характеризует количество извлеченного урана, а концентрация в рафинате – остаток. Технологическими параметрами, описывающими динамику системы, являются: во-первых, расходы поступающих в систему реагентов, которые вступают во взаимодействие с экстрагентом, а также непосредственно расход самого экстрагента; во-вторых, текущие значения уровней в аппаратах. Основные переменные процесса экстракции представлены в таблице 2.

Таблица 2 Основные переменные установки по переработке оксидов урана

Параметр	Наименование параметра	Примечание
$Q_{рф1}$	Расход рафината исходного раствора	Стабилизируются локальным регулятором
$Q_{рф2}$	Расход азотнокислого раствора от промывки насыщенного экстракта	Стабилизируются локальным регулятором
$Q_{рф3}$	Расход раствора после	Стабилизируются

Параметр	Наименование параметра	Примечание
	промывки органики	локальным регулятором
Q_{pp}	Расход реэкстракта урана	
$Q_{вф1}$	Расход азотнокислого раствора урана	Стабилизируются локальным регулятором
$Q_{np1}, Q_{np23}, Q_{np24}, Q_{np3}$	Расход промывного раствора	
$Q_{оф}$	Расход органической фазы	Задаётся исходя из режима работы
$Q_{э'1}, Q_{э'2}, Q_{э'3}$	Расход экстрагента после ЭК-1,2,3	Зависит от $L_{в03}$
$Q_{э1}, Q_{э2}, Q_{э3}$	Расход экстрагента после БЕ-1,2,3	
$С_{и_{вф1}}, С_{и_{рф1}}, С_{и_{рф2}}, С_{и_{э1}}, С_{и_{э3}}, С_{и_{pp}}$	Концентрация урана в продуктах ВФ, РФ1, РФ2, Э1, Э3 и РР	Основные показатели качества
$L_{в031}, L_{в032}, L_{в033}, L_{в034}$	Уровень в верхней отстойной зоне	
$L_{грф1}, L_{грф2}, L_{грф3}, L_{грф4}$	Уровень границы раздела фаз	Стабилизируются локальным регулятором
$L_{бе1}, L_{бе2}, L_{бе3}, L_{бс}$	Уровень в буферной ёмкости	Стабилизируются локальным регулятором
$\mu_{бе1}, \mu_{бе2}, \mu_{бе3}$	Степень открытия регулирующего вентиля	
$N_{бе1}, N_{бе2}, N_{бе3}$	Частота оборотов двигателя насоса	

1.4 Выводы к главе

Экстракционная установка по очистке урана является уникальной установкой по переработке природного и регенерированного урана. Уникальность определена [12, 15, 16, 18, 25, 26, 27]:

- использованием пульсационных колонн, отличающихся от аналогов гидродинамическими и геометрическими характеристиками;
- наличием замкнутой связи по органической фазе между промывной и экстракционной колоннами;
- использованием погружных центробежных насосов для перекачивания органической фазы из одной колонны в другую.

Результаты анализа технологического процесса показали, что основная цель процесса – это извлечение урана из азотнокислых растворов. Следовательно, основными управляемыми переменными, характеризующими процесс экстракции количественно, являются концентрация урана в экстракте и рафинате. Концентрация урана в экстракте характеризует количество извлеченного урана, а концентрация в рафинате качество экстракции.

Одним из базовых технологических параметров является поток ОФ по всему каскаду колонн, см. таблицу 2. Наибольшее влияние на поток ОФ оказывают процессы, протекающие в экстракционной и реэкстракционной колоннах (ЭК-1,3). Для экстракционной колонны значение концентрации урана в экстракте и рафинате являются основными параметрами, определяющими режим работы колонны. Для реэкстракционной колонны – это концентрации урана в экстрагенте и реэкстракте [3, 4, 5]. Невыполнение технологического регламента по главным показателям процесса приводит к дополнительным затратам на повторную переработку экстракта и рафината. Исходя из вышесказанного, существует прямая зависимость между потоком ОФ в КЭК и качеством технологического процесса.

Создавая современную автоматизированную систему стабилизации потока ОФ с эффективными алгоритмами управления, можно создать предпосылки для повышения производительности КЭК.

2 Математическая модель каскада экстракционных колонн

Глава посвящена процессу моделирования. Она начинается с выбора типа модели исходя из предпосылок, сформулированных в главе 1. После выбора типа модели уточняются ограничения и допущения, принятые при её создании. Далее рассматриваются этапы создания имитационной модели КЭК: создание модели БЕ, создание модели ЭК и, как завершающий этап, создание обобщённой модели КЭК. Каждая созданная модель проверяется на адекватность. Имитационные модели реализованы в виде компьютерных моделей – пользовательских библиотек программного пакета Matlab. Результатом данной главы является создание адекватной имитационной модели КЭК для дальнейших исследований.

2.1 Методология моделирования каскада экстракционных колонн

Математическая модель является удобным инструментом, применяемым при автоматизации технологического процесса, который позволяет обойтись без прямого воздействия на реальный объект исследования [30]. А некоторые исследователи полагают, что без создания математической модели затруднительно синтезировать САУ [57].

2.1.1 Выбор метода моделирования каскада экстракционных колонн

При анализе литературы [26, 27, 28, 29] по данной теме было выявлено, что наибольшее распространение получили методы моделирования, основанные на теории подобия (особенно гидравлический метод). Рассмотрим гидравлический метод подробнее.

Гидравлический метод успешно применяют при переходе от лабораторных к промышленным аппаратам, в которых протекают процессы одного класса [26]. Однако в химических аппаратах, где протекают тепловые, массообменные, гидродинамические и химические процессы, выполнение гидродинамического подобия сложно согласуется с одновременным химическим подобием, так как необходимо соблюдать дополнительные практические рекомендации [26]. В связи

со сложностью изучаемых процессов, модель состоит из уравнений, основанных на принципах действия промышленного аппарата и характера операций, проводимых на нём. Конструкция модели может быть аналогичной или близкой к промышленному аппарату, с некоторой мерой свободы в деталях. Однако моделировать работу крупномасштабного аппарата можно только если гидравлическая динамика в нём близка к идеальной. В противном случае исследования усложняются тем, что определяют отклонение структуры потоков от идеального распределения, т. е. измеряют поперечную неравномерность и продольное перемешивание фаз, размер частиц дисперсной фазы и производительность аппарата. Все это выполняется и для лабораторного стенда (например, колонны). Сравнив гидравлическую обстановку в лабораторном и испытуемом промышленном аппарате, находят коэффициент масштабного перехода и, зная эффективность лабораторной модели, достаточно достоверно рассчитывают ее для промышленного аппарата без проведения технологических опытов [26].

Главный недостаток гидравлического метода заключается в том, что он не позволяет предсказать (экстраполировать по данным с лабораторного стенда) эффективность промышленного аппарата до его изготовления, так как гидравлические измерения надо вести именно на аппарате данного или близкого к нему размера. Другими словами, недостаточно одной лишь модели для определения коэффициента масштабного перехода и эффективности промышленного аппарата [27].

Подводя итог вышесказанному, можно сделать вывод, что применение гидравлического метода неэффективно для создания модели КЭК, используемого, на РХЗ из-за сложностей, описанных выше, возникающих при применении метода.

Следующим этапом было рассмотрение опыта научного руководителя [4, 5, 10]. Его работы направлены на моделирование ЭК. В нашем случае процессы, протекающие в ЭК, вносят основной вклад в отклонение потока ОФ от заданного

значения, и могут быть описаны уравнениями однопараметрической диффузионной модели [30].

Уравнения неустановившейся во времени конвективной диффузии с переходом вещества из одной фазы в другую имеют вид [25, 26]:

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial t} = D_1 \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial h^2} - U_1 \cdot \frac{\partial x}{\partial h} + W \\ \frac{\partial y}{\partial t} = D_2 \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial h^2} + U_2 \cdot \frac{\partial y}{\partial h} + W \end{cases}, \quad (10)$$

где U_1, U_2 – скорость течения одной и другой фаз;

x, y – концентрации компонент;

D_1, D_2 – коэффициенты диффузии в соответствующих фазах;

$$W = \beta_1 \cdot \alpha \cdot (x^* - x) = \beta_2 \cdot \alpha \cdot (y^* - y), \quad (11)$$

где β_1, β_2 – коэффициенты массопередачи от одной фазы к другой;

α – поверхность соприкосновения двух фаз на единицу объема;

x^*, y^* – равновесные значения концентрации;

Коэффициент диффузии D жидкостей настолько мал, что уже при малых скоростях жидкости конвективный перенос вещества значительно преобладает над молекулярной диффузией. Для упрощения выражения (10) обычно пренебрегают членом уравнения, содержащим D :

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial t} = -U_1 \cdot \frac{\partial x}{\partial h} + \beta_1 \cdot \alpha \cdot (x^* - x) \\ \frac{\partial y}{\partial t} = +U_2 \cdot \frac{\partial y}{\partial h} + \beta_2 \cdot \alpha \cdot (y^* - y) \end{cases}, \quad (12)$$

Упрощенное уравнение конвективной диффузии (12) – уравнение в частных производных в первом приближении описывает процессы в противоточных колоннах. Решение таких дифференциальных уравнений подробно представлено в литературе [25, 26, 64, 65].

Уравнения (10) и (12) выведены при следующих упрощениях: движение жидкости стационарное и ламинарное, градиент давления и градиент температуры пренебрежимо малы [25]. Однако в нашем случае требуется разработать математическую модель, в которой скорости потоков зависят от времени, концентраций урана в фазах, а также от координаты. В результате этого,

уравнения (10) и (12) становятся нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных, аналитическое решение которых затруднено [25, 26, 64, 65].

Для решения данной проблемы разработан аналитический метод расчета по ступеням извлечения [25, 66], позволяющий учесть пространственное распределение по высоте колонны. В данном методе экстракционную колонну разбивают на зоны – ступени. В каждой зоне используют дифференциальное уравнение материального баланса. Зоны соединяют между собой последовательно. Такой метод и был успешно использован в работе [4].

Однако необоснованно высокие требования к точности моделирования процессов, протекающих в ЭК, избыточны и значительно усложняют процесс создания обобщённой модели. Как будет показано далее, аппроксимация экспериментальной зависимости, полученная в работах [3,11], расхода ОФ от уровня в ВОЗ $Q(L)$ с помощью полинома, см. раздел 2.3, обеспечивает необходимую точность для проведения инженерных расчётов, и хорошо вписывается в концепцию имитационного моделирования.

Использование современного имитационного подхода к моделированию позволяет решать задачи динамики протекания процессов с меньшей трудоёмкостью [41, 43, 45, 57, 58, 59, 60, 61, 62]. Данный подход принципиально отличается от аналитического тем, что одним из основных его этапов является этап симуляции, который невозможен без применения современных технических средств. Использование компьютера на этапе симуляции играет принципиальную роль. Имитационные модели не накладывают жестких ограничений на используемые исходные данные реального объекта. Они позволяют применять всю собранную информацию вне зависимости от ее формы представления и степени ее формализации (таблицы, матрицы, полиномиальные зависимости, передаточные функции, ОДУ и т.д.). Как будет показано далее, раздел 2.2, это особенно актуально при моделировании БЕ. В этой модели нелинейность зависимости расхода жидкости от частоты вращения вала электродвигателя насоса и положения вентиля представлена имитационной моделью на основе

нечеткой нейронной сети как универсального эффективного аппроксиматора [17]. Реализация модели БЕ «классическими» способами представляется весьма трудоёмкой задачей. Подводя итог вышесказанному, выбор имитационного подхода в моделировании представляется наиболее приемлемым способом для создания модели КЭК.

2.1.2 Допущения, принятые в модели КЭК

При разработке математической модели КЭК нами были приняты допущения, влияющие на КЭК как объект управления ССР ОФ:

1. Для органической фазы используется модель идеального вытеснения [30].
2. Температура жидкости в колонне постоянна. Инерционность «канала по температуре» значительно выше инерционности других каналов.
3. Плотность органической жидкости не влияет на гидродинамические процессы в КЭК.

Согласно данным литературы [66, 69], для инженерных расчетов достаточным является уровень приведённой погрешности моделирования порядка 5%. На это значение и будем ориентироваться при моделировании.

2.2 Имитационная модель буферной ёмкости

2.2.1 Создание модели буферной ёмкости

Начнём процесс моделирования с модели буферной ёмкости. Действующая система стабилизации потока органической фазы на установке по переработке концентратов природного и регенерированного урана включает три буферные ёмкости (БЕ-1,2,3) и бак сборник (БС) с установленными погружными центробежными насосами типа ЗНП-10-60В, рисунок 1. Управление расходами осуществляется с помощью изменения напора на выходе соответствующего насоса за счёт регулировки вентиля с исполнительными механизмами постоянной скорости типа «А», или же изменением частоты вращения двигателя насоса с помощью ЧП.

Сложность задачи создания модели БЕ обусловлена сложностью аппроксимации зависимости $Q(N, \% \text{ откр.})$, заключающейся: во-первых, в нелинейности этой зависимости; во-вторых, из-за режима работы БЕ, который ведётся на определённом количестве положений вентиля. Реальные данные получают в виде разрежённой матрицы, рисунок 7.

Для создания модели БЕ были обработаны данные трендов $Q(t)$, $N(t)$, $ДУП(t)$, снятые с действующей установки, и получена зависимость расхода ОФ от частоты вращения вала электродвигателя насоса и положения вентиля $Q(N, \% \text{ откр.})$, рисунок 7.

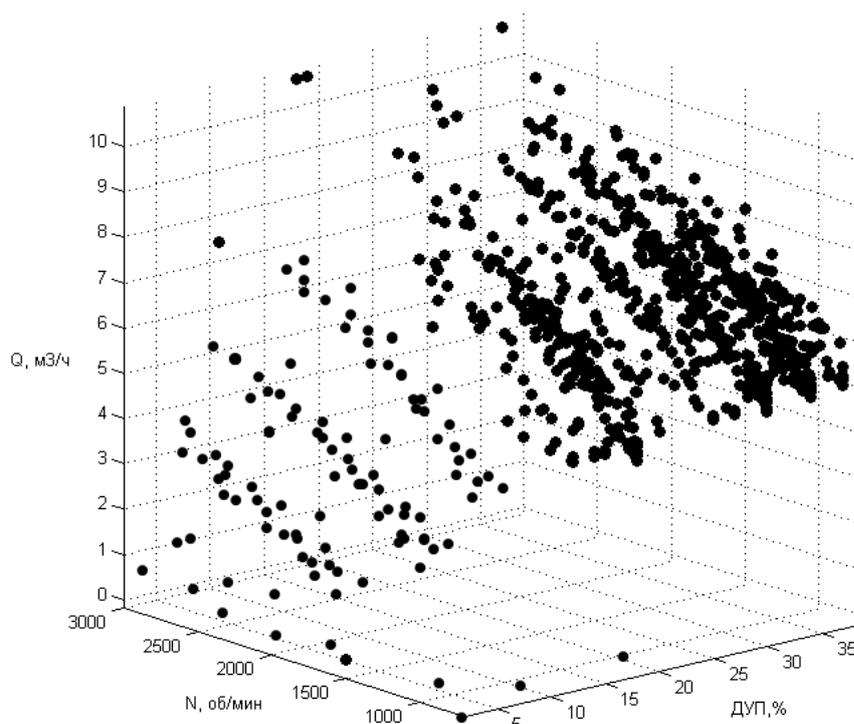


Рисунок 7 Влияние управляющих переменных на поток ОФ

Рассмотрим и подберём наиболее подходящий метод аппроксимации с учётом описанных выше ограничений.

Полиномиальная аппроксимация (полиномом Лагранжа, как частный случай).

Линейная и квадратичная аппроксимация являются частным случаем полиномиальной аппроксимации с помощью аппроксимирующего полинома:

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n = \sum_{i=0}^n a_i x^i, \quad (13)$$

Для выполнения полиномиальной аппроксимации достаточно по выражению составить систему линейных уравнений для n узловых точек и определить n значений коэффициентов a_i . Для N точек задания функции степень полинома равна $N-1$. Максимальная степень полинома на практике обычно устанавливается не более 8-10, а большие массивы данных интерполируются последовательными локальными частями [78,79].

Основным достоинством метода является его относительная простота реализации. К недостаткам можно отнести: хорошие результаты для однопараметрических функций; точность при большом количестве точек и степени полинома.

Вывод, который можно сделать: затруднительно использовать для наших экспериментальных данных из-за относительно малого количества точек и зависимости расхода сразу от двух параметров.

Кривые Безье

Для задач аппроксимации широко применяются кривые Безье. Основная область применения - компьютерная графика.

Метод основан на разбиении отрезков, соединяющих исходные точки в отношении t , а затем в рекурсивном повторении этого процесса для полученных отрезков:

$$P_i^j(t) = (1-t)P_i^{j-1} + tP_{i+1}^{j-1}(t), \quad (14)$$

где нижний индекс - номер точки, верхний индекс - уровень разбиения.

Уравнение кривой n -ого порядка задается уравнением:

$$P(t) = P_0^n(t), \quad (15)$$

Общая аналитическая запись для кривых Безье по $N+1$ опорной точке:

$$P^N(t) = \sum_{i=0}^n P_i B_i^N(t), \quad (16)$$

где

$$B_i^N(t) = C_i^N t^i (1-t)^{N-i}, \quad (17)$$

$$C_i^N = \frac{N!}{i!(N-i)!}, \quad (18)$$

Основным достоинством метода является его относительная простота реализации. Недостатки совпадают с предыдущим методом. Вывод, который можно сделать – метод также не подходит для нас, как и предыдущий.

Спектральный метод интерполяции

При дискретизации данных с равномерным шагом по аргументу наиболее точную интерполяцию финитных сигналов обеспечивает спектральный метод. При условии, естественно, что в спектре сигнала не содержится частотных составляющих, превышающих частоту Найквиста [78].

Допустим, что для обработки задается произвольный аналоговый сигнал $s(t)$, имеющий фурье-образ $S(f)$. Равномерная дискретизация непрерывного сигнала $s(t)$ с частотой F (шаг $\Delta t=1/F=\theta$) с математических позиций означает умножение функции $s(t)$ на гребневую функцию:

$$W_\theta(t) = \sum_k \delta(t - k\Delta t), \quad (19)$$

$$s_\theta = s(t)W_\theta = s(t) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - k\Delta t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(k\Delta t)\delta(t - k\Delta t), \quad (20)$$

С учетом известного преобразования Фурье гребневой функции $W_\theta(t) \Leftrightarrow F \cdot W_F(f)$ фурье-образ дискретной функции $s_\theta(t)$:

$$S_F = s(t) \times F W_F(f), \quad (21)$$

$$W_F(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - nF), \quad (22)$$

Отсюда, для спектра дискретного сигнала имеем:

$$S_F(f) = FS(f) \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(f - nF) = F \sum_{n=-\infty}^{\infty} S(f - nF), \quad (23)$$

Спектр дискретного сигнала представляет собой непрерывную периодическую функцию с периодом F , совпадающую с функцией $F \cdot S(f)$ непрерывного сигнала $s(t)$ в пределах центрального периода от $-f_N$ до f_N , где $f_N=1/2\Delta t=F/2$ - частота Найквиста. Частота дискретизации сигнала должна быть минимум в два раза выше максимальной частотной составляющей в спектре сигнала ($F=1/\Delta t \geq 2f_{max}$). Умножая функцию (21) на прямоугольную весовую функцию $\Pi(f)$, равную 1 в пределах главного частотного спектра, получаем

непрерывный спектр в бесконечных по частоте границах, равный спектру $F \cdot S(f)$ в пределах главного частотного диапазона:

$$FS(f) = F[S(f) \times W_F(f)]\Pi_F(f), \quad (24)$$

Обратное преобразование Фурье этого спектра, с учетом коэффициента F , должно восстанавливать непрерывный сигнал, равный исходному аналоговому сигналу $s(t)$.

Частным случаем является интерполяционный ряд Котельникова, который представляет собой свертку дискретной функции данных $s(k\Delta t)$ с непрерывной функцией интегрального синуса.

Основные достоинства метода: очень точный метод интерполяции; подходит в большинстве случаев - главное учитывать частоту Найквиста и явление Гиббса.

К недостаткам можно отнести следующее. Во-первых, при нарушении корректности дискретизации данных погрешности интерполяции возрастают. Во-вторых, следует учитывать, что при интерполяции данных, представляющих собой вырезки из сигнальных функций с определенной постоянной составляющей (сигнал не выходит на нулевые значения на концевых участках интервала задания), а также любых данных со скачками функций, при спектральном преобразовании на интерполированном сигнале в окрестностях обрезания данных (и скачков) возникает явление Гиббса. Для исключения этого эффекта производят определение линейного тренда данных по концевым значениям отсчетов и вычитают его из данных, с последующим восстановлением после интерполяции.

Вывод, который можно сделать – метод затруднительно использовать для наших экспериментальных данных из-за большого объема работы перед обработкой сигнала (дискретизация, задание спектральной функции и т.д.).

Статистические методы аппроксимации

Эмпирические данные, как правило, задаются числовыми рядами значений двух величин: независимой (y_k) и зависимой (x_k). Каждая из этих величин в общем случае, кроме определенной регулярной (детерминированной) составляющей,

может содержать и случайные составляющие самой различной природы. Это обусловлено как статистической природой изучаемых процессов, так и внешними факторами процессов измерений и преобразования данных (шумы, помехи, дестабилизирующие факторы и ошибки измерений). Независимая переменная x_k обычно полагается детерминированной, а, следовательно, ее случайная составляющая "переносится" на зависимую переменную y_k . Полагается также, что значения случайной составляющей зависимой переменной (как собственные, так и "суммарные") распределены по некоторому вероятностному закону (например – нормальному) [78,79].

При выполнении аппроксимации данных априорно предполагается существование определенной детерминированной связи $y(x)$ между регулярными составляющими этих двух числовых рядов на статистически значимом уровне, достаточном для ее выявления на уровне случайных составляющих. Задача выявления такой закономерности относится к числу неопределенных и неоднозначных, результат которой существенно зависит от трех основных и весьма субъективных факторов:

1. выбора меры близости зависимой переменной к искомой функции и метода построения приближения (параметров математической модели);
2. выбора подходящего класса функции аппроксимации (степенной, тригонометрической и пр.), отвечающего физической природе моделируемого процесса;
3. метода оптимизации порядка модельной функции или числа членов ряда аппроксимирующего выражения.

Отсюда следует, что оптимальная аппроксимация может быть обеспечена только достаточно гибкими интерактивными алгоритмами на основе многоэтапных итерационных процессов с возможностью коррекции на каждом этапе.

Мера приближения

Наиболее распространенным является критерий наилучшего приближения в виде минимума степенной разности между значениями переменной $y(x)$ и аппроксимирующей функцией $\varphi(x_k)$:

$$\sum_k [y_k - \varphi(x_k)]^S \rightarrow \min \quad (25)$$

где $S > 0$ - положительное число.

Квадратичная мера

Квадратичная мера реализуется при $S=2$ в методе наименьших квадратов (МНК) и обеспечивает максимальное правдоподобие функции приближения при нормальном распределении случайной составляющей зависимой переменной y_k . Несмещенной оценкой меры приближения в МНК является дисперсия остатков:

$$D = \sum_k \frac{[y_k - \varphi(x_k)]^2}{k - m}, \quad (26)$$

где m – количество параметров в функции приближения,

$(k - m)$ – число степеней свободы.

Однако эмпирические данные могут содержать выбросы и грубые ошибки, которые вызывают смещения вычисляемых параметров. Их влияние обычно исключается цензурированием данных: вычислением гистограммы разностей $y_k - \varphi(x_k)$ после определения первого приближения функции аппроксимации и исключением "хвостовых" элементов гистограммы (до 2.5% от количества данных, или резко выделяющихся элементов данных на основании оценок вероятностей с использованием γ - или t -распределений).

Мера наименьших модулей (метод Лагранжа)

Мера наименьших модулей (метод Лагранжа) реализуется при $S=1$ и применяется при распределениях случайных составляющих зависимой переменной по законам, близким к закону Лапласа (двустороннее экспоненциальное распределение). Такая мера соответствует площади между графиками эмпирических данных и функции аппроксимации, и, по сравнению с

квадратической, является более устойчивой, в том числе при наличии случайных составляющих с большими амплитудами (длинные "хвосты" разностных гистограмм). Оценки по модулю получили название "робастных" (robust – устойчивый).

Минимаксная мера (мера Чебышева)

Минимаксная мера (мера Чебышева – минимизация максимального расхождения функции аппроксимации с данными) обеспечивает наилучшее приближение при равномерном распределении значений случайной составляющей, но не является устойчивой при наличии больших расхождений данных с функцией аппроксимации.

Аппроксимирующая функция

Аппроксимирующая функция, в принципе, может быть математической функцией любого типа, линейной комбинацией различных функций или функциональным рядом из степенных, тригонометрических и любых других функций. В основу ее построения желательно закладывать априорные (теоретические) предположения о сущности изучаемого явления, хотя бы по таким свойствам, как область определения переменных и производных, асимптоты, минимумы и максимумы.

Наибольшее распространение в практике аппроксимации при отсутствии теоретических аспектов изучаемых явлений получили функциональные ряды, для которых определяющее значение имеет порядок аппроксимирующей функции (модели).

Достоинства метода:

Метод нашёл широкое применение из-за универсальности подхода и независимости от выбора аппроксимирующей функции.

Недостатки метода:

- Необходимость в цензурировании данных перед аппроксимацией;
- В основу построения желательно закладывать априорные (теоретические) предположения о сущности изучаемого явления;

Вывод:

Затруднительно использовать в нашем случае из-за большого объема работы при подготовке данных (цензурирование данных) к аппроксимации и малого количества экспериментальных точек.

Сплайновая аппроксимация

Сплайн - кусочный многочлен степени K с непрерывной производной степени $K-1$ в точках соединения сегментов. В среде Matlab используется thin-plate smoothing spline/сглаживающий сплайн.

Если в узлах x_i, x_{i+1} заданы значения f_i, f_{i+1} , то приближение сглаживающими сплайнами $\mu(x)$ функции $f(x)$ определяется как минимизирующая функция (в классе дважды дифференцируемых функций):

$$\sum_{i=0}^n (f_i - \mu(x_i))^2 + \lambda \int_{x_1}^{x_n} \mu(x_i)^2 dx, \quad (27)$$

где

- $\lambda \geq 0$ параметр сглаживания, контролирующий соотношение между точностью воспроизведения данных и «неровностью» аппроксимирующей функции;
- интеграл вычисляется по всему диапазону x_i ;
- при $\lambda \rightarrow 0$ (нет сглаживания), сглаживающий сплайн превращается в интерполяционный сплайн;
- при $\lambda \rightarrow \infty$ (бесконечное сглаживание), штраф за неровность становится преобладающим, и аппроксимация превращается в линейную МНК аппроксимацию.

Основными достоинствами метода для нас являются его применимость для многомерных пространств и техническая реализация в среде Matlab.

Воспользуемся данным методом для аппроксимации наших экспериментальных данных. В результате применения данного метода была получена поверхность, представленная на рисунке 8.

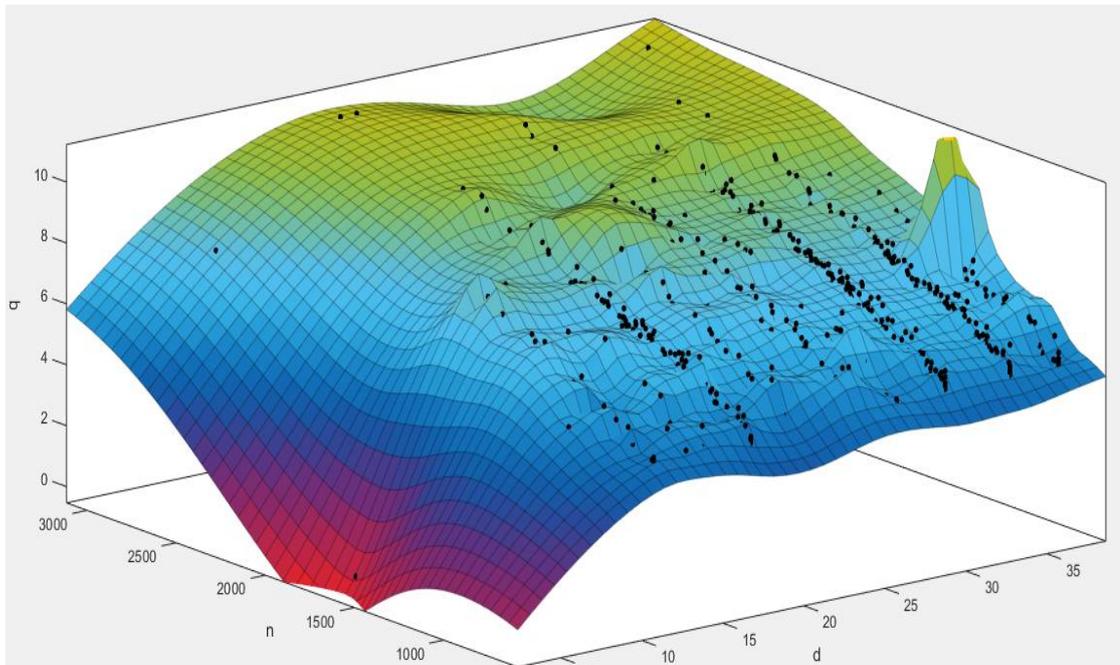


Рисунок 8 Использование сплайн аппроксимации

Основной вывод, который можно сделать из данных представленных на рисунке 8, заключается в том, что качество аппроксимации сплайн методом ухудшается с ростом неопределённости. Чем меньше данных для режима работы установки, тем менее точен метод. Аппроксимация с помощью нечёткой нейронной сети позволила решить проблему неполноты экспериментальных данных.

Аппроксимация с помощью нечёткой нейронной сети.

Создание имитационной модели на основе ННС является универсальным эффективным аппроксиматором [17]. В отличие от других методов (полиномы, сплайны, и др.), аппроксимация с помощью ННС позволяет решить проблему неполноты экспериментальных данных крайне эффективно.

ННС реализована в среде Matlab, с помощью мощного пакета создания нейронных сетей Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS – адаптивные системы нейро-нечёткого вывода). Редактор ANFIS позволяет создавать или загружать конкретную модель адаптивной системы нейро-нечеткого вывода, выполнять ее обучение, визуализировать ее структуру, изменять и настраивать ее параметры, а также использовать настроенную сеть для получения результатов

нечеткого вывода. Данный подход позволяет создать имитационную модель БЕ по неполным экспериментальным данным [70, 71].

Процесс создания ННС БЕ проходил в четыре этапа: подготовка данных, синтез ННС, обучение ННС, тестирование и проверка ННС.

Данные используемые для создания ННС делятся на 2 категории: данные для обучения ННС и данные для проверки, рисунок 9. Требования, предъявляемые к данным для обучения ННС, заключаются в максимальной приближенности к рабочему режиму, в то время как данные для проверки должны содержать в себе ситуации, которые редко возникают в рабочем режиме, для повышения точности нейронной сети. Для своей ННС в качестве данных первой категории мы использовали данные, представленные на рисунке 7. В качестве данных из второй категории - суточные тренды $Q(t)$, $N(t)$, $ДУП(t)$.

После подготовки и загрузки обучающих данных можно сгенерировать структуру системы нечеткого вывода FIS типа Сугено, которая является моделью гибридной сети в системе Matlab. Далее задаём число и тип функций принадлежности для отдельных термов входных и выходной переменных. Графически структура гибридной сети представлена на рисунке 10.

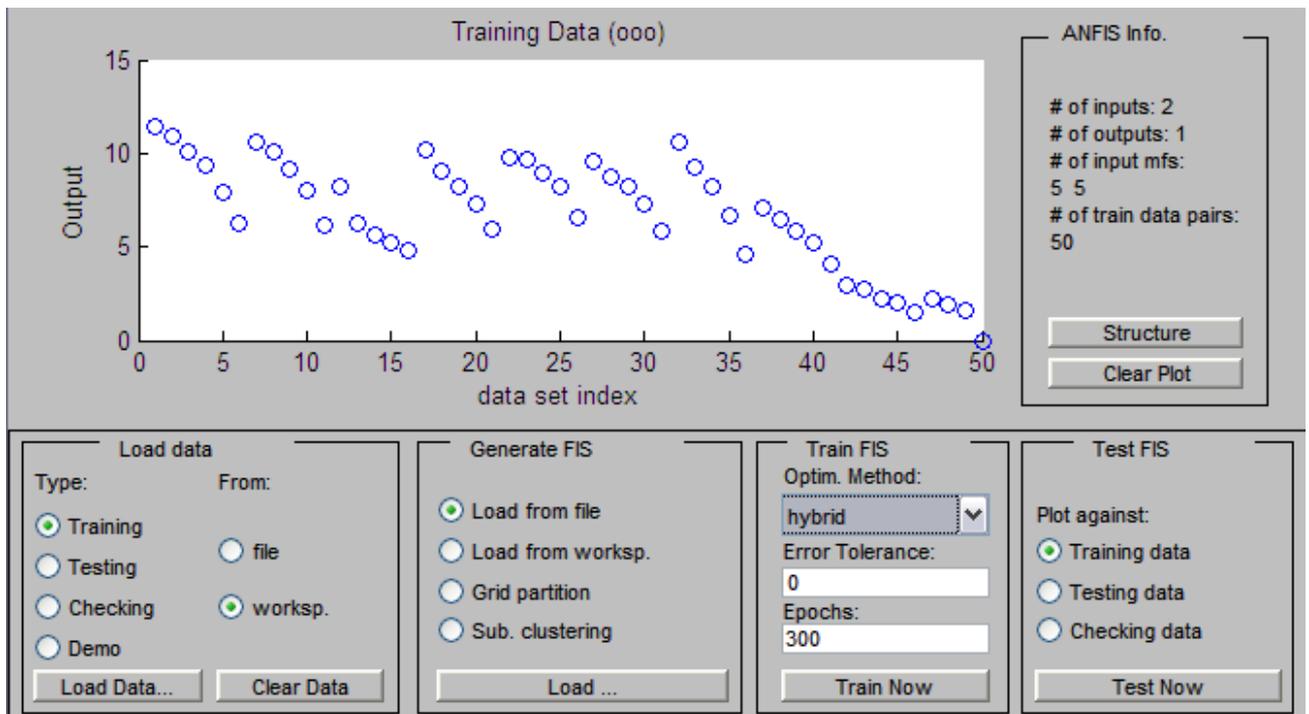


Рисунок 9 Данные первой категории в рабочем окне пакета ANFIS

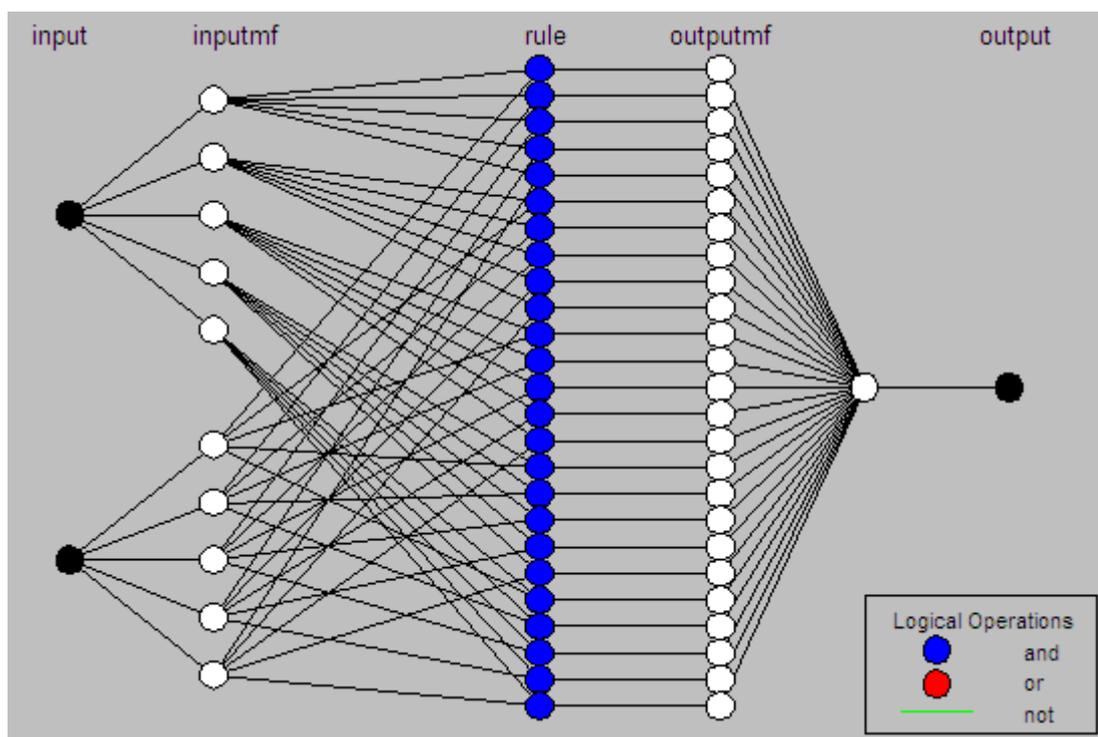


Рисунок 10 Структура сгенерированной системы нечеткого вывода

Следующим этапом стало обучение гибридной сети. Перед обучением необходимо задать параметры обучения, выбрать метод обучения, установить уровень ошибки, задать количество циклов обучения. Был использован гибридный метод с уровнем допустимой ошибки обучения 0, и количеством эпох 300. В результате получили систему с набором правил и функций принадлежности, рисунок 11.

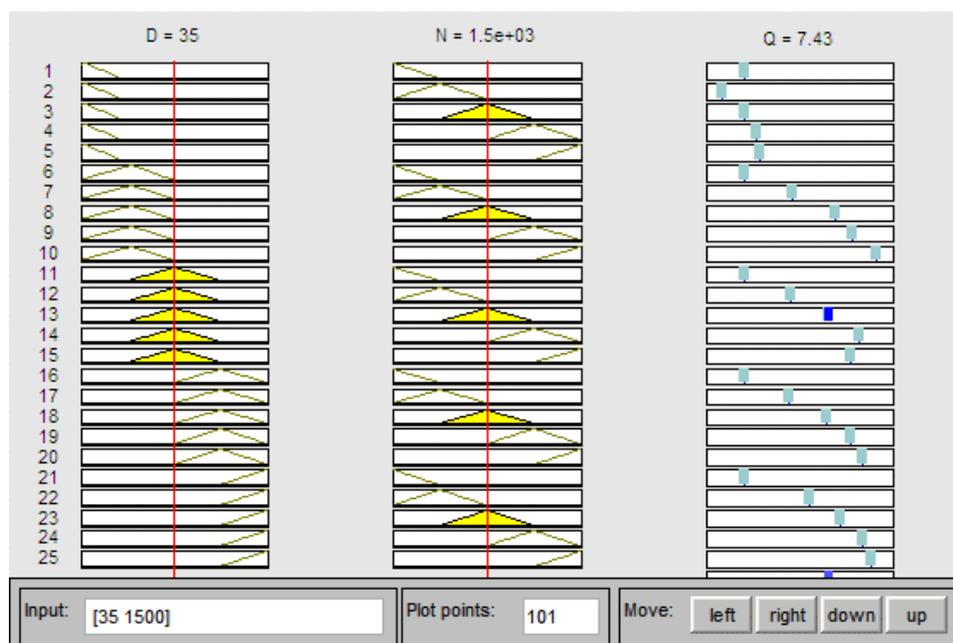


Рисунок 11 Набор правил сгенерированной системы нечеткого вывода

Ход процесса обучения иллюстрируется в окне визуализации в форме графика зависимости ошибки от количества циклов обучения. Уровень ошибки обучения составил 0,19947. Поверхность системы нечеткого вывода представлена на рисунке 12.

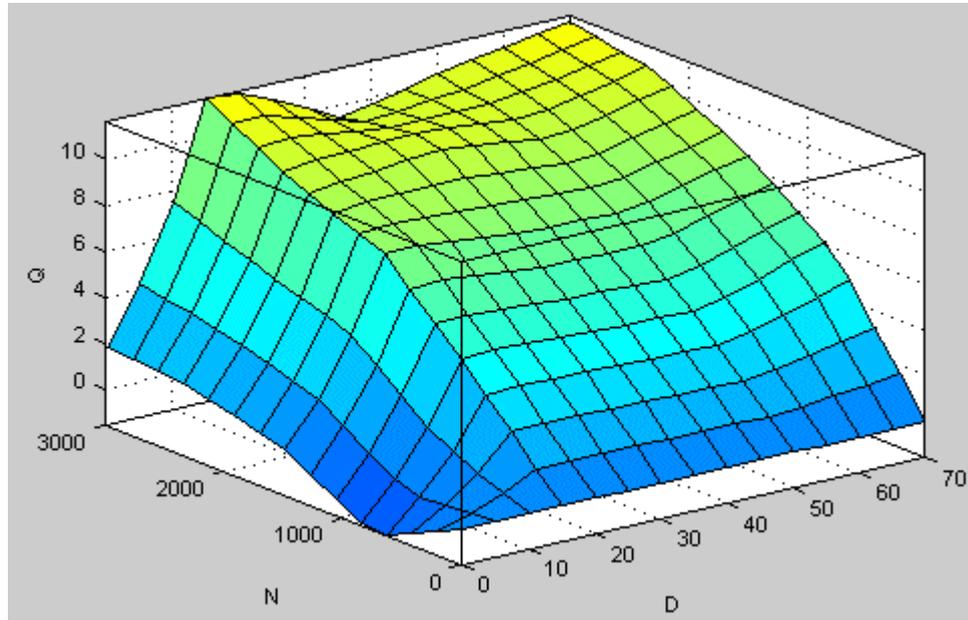


Рисунок 12 Поверхность системы нечеткого вывода

2.2.2 Проверка адекватности модели буферной ёмкости

Проверку на адекватность полученной модели провели с использованием данных среднеквадратичной погрешности модели относительно данных, полученных на реальной установке. Среднеквадратичная погрешность между моделями и данными с реальной установки, приведёнными к шкале расходомера ОФ, представлены на рисунке 13 и в таблице 3. Как видно из представленных данных, метод аппроксимации с помощью ННС предпочтительнее, т.к. обеспечивает необходимую точность аппроксимации для создания адекватной модели БЕ. Качество же аппроксимации с помощью сплайн метода ухудшается с ростом неопределённости. В количественном выражении это видно из среднеквадратичной ошибки отклонения сплайн метода при степени открытия вентиля 3,7%.

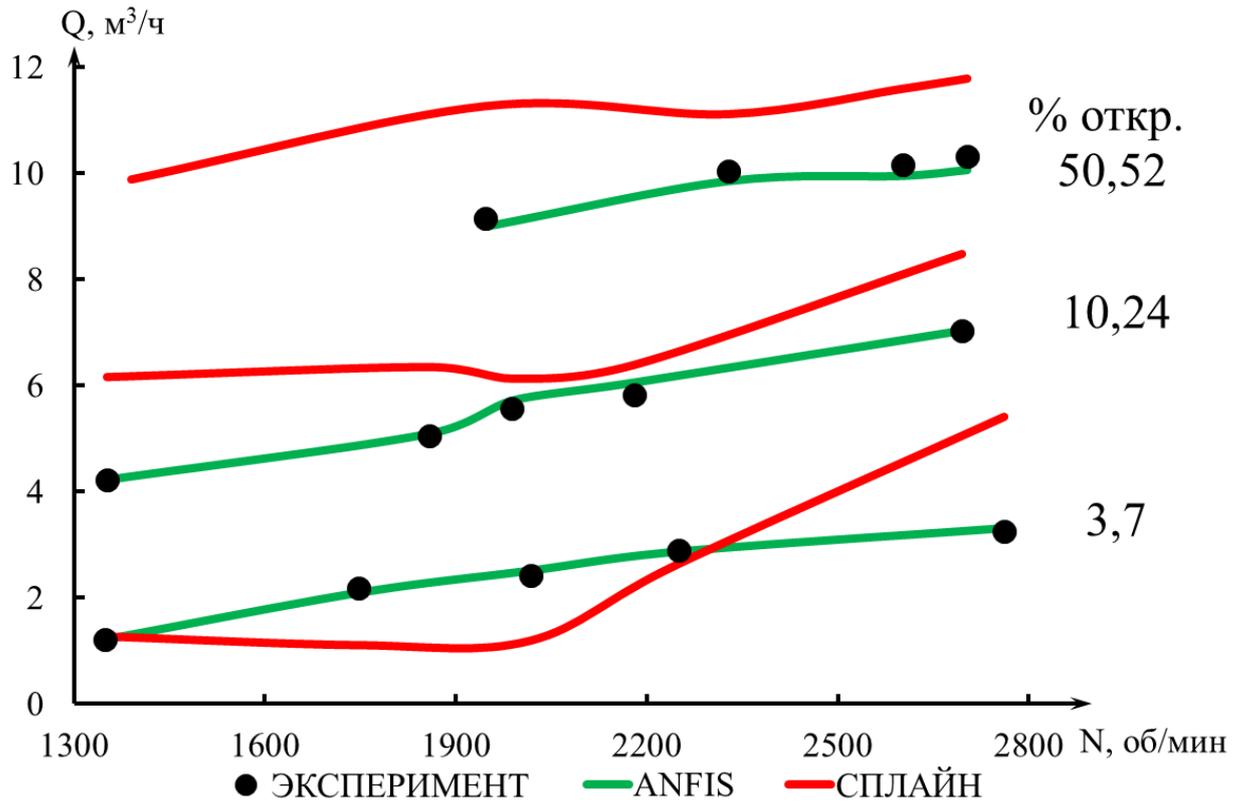


Рисунок 13 Сопоставление модели и эксперимента

Таблица 3 Сравнение модели и эксперимента

Степень открытия вентиля, %	50,52	10,24	3,7
Среднеквадратичная ошибка отклонения ННС, % шкалы	1,2	1,9	0,6
Среднеквадратичная ошибка отклонения сплайн метода, % шкалы	12,8	18,3	51,5

Созданную систему нечеткого вывода использовали при синтезе имитационной модели БЕ, рисунок 14.

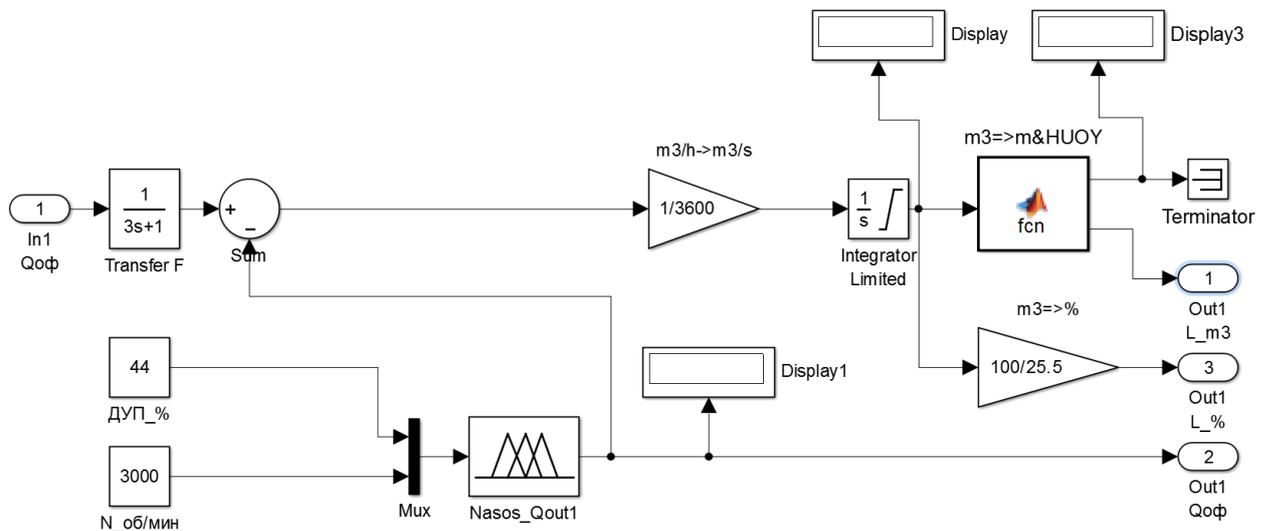


Рисунок 14 Структура имитационной модели БЕ в среде Simulink

В результате проделанной работы была получена имитационную модель БЕ с использованием ННС. Благодаря системе нечеткого вывода удалось снять ограничения, описанные выше, на аппроксимацию классическими методами. Сравнение модели с реальной установкой подтвердило адекватность предложенной модели [49]. Ошибка аппроксимации экспериментальных зависимостей не превышает 5%. Предложенную модель можно использовать для дальнейших исследований.

2.2.3 Дополнительные ограничения при синтезе САУ

В процессе снятия данных с реальной установки обнаружено, что при малых оборотах вала насоса ЗНП-10-60 резко возрастал ток, при котором дальнейшая эксплуатация насоса невозможна. Резкое увеличение тока в двигателе насоса происходило при оборотах <600 об/мин. Также в рекомендациях производителя ЧП стоят требования на ограничения минимальных оборотов, связанных с использованием ЧП совместно с погружными насосами. Это потребовало дополнительных исследований. В результате чего были сформулированы цели испытаний:

1. Определить минимальной частоты вращения, при которой насос перестаёт генерировать напор (ограничения на использование частоты вращения электродвигателя насоса);
2. Определить зависимость тока в обмотках электродвигателя насоса от частоты вращения насоса при разном рабочем давлении (ограничения на использование вентиля);
3. Определить зависимость температуры обмоток электродвигателя от частоты вращения насоса при разном рабочем давлении (ограничения на ток в обмотках электродвигателя насоса).

Для исследования режимов работы насоса ЗНП-10-60 с частотным управлением был разработан и изготовлен лабораторный стенд, представленный на рисунке 15.

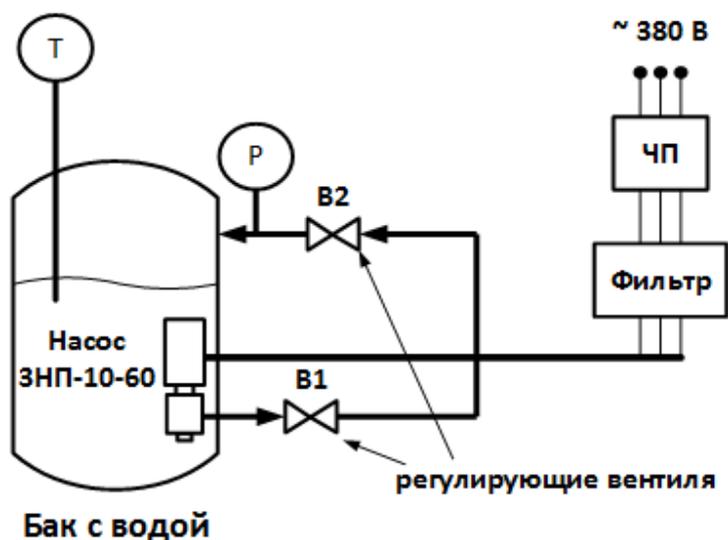


Рисунок 15 Лабораторный стенд по исследованию частотного управления

Для построения экспериментальной установки был использован стенд проверки насосов, находящийся в помещении насосного участка. В состав установки входили: бак с водой, насос ЗНП-10-60, система трубопроводов и вентилях. Насос управлялся частотным преобразователем Danfoss VLT AQUA Drive FC 200 через фильтр частот, рисунок 15.

1. Схема эксперимента определения зависимости тока в обмотках статора двигателя от частоты вращения насоса при разном давлении собранной установки следующая:

- открыть вентили В1 и В2 для заполнения полостей насоса водой;
- подать 3-х фазное питание на ЧП;
- на панели местного управления ЧП установить требуемое количество оборотов в минуту и нажать кнопку пуск. Это приведёт к началу плавного разгона привода до заданных оборотов.
- при достижении насосом номинальных оборотов скорректировать положение задвижки В1 для создания рабочего давления (не более 6 ати);
- задавая число оборотов насоса в пределах от 500 до 3000 об/мин, тем самым меняем производительность насоса.
- изменяя положение задвижки В1, задать рабочее давление.

Значение тока в обмотках измерялось самим ЧП. Температура обмоток электродвигателя насоса измерялась по изменению сопротивления каждой обмотки. Рабочее давление определялось по показаниям манометра. Результаты эксперимента представлены в приложении А.

2. Схема эксперимента для определения зависимости температуры в обмотках статора двигателя насоса от частоты вращения насоса при разном давлении собранной установки следующая:

- открыть вентили В1 и В2 для заполнения полостей насоса водой;
- подать 3-х фазное питание на частотный преобразователь;
- на панели местного управления частотного преобразователя установить требуемое количество оборотов в минуту и нажать кнопку пуск. Это приведёт к началу плавного разгона привода до заданных оборотов.
- при достижении насосом номинальных оборотов скорректировать положение задвижки В1 для создания рабочего давления (не более 6 ати);
- после заданного интервала времени измеряем сопротивление обмоток двигателя и температуру атмосферного воздуха. Цикл эксперимента длился 5,5 часа, с интервалами (около 1 часа) для снятия характеристик, на одной из частот (2900/2000/1000 об\мин) и при одном из давлений (6/4/2 ати). После очередного цикла экспериментов либо снижались значения оборотов, либо уменьшалось давление.

Значение тока в обмотках измерялось самим частотным преобразователем. Температура обмоток электродвигателя насоса измерялась по изменению сопротивления каждой обмотки. Температура воды определялась по показаниям термопары. Рабочее давление определялось по показаниям манометра. Результаты эксперимента представлены в приложении А.

По результатам работы была получена группа зависимости тока в обмотках электродвигателя насоса от его оборотов, рисунок 16.

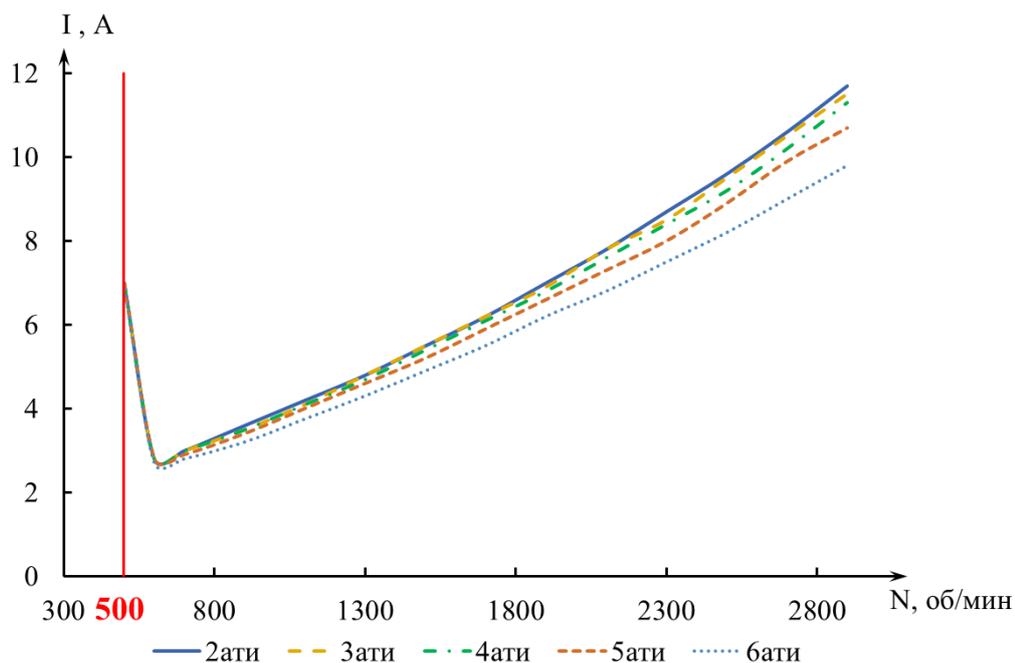


Рисунок 16 Влияние оборотов двигателя насоса на ток в его обмотках

В результате проделанной работы было установлено:

1. При любом рабочем давлении ток в обмотках электродвигателя резко возрастает в 2 раза при частоте вращения 500 об/мин. Можно предположить, что насос становится на «подпятник» при 500 об/мин. Для исключения проблемы посадки двигателя на «подпятник», при старте насоса, необходимо разгонять обороты двигателя насоса до отметки более 1600 об/мин за фиксированное время 3÷5 с.
2. При уменьшении рабочего давления (работа при полностью открытом вентиле) ток и температура обмоток увеличиваются. Поэтому нежелательна работа при полностью открытом вентиле, диапазон работы от 0÷70% открытия вентиля.
3. При уменьшении частоты вращения электродвигателя снижается ток, а как следствие, и температура нагрева обмоток, что приводит к снижению энергопотребления, уменьшению механического износа трущихся частей насоса, и, как следствие, увеличению срока службы электродвигателя.
4. Частотный преобразователь рассчитан на длительные временные интервалы работы.

2.3 Имитационная модель экстракционной колонны

2.3.1 Создание модели экстракционной колонны

Следующим структурным элементом для моделирования является экстракционная колонна (ЭК). Установка по переработке концентратов природного и регенерированного урана включает в себя четыре ЭК, рисунок 1, геометрические параметры которых сведены в таблицу 4.

Таблица 4 Геометрические параметры ЭК

	Полный объём, $V_{\text{п}}$	Рабочий объём, $V_{\text{р}}$	Высота, h	Диаметр, d
	м ³	м ³	м	м
ЭК-1	16,29	15,54	11,45	1,23
ВОЗ	1,71	1,71	1,2	1,6
воронка	-	-	0,6	-
СОЗ	2,33	2,33	1	1,8
НОЗ	2,59	2,59	1,25	1,8
ЭК-2	6,5	5,5	7,53	0,9
ВОЗ	1,8	1,8	1,3	-
воронка	-	-	0,65	-
НОЗ	2,06	2,06	1,2	1,6
ЭК-3	14,15	13,4	11,43	1,36
ВОЗ	1,6	1,6	1,18	1,6
воронка	-	-	0,59	-
НОЗ	2,06	2,06	1,2	1,6
ЭК-4	9,6	8,16	7,5	1,3
ВОЗ	1,8	1,8	1,3	-
воронка	-	-	0,65	-
НОЗ	2,06	2,06	1,2	1,6

Математически опишем поведение расхода ОФ на выходе из верхней отстойной зоны колонны (ВОЗ). На рисунке 2 представлена схема ЭК. По ней видно, что расход ОФ на выходе из ЭК зависит от уровня над воронкой в ВОЗ. В 1998 году сотрудниками кафедры ЭАФУ были проведены исследования экстракционного каскада [3,11]. В результате была получена зависимость расхода ОФ от уровня над воронкой в ВОЗ $Q(H_{\text{над}})$, и результаты сведены в таблицу 5.

Таблица 5 Данные зависимости расхода ОФ от уровня над воронкой в ВОЗ

Высота над воронкой, $H_{\text{над}}$	м	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,15
Расход ОФ, Q	м ³ /час	0	22,24	31,21	38,06	43,83	48,91	53,5	57,72	59,71

Воспользуемся данной таблицей и аппроксимируем зависимость. Для аппроксимации воспользовались полиномом 3 степени. Результат имеет вид (28) и представлен на рисунке 17.

$$y = 28479x^3 - 8655,9x^2 + 1052,1x + 1,4392 \quad (28)$$

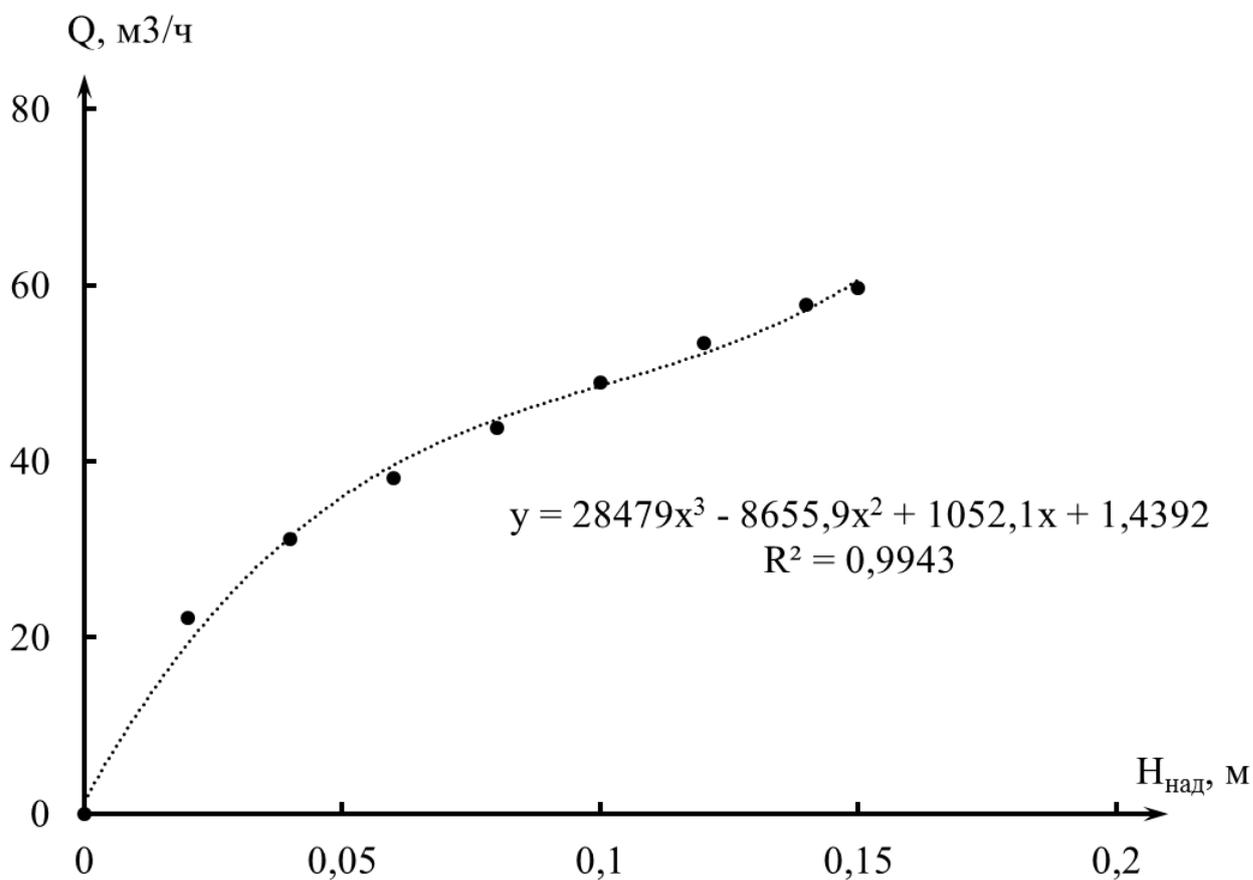


Рисунок 17 Зависимость расхода от уровня в колонне

Полученную полиномиальную зависимость использовали при синтезе имитационной модели ЭК, рисунок 18.

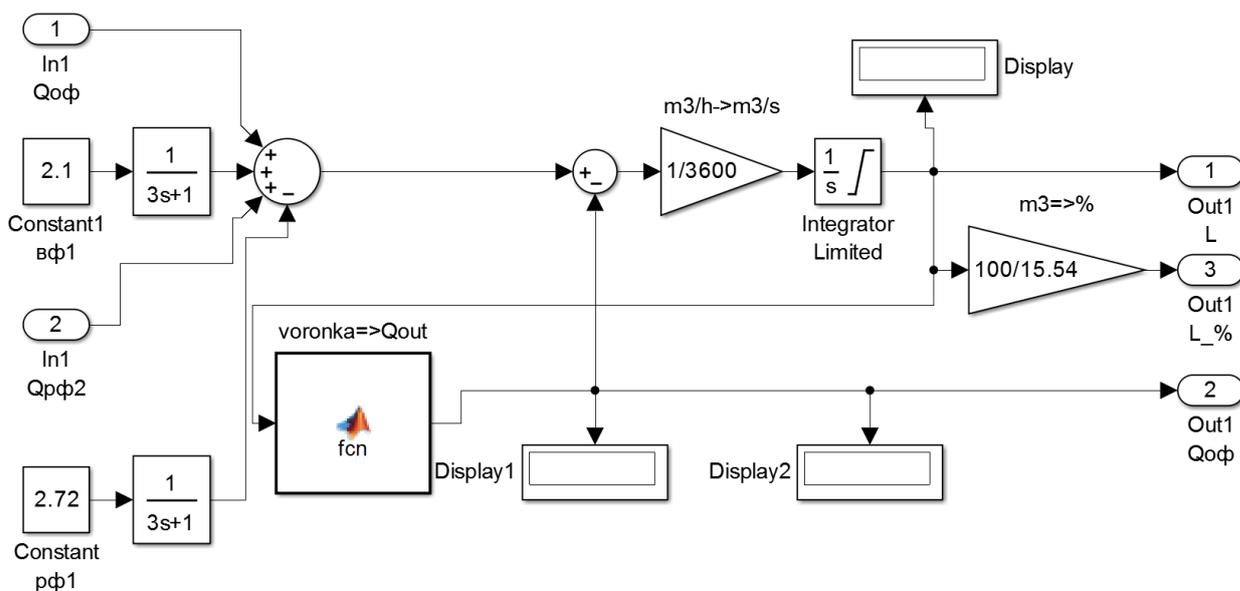


Рисунок 18 Структура имитационной модели ЭК в среде Simulink

2.3.2 Проверка адекватности модели экстракционной колонны

Проверку на адекватность ЭК полученной модели оценили по коэффициенту детерминации $\eta^2 = 0,9943$. Коэффициент детерминации широко применяется в статистическом анализе и является показателем, представляющим долю межгрупповой дисперсии в дисперсии результативного признака, и характеризует силу влияния группированного признака на образование общей вариации [72]. Он может быть рассчитан по формуле:

$$\eta^2 = \frac{\sigma^2}{\delta^2} \quad (29)$$

Если связь функциональная, то коэффициент детерминации равняется единице. В таком случае дисперсия групповых средних равна общей дисперсии, т.е. внутригрупповой вариации нет. Например, если получают коэффициент детерминации $\eta^2 = 0,9$, это значит, что уравнением регрессии объясняется 90% дисперсии результативного признака, а на долю прочих факторов приходится 10% ее дисперсии (т.е. остаточная дисперсия). Величина коэффициента детерминации служит важным критерием оценки качества линейных и нелинейных моделей. Чем значительнее доля объясненной вариации, тем меньше роль прочих факторов, и значит, модель регрессии хорошо аппроксимирует

исходные данные и такой регрессионной моделью можно воспользоваться для прогноза значений результативного показателя [73].

Для оценки силы связи на основе показателя коэффициента детерминации можно использовать соотношение Чэддока [72]. Если коэффициент детерминации находится в интервале 0,9 — 0,99, такую регрессионную модель можно использовать для прогноза.

В результате проделанной работы получили имитационную модель ЭК. Ошибка аппроксимации экспериментальных зависимостей не превышает 5%. Предложенную модель можно использовать для дальнейших исследований.

2.4 Имитационная модель каскада экстракционных колонн

Заключительным этапом создания имитационной модели объекта управления является создание модели КЭК, но перед тем как создать модель, опишем рабочий режим, который необходим для определения значений основных потоков, участвующих в процессе экстракции.

2.4.1 Рабочий режим каскада экстракционных колонн

Рабочий режим КЭК характеризуется значениями расходов основных потоков, участвующих в процессе экстракции. Для его описания воспользуемся трендами приборов контроля технологического процесса. Там, где приборы контроля не установлены, используем регламентные значения. Результат проделанной работы представлен в таблице 6.

Таблица 6 Характеристики потоков при рабочем режиме КЭК

Аппарат	Входной(+) /Выходной(-) поток	Обозначение потока	Значение, м ³ /ч	Влияние на основной поток ОФ	Источник данных
БС	+	ВЭ	переменный	формирует	зависит от L _{в034}
	-	ОФ	10,44	формирует	из трендов
ЭК-1	+	ОФ	-//-	-//-	-//-
	+	ВФ1	1,99	влияет	из трендов
	+	РФ2	0,72	влияет	из регламента
	-	РФ1	1,99	влияет	из регламента
	-	Э1'	переменный	формирует	зависит от L _{в031}
БЕ-1	+	Э1'	-//-	-//-	-//-
	-	Э1	7,76	формирует	из трендов
ЭК-2	+	Э1	-//-	-//-	-//-
	+	ПР1	0,72	влияет	из трендов
	-	РФ2	0,72	влияет	из регламента
	-	Э2'	переменный	формирует	зависит от L _{в032}
БЕ-2	+	Э2'	-//-	-//-	-//-
	-	Э2	9,01	формирует	из трендов
ЭК-3	+	Э2	-//-	-//-	-//-
	+	ПР23	8,39	влияет	из трендов
	-	РР	8,4	влияет	из регламента
	-	Э3'	переменный	формирует	зависит от L _{в033}
БЕ-3	+	Э3'	-//-	-//-	-//-

Аппарат	Входной(+) /Выходной(-) поток	Обозначение потока	Значение, м ³ /ч	Влияние на основной поток ОФ	Источник данных
	–	ЭЗ	10	формирует	из регламента
ЭК-4	+	ЭЗ	–//–	–//–	–//–
	+	ПРЗ	0,11	влияет	из трендов
	+	ПР24	0,22	влияет	из трендов
	–	РФЗ	0,33	влияет	из регламента
	–	ВЭ	–//–	–//–	–//–

На основе представленных данных можно сделать выводы о том, что существуют две группы расходов: первая группа формирует основной поток ОФ по КЭК; вторая группа задаёт режим работы КЭК и является возмущением для основного потока ОФ. Для наглядности представим две эти группы расходов в разных таблицах 7, 8.

Таблица 7 Расходы основного потока ОФ

п/п	Обозначение потока	Значение, м ³ /ч	Источник данных
1	ВЭ	переменный	зависит от $L_{\text{в034}}$
2	ОФ	10,44	из трендов
3	Э1'	переменный	зависит от $L_{\text{в031}}$
4	Э1	7,76	из трендов
5	Э2'	переменный	зависит от $L_{\text{в032}}$
6	Э2	9,01	из трендов
7	ЭЗ'	переменный	зависит от $L_{\text{в033}}$
8	ЭЗ	10	из регламента

Как уже отмечалось выше, данные расходы формируют основной поток ОФ по КЭК и являются количественными параметрами для проверки адекватности модели, а также основными показателями качества при оценке систем стабилизации расхода ОФ по КЭК, что будет показано далее.

Таблица 8 Входные расходы, формирующие рабочий режим

п/п	Обозначение потока	Значение, м ³ /ч	Источник данных
1	ВФ1	1,99	из трендов
2	РФ1	1,99	из регламента
3	РФ2	0,72	из регламента
4	ПР1	0,72	из трендов
5	ПР23	8,39	из трендов
6	РР	8,39	из регламента

п/п	Обозначение потока	Значение, м ³ /ч	Источник данных
7	ПРЗ	0,11	из трендов
8	ПР24	0,22	из трендов
9	РФЗ	0,33	из регламента

Значения расходов, приведённых в таблице 8, позволяют задать режим работы всего КЭК. Для моделирования динамики процесса экстракции в имитационной модели КЭК необходимо изменение расходов рабочего режима во времени. Эти значения можно получить из трендов. Выберем временной интервал, достаточный для описания динамики основных процессов, протекающих в КЭК. Эмпирическим путём установили, что периода в 12 часов оказывается достаточно. В результате оцифровки и анализа трендов получили графики, представленные на рисунке 19 и составили приложение Б для задания рабочего режима в нашей модели.

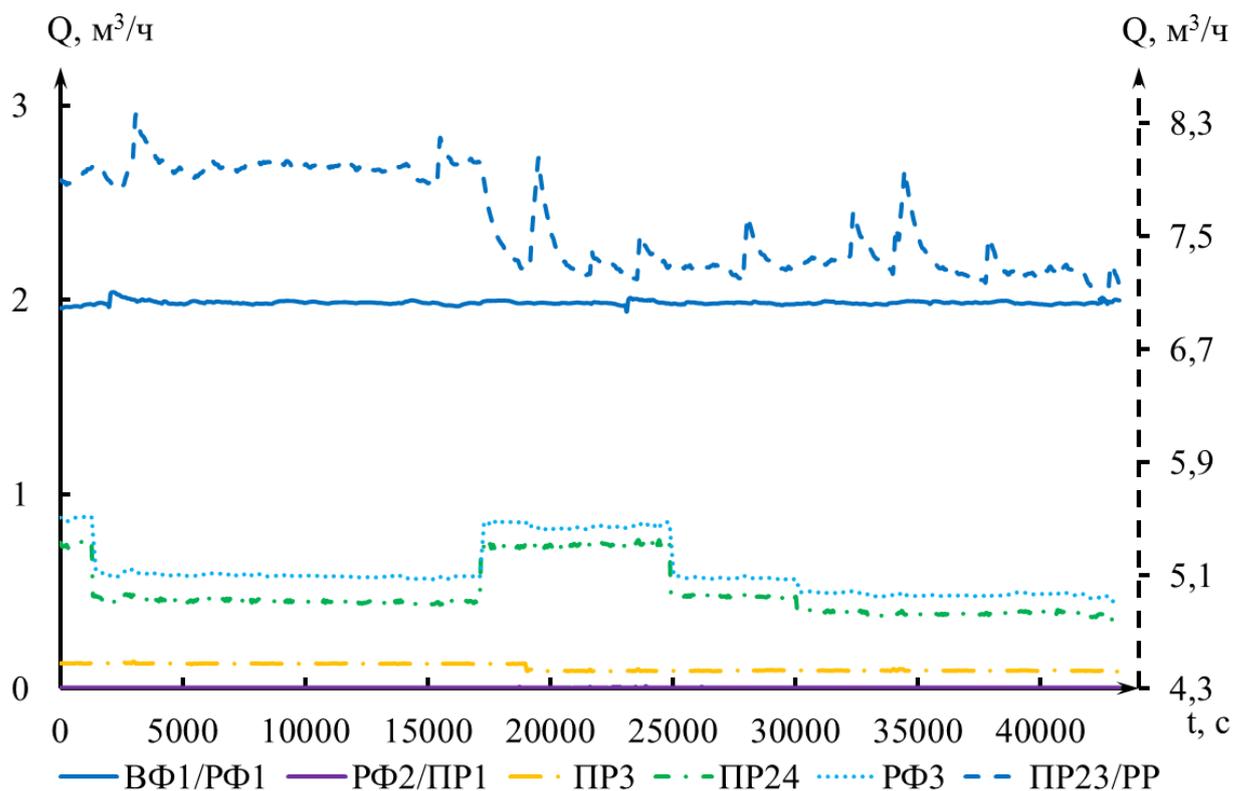


Рисунок 19 Основные расходы, формирующие рабочий режим

Перед тем как провести моделирование динамики и оценить адекватность, создадим модель КЭК из подготовленных ранее элементов БЕ и ЭК.

2.4.2 Создание модели каскада экстракционных колонн

Воссоздадим структуру КЭК, представленную на рисунке 6, используя созданные ранее имитационные модели БЕ и ЭК, рисунки 14, 18. Для моделирования инерционности аппаратов КЭК воспользуемся геометрическими характеристиками, представленными в таблице 9.

Таблица 9 Геометрические характеристики аппаратов КЭК

	Полный объём, V_n	Рабочий объём, V_p	Высота, h	Диаметр, d
	м ³	м ³	м	м
БС	30	25,5	6,67	2,58
ЭК-1	16,29	15,54	11,45	1,23
БЕ-1	1	0,8	2,23	0,81
ЭК-2	6,5	5,5	7,53	0,9
БЕ-1	1	0,8	2,23	0,81
ЭК-3	14,15	13,4	11,43	1,36
БЕ-1	1	0,8	2,23	0,81
ЭК-4	9,6	8,16	7,5	1,3

На основе полученных данных синтезируем имитационную модель КЭК. Используя данные расходов, представленных в приложении Б, зададим рабочий режим. Результат проделанной работы представлен на рисунке 20.

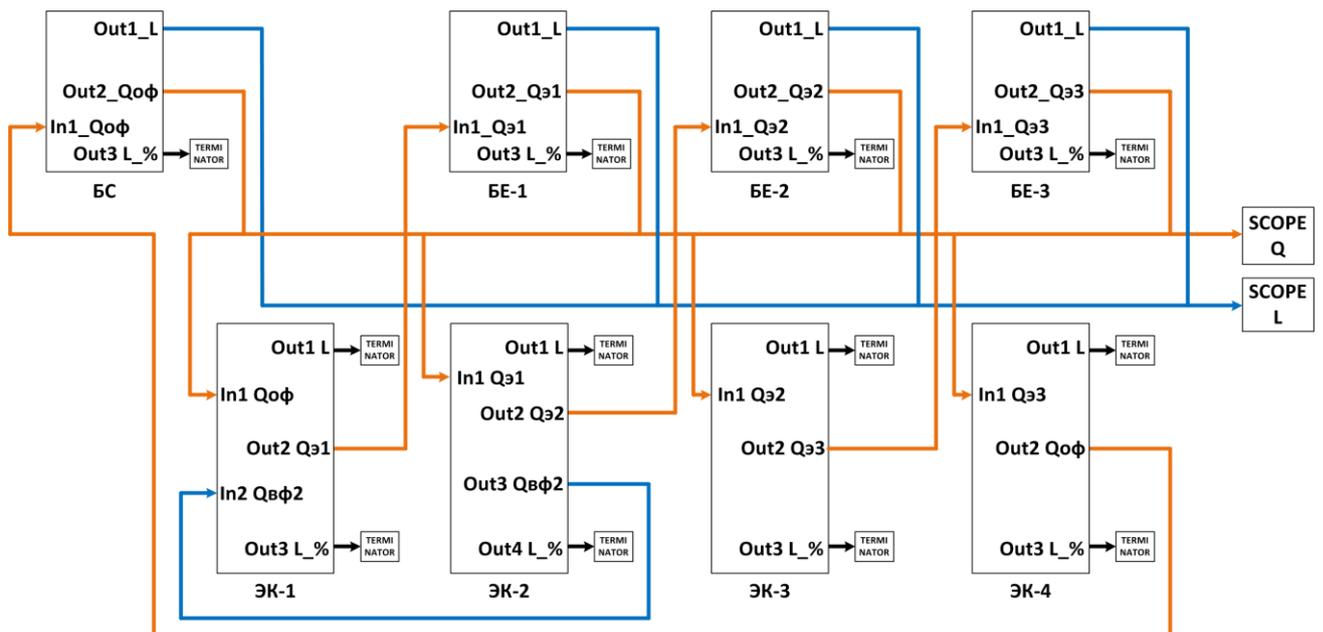


Рисунок 20 Структура имитационной модели КЭК в среде Simulink

В результате проделанной работы по созданию имитационных моделей был смоделирован процесс движения потока ОФ в КЭК. Структурная схема обобщённой модели представлена на рисунке 21.

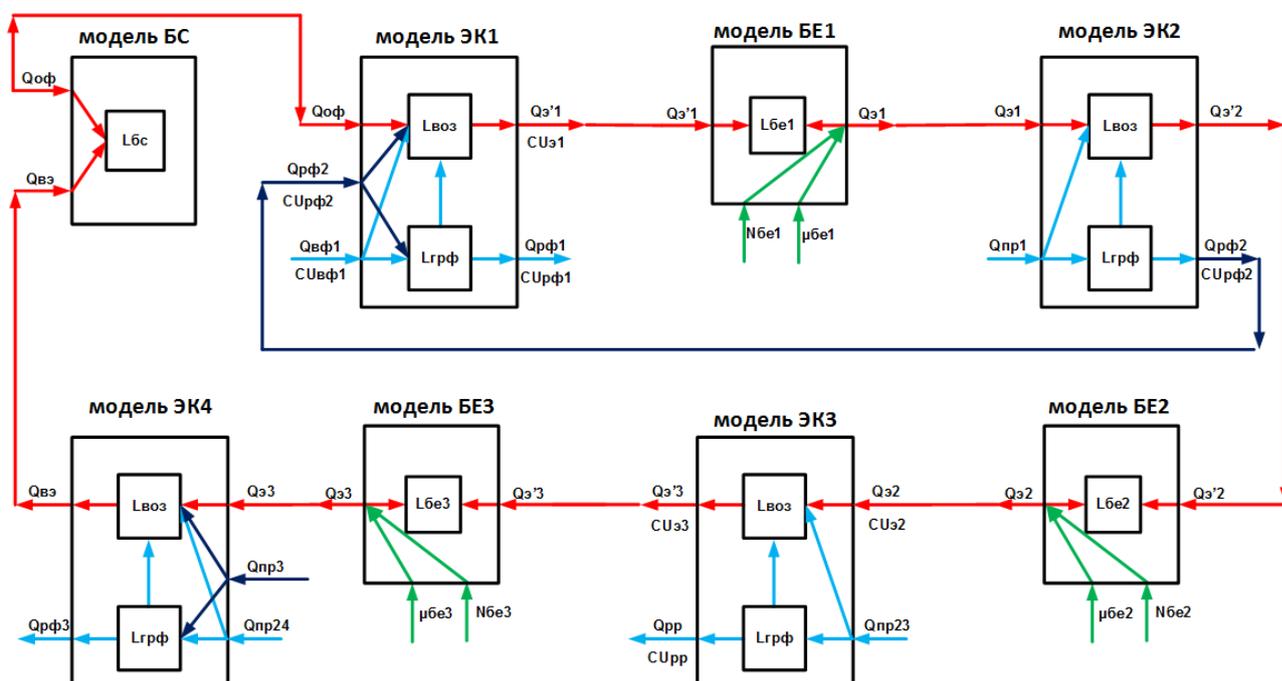


Рисунок 21 Структурная схема имитационной модели КЭК

2.4.3 Проверка адекватности модели каскада экстракционных колонн

Для оценки адекватности модели проведём сравнение трендов расходов, снятых на реальной установке с графиками, полученными при моделировании технологического процесса на имитационной модели КЭК. Процесс моделирования проходил в течение 12 часов модельного времени при параметрах модели: конечное время – 43200 с; тип шага – переменный; максимальный размер шага – 0,1; решатель – ode23tb (stiff/TR-BDF2); погрешность приближения – $1e-3$. Полученные данные моделирования использовали для сравнения с реальными данными. Полученный результат представлен на рисунке 22.

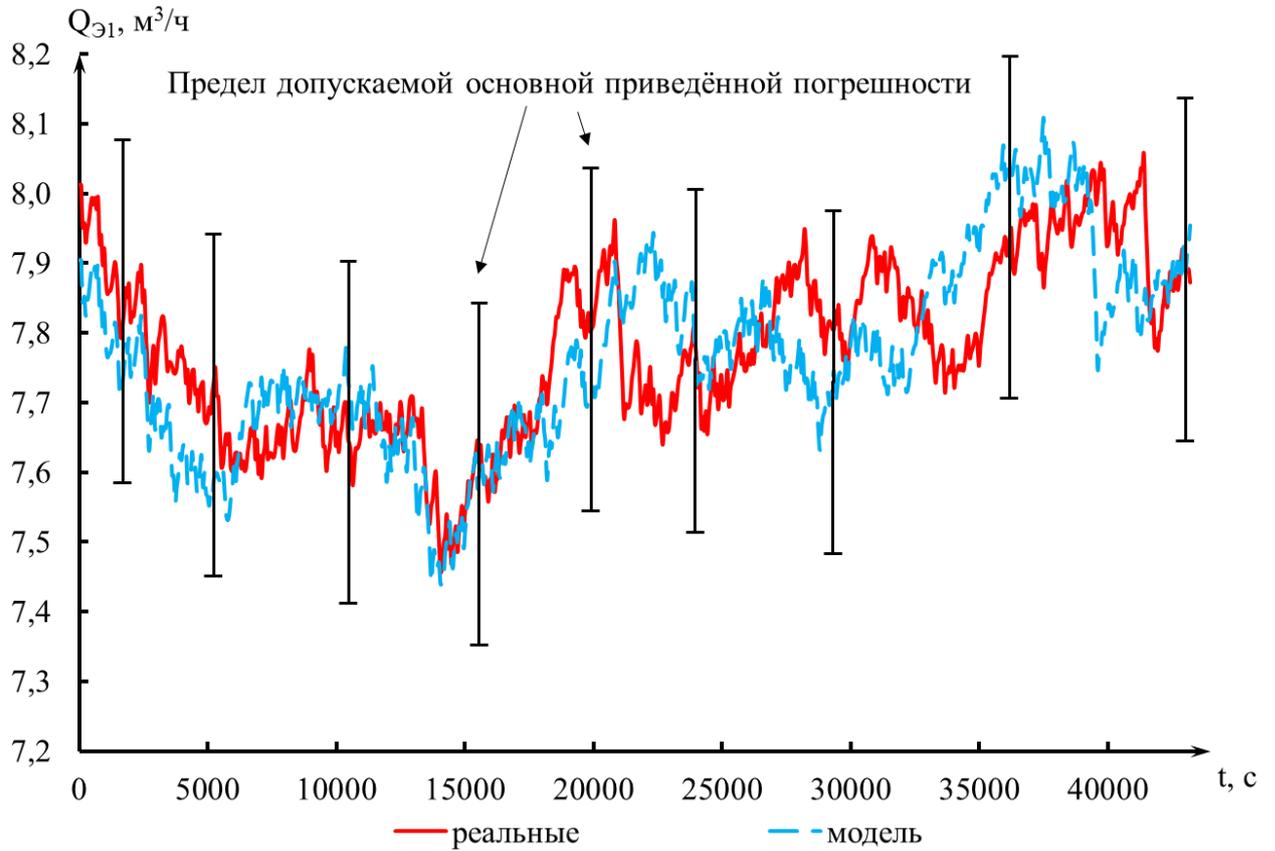


Рисунок 22 Сравнение модели с реальными данными

Среднеквадратичная погрешность между моделью и реальной установкой, приведенная к шкале прибора по расходу ОФ, составляет 3%, что не превышает погрешность прибора измерения расхода. Это говорит о том, что данную модель можно использовать для дальнейших исследований.

2.5 Выводы к главе

Создание математической модели является необходимым условием для синтеза САУ [57] и удобным инструментом, позволяющим обойтись без прямого воздействия на реальный объект исследования [30]. Синтез ССР ОФ не является исключением. Для создания модели потребовалось математическое описание технологических процессов, протекающих в структурных элементах КЭК. Ранее подобные исследования БЕ как технологического объекта управления не проводились [3, 11].

Использование современного имитационного подхода в моделировании [41, 43, 45, 57, 58, 59, 60, 61, 62] позволило с меньшей трудоёмкостью решить сложные задачи по исследованию динамики протекания процессов. Данный подход принципиально отличается от аналитического использованием ЭВМ. Преимущество имитационного моделирования в том, что оно не накладывает жестких ограничений на вид исходных данных. Оно позволяет применять весь объём собранной информации вне зависимости от ее формы представления и степени формализации (таблицы, матрицы, полиномиальные зависимости, передаточные функции, ОДУ и т.д.). Данное преимущество имитационного моделирования особенно актуально при моделировании БЕ из-за ограничений, связанных с исходными данными. После выбора типа модели были учтены ограничения и допущения, принятые при создании модели.

Следующим этапом было создание имитационной модели КЭК с созданием моделей каждого её элемента, БЕ и ЭК. Использование системы нечеткого вывода позволило снять ограничения на аппроксимацию классическими методами, связанными с недостатком экспериментальных данных. В отличие от других методов (полиномы, сплайны, и др.) нечеткая нейронная сеть позволила эффективно решить задачу аппроксимации экспериментальных данных, которые были представлены в виде разреженных матриц. Это позволяет говорить о нечеткой нейронной сети как об универсальном эффективном аппроксиматоре [17]. Каждая созданная модель проверялась на адекватность. Сравнение модели с

рабочей системой подтвердило адекватность предложенной модели [49]. Полученная модель КЭК воспроизводит процесс движения ОФ по всему каскаду колонн. Модель адекватна реальному процессу, и её погрешность меньше допустимой основной приведённой погрешности. Предложенная модель подходит для дальнейших исследований.

Математическая модель КЭК реализована в виде компьютерной программы в программном пакете Matlab (Simulink). Модель позволила провести исследования и опробовать режимы работы, которые проблематичны на реальной установке.

3 Система автоматизированной стабилизации органической фазы

Данная глава посвящена системе стабилизации расхода органической фазы в каскаде экстракционных колонн. В ней раскрываются этапы создания этой системы. Начинается глава с обзора существующих систем автоматизированного регулирования (САР) и разбора опыта предыдущих исследований. Далее проводится анализ существующей системы стабилизации ОФ с использованием имитационной модели, созданной в предыдущей главе. Затем предлагается альтернатива с последующим анализом. После анализа и поиска ограничений предложенная САУ дорабатывается с учётом этих ограничений. Обобщающим итогом является сравнение систем: действующей на установке и вновь предложенной. Результатом данной главы является создание ССР ОФ в КЭК.

3.1 Предпосылки создания системы стабилизации расхода органической фазы

Исследования установки экстракции как объекта автоматизации проводятся с 1984 года начиная с исследований, проводимых сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара, которые были направлены на разработку систем контроля и управления технологическим процессом в экстракционных колоннах установок «М-1345» и «УТЕС». Результаты этих работ легли в основу штатных систем контроля и управления.

3.1.1 Эволюция АСУТП производства оксидов урана на РХЗ

Процесс становления АСУТП на РХЗ проходил в несколько этапов: от простых релейных систем защиты до современной микропроцессорной системы, обеспечивающей полную поддержку производства.

19 августа 1961 года произошёл ввод первой очереди завода в эксплуатацию. Система контроля и управления технологическим процессом (СКУТП) РХЗ состояла из датчиков технологических параметров, первичных

преобразователей, вторичных приборов, релейных систем автоматического поддержания технологических параметров, средств регистрации и записи технологических параметров, кабельных трасс.

Следующий масштабный этап автоматизации произошёл в 1983 году с созданием схемы «УТЁС». С освоением схемы «УТЁС» на заводе была полностью создана высокопроизводительная, высокоэкономичная экстракционная схема переработки облученного ядерного топлива со своими кабельными трассами, новыми датчиками, первичными и вторичными приборами и дистанционным управлением технологической арматурой. Система автоматического регулирования технологических параметров была реализована на базе релейных бесконтактных регулирующих приборов (РП2-У3, Р-27) и аналоговых регуляторов (Р-17) [56]. Работа по созданию высокопроизводительной экстракционной схемы завода удостоена Государственной премии СССР за 1988 год.

С 1993 по 1994 год выполнен большой объём работ по обеспечению безопасности и повышению противоаварийной устойчивости производства, внедрена система аварийной сигнализации (САС). Система автоматического регулирования технологических параметров реализована на базе регулирующих микроконтроллеров «РЕМИКОНТ» Р-100 и Р-130.

В 1995 году внедрена первая очередь автоматической системы управления и контроля технологическим процессом (АСУТП) на базе Многофункциональной Инструментальной Комплексной Системы (MIK\$Sys). Система MIK\$Sys, предназначена для создания комплексов автоматизации производства на базе IBM PC - совместимых компьютеров, сетей компьютеров, микроконтроллеров УСО и их сетей. Отличительные особенности MIK\$Sys от аналогичных систем построения АСУ ТП следующие:

- используется векторная обработка данных, более эффективная, чем ссылочная;
- используется системно-ориентированный подход к построению компонентов и алгоритмов;

- используется жесткое тактирование выполнения функций резидентной задачей в противовес событийной ориентации, вызывающей перегрузку системы при массовых изменениях;
- работа с контроллерами, драйверами контроллеров и взаимодействие компонентов системы, каждый из которых функционирует асинхронно, осуществляется в основном через общую память, а не по специальным запросам;
- для построения сетевой АСУТП не требуется сетевое программное обеспечение верхнего уровня - достаточным является наличие поддержки протоколов IPX/SPX;
- в сетевой АСУ ТП могут использоваться ЭВМ разнородных архитектур при соблюдении протоколов обмена данными.

На базе MIK\$Sys создаётся централизованная АСУТП установки «УТЭС».

С 1997 по 2008 год проходил очередной этап в эволюции автоматизации радиохимического производства: совершенствуются системы управления ИМ в контурах автоматического регулирования (БРП заменяются ПСТ, а в дальнейшем ПСТ-М) [52, 53]; проходит серия НИР по исследованию экстракционных каскадов как объектов управления [3, 18, 54, 55]; строятся первые модели, используя научный подход при синтезе новых регуляторов.

С 2011 года по настоящее время создаётся новое производство по аффинажу урана. В качестве основного оборудования применены новые центробежные экстракторы ЭЦК-340 производства АО «НИКИМТ», г. Москва. На базе установки создаётся распределённая система АСУТП, модернизируется экстракционная установка. В качестве ИМ используется частотный привод.

3.1.2 Контрольно-измерительные приборы каскада экстракционных колонн

Состав контрольно-измерительных приборов, входящих в парк оборудования РХЗ, зависит от поддерживаемого параметра. Перечень датчиков, выдающих сигналы в контуры САР, приведен в таблице 10. Перечень

регулирующих исполнительных механизмов, используемых на РХЗ, приведён в таблице 11.

Таблица 10 Перечень датчиков, входящих в САР РХЗ

№ п/п	Контролируемый параметр САР	Датчики САР
1	Уровень в пульс-камере	НИОУ
2	Уровень в БЕ	НИОУ
3	Уровень ГРФ	УБ-Э
4	Давление	Сапфир-22М, МВМЭ-2, Метран-150
5	Расход	Yokogawa YEWFO DY, ADMAG AXF040, Krone UFM3030
6	Температура	ТСП, ТСМ
7	Концентрация	ПКМ, СКС-07П, Сирень

Таблица 11 Перечень исполнительных механизмов, входящих в САР РХЗ

№ п/п	Тип исполнительного механизма	Наименование
1	Электропривод типа А	Тулаэлектропривод типа «А»
2	Пневмоклапан	Samson 3777, 3510
3	Частотный преобразователь	Danfoss VLT FC-200

На рисунке 23 изображена типовая структурная схема САР, применяемая на РХЗ.

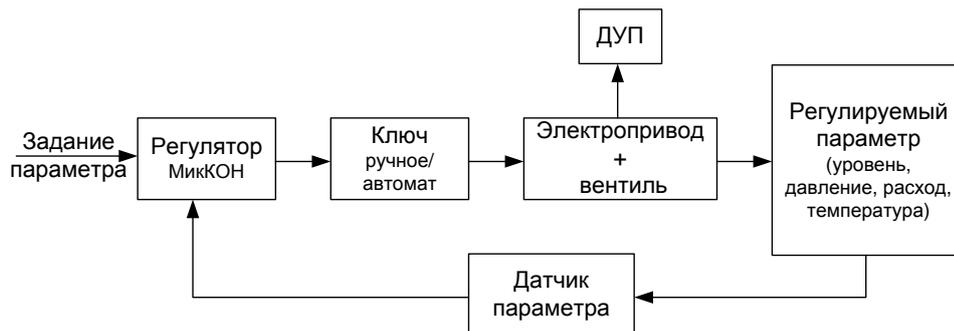


Рисунок 23 Типовая структурная схема САР

где:

- *задание параметра* задаётся оператором и выбирается исходя из оптимального режима работы технологического процесса;

- *ключ (ручное/автомат)* – механический переключатель, посредством которого оператор может отключить регулятор и вручную управлять исполнительным;
- *ДУП* – неотъемлемая часть электропривода, не участвующая непосредственно в регулировании, но показывающая положение исполнительного механизма (0÷100%).

Поддержание контролируемого параметра может производиться двумя способами:

- дистанционным/ручным управлением исполнительным механизмом (приводом) регулирующего вентиля (переключатель рода работ в положении “Дистанционное/ручное”). В этом случае оператор, анализируя показания регулируемого параметра, вручную управляет исполнительным механизмом, контролируя его движение по ДУПу;
- автоматическим управлением исполнительным механизмом (приводом) регулирующего вентиля (переключатель рода работ в положении “Автоматическое”).

В режиме автоматического управления величина регулируемого параметра сравнивается в регуляторе с величиной задания и на выходе регулятора формируется сигнал управления в соответствии с заложенным в него законом регулирования. Дистанционный указатель положения контролирует положение выходного вала исполнительного механизма.

На рисунке 24 представлена структура САР концентрации. Системы стабилизации концентрации продукта в зависимости от расхода подаваемого продукта построены по принципу двухконтурной САР.

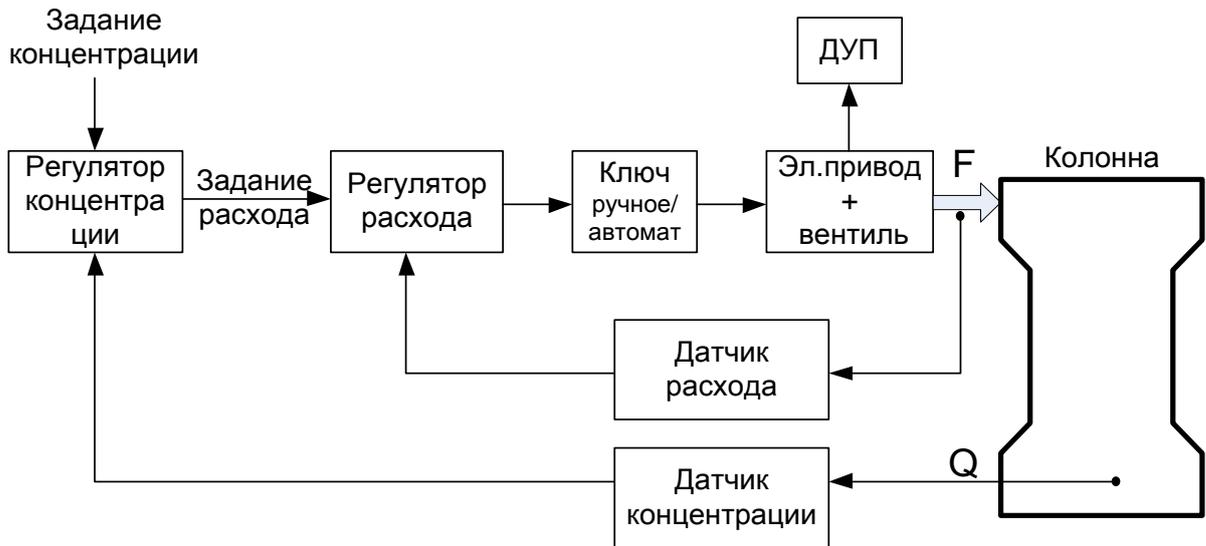


Рисунок 24 Структурная схема двухконтурной САР концентрации

Двухконтурные САР предназначены для поддержания заданной оператором концентрации путём регулирования расхода. Система состоит из двух контуров регулирования:

- контур регулирования расхода – это стандартная САР поддержания расхода. Его выходом являются импульсы управления на электропривод или степень открытия исполнительного механизма;
- контур регулирования концентрации – это система, которая измеряет текущую концентрацию продукта, сравнивает с концентрацией, заданной оператором, и вычисляет нужный расход. Таким образом, контур регулирования концентрации вычисляет задание для контура регулирования расхода.

Особенностью САР РХЗ является то, что сигнал управления исполнительным механизмом реализуется по закону широтно-импульсной модуляции (ШИМ), т.е. регулятор (МикКОН) выдаёт импульсы напряжения, модулированные по ширине. Таким образом, меняя ширину импульса управления, регулятор меняет время движения исполнительного механизма в сторону открытия или закрытия [51].

3.1.1 Системы автоматизированного регулирования каскада экстракционных колонн

На рисунке 25 и таблице 12 представлены САР основных параметров, регулируемых на установке КЭК.

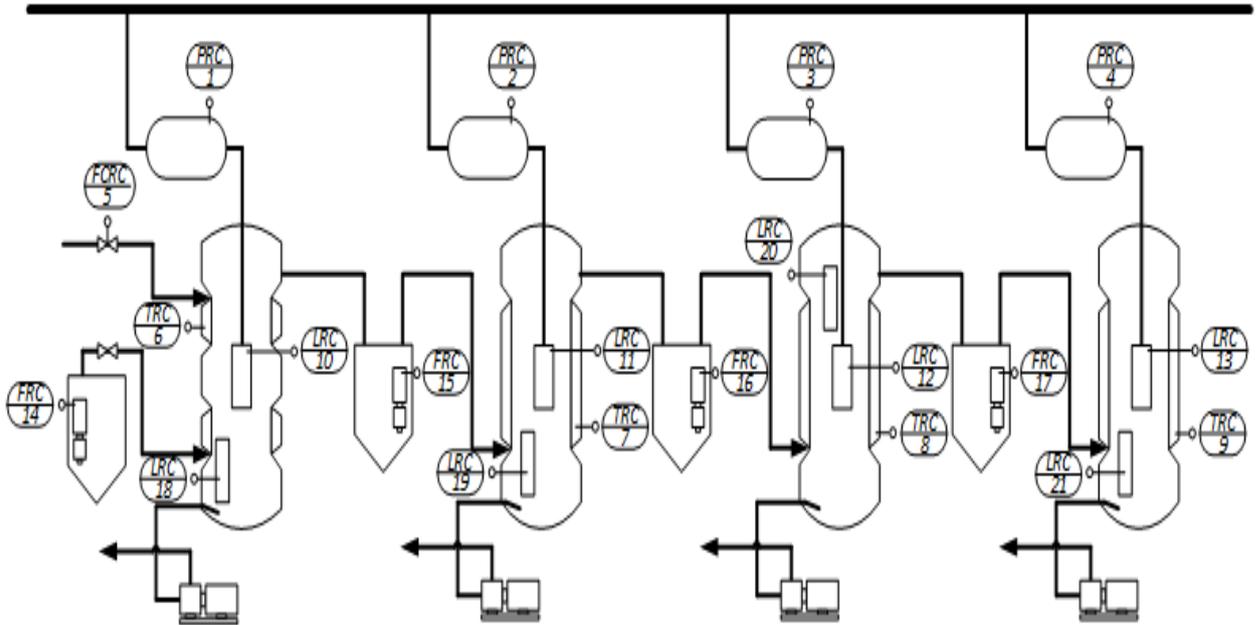


Рисунок 25 Схема используемых САР на КЭК

Таблица 12 Основные контролируемые параметры и их САР

№ САР на рисунке	Описание
1, 2, 3, 4	САР давления в ресиверах P1, P2, P3, P4
5	Двухконтурная САР концентрации/расхода ВФ1
6, 7, 8, 9	САР температуры в рубашках ЭК-1,2,3,4
10, 11, 12, 13	САР уровня в ПК1, ПК2, ПК3, ПК4
15, 16, 17	САР уровня в БЕ-1,2,3
18, 19, 20, 21	САР ГРФ в ЭК1, ЭК2, ЭК3, ЭК4

САР представляют собой группы систем, схожих по конструкции и технологии:

- САР давления в ресиверах;
- Двухконтурная САР концентрации и расхода ВФ1;
- САР температуры в рубашках;
- САР уровня в пульс-камере;
- САР уровня в БЕ-1,2,3;

- САР уровня ГРФ;

САР давления в ресивере.

САР давления предназначена для стабилизации давления в ресиверах. Она является разновидностью САР расхода. Различие заключается в том, что для САР давления расход подаваемого воздуха определяется по сигналу от датчика давления. В качестве датчиков измерения давления применяют МЭД, МВМЭ-2, САПФИР. Сигнал с датчика давления преобразуется в унифицированный нормирующим преобразователем НП-ПЗ и поступает на контроллер (МИККОН). Стабилизация давления осуществляется изменением количества подаваемого воздуха из общего коллектора, т.е. степенью открытия вентиля на входе ресивера. Чем больше открыт вентиль, тем больше давление в ресивере.

Согласование работы вентиля и регулятора происходит по следующей схеме:

- при повышении давления сигнал с датчика и преобразователя увеличивается, вентиль идёт на закрытие;
- при уменьшении давления сигнал с датчика и преобразователя уменьшается, вентиль идёт на открытие.

Стабилизация давления возможна тогда и только тогда, когда из ресивера есть расход воздуха, в противном случае из-за негерметичности вентиля давление в ресивере может увеличиваться до коллекторного.

Двухконтурная САР концентрации и расхода ВФ1.

Концентрация металла в растворе является основным показателем качества технологического процесса. Измерение концентрации производится следующими методами:

- метод прямого измерения концентрации с помощью контрольно-измерительных приборов (концентратомеры СКС, Сирень). Характеризуется непрерывностью измерений, высокой скоростью выполнения анализа (10÷60 сек), но невысокой точностью измерений. Результаты измерений с помощью концентратометров используются в работе САР концентрации;

- метод пробоотбора с последующим лабораторным анализом в химической лаборатории. Характеризуется высокой точностью измерений, большим временем выполнения анализа и низкой периодичностью выполнения (1 раз в смену). Результаты измерений концентрации данным методом используются для аттестации конечного продукта и для корректировки показаний концентратомеров.

САР концентрации предназначена для автоматического поддержания заданной концентрации металла растворе на выходе из технологического узла путём регулирования расхода исходного продукта на входе. Таким образом, САР концентрации управляет в автоматическом режиме САР расхода. Особенности технологии таковы, что регулирование производится только расходом ВФ, а расход ОФ стабилизируется на заданном уровне.

САР концентрации работает следующим образом: при повышении концентрации металла на выходе система будет уменьшать задание для САР расхода ВФ1. В случае понижения концентрации металла, САР концентрации должна увеличивать подачу расхода ВФ1. Особенностью таких систем является то, что САР расхода обладает в несколько раз меньшей инерцией, чем САР концентрации. Поэтому регулятор концентрации будет менять задание расхода незначительно.

САР температуры.

Процессы, проходящие в колоннах и выпарных аппаратах, требуют поддержания температуры в рамках, определенных регламентом. Это продиктовано зависимостью вязкости ОФ и концентрации упаренного реэкстракта от температуры. За стабилизацию температурных процессов в каскаде отвечает САР температуры.

В качестве датчиков измерения температуры применяют термосопротивления ТСП. Сигнал с датчика, преобразованный нормирующим преобразователем НП5-Б2 в унифицированный, поступает на контроллер

(МИККОН). В роли исполнительных органов используются регулирующие вентили на паре и на воде, которые или охлаждают, или нагревают аппарат.

Особенностью систем стабилизации температуры является их большая инерционность за счёт удалённости расположения датчиков, больших объёмов аппаратов и инерции процесса теплообмена. Также особенностью является влияние давления пара (воды) до регулирующего вентиля, причём колебания этого давления могут привести к нестабильной работе системы стабилизации температуры, т.к. регулятор настраивается под большую постоянную инерцию теплообмена, а изменение давления в коллекторе вызовет резкое изменение температуры пара (воды). В этом случае регулятор не успеет отработать это возмущение и может потребоваться помощь аппаратчика.

САР уровня в пульс-камере.

Для интенсификации процесса экстракции осуществлен дополнительный подвод энергии сжатого воздуха через встроенные пульс-камеры (ПК). Пульсация в колоннах необходима для дробления на капли сплошной и дисперсной фаз. Эффективность экстракции (реэкстракции) зависит от размеров капель фаз и, следовательно, от гидродинамического режима работы пульс-камеры. Для стабилизации уровня в ПК и используются системы автоматического регулирования. От устойчивости работы САР уровня в ПК зависят качественные показатели работы колонн: коэффициенты очистки и разделения. Схема работы САР уровня в ПК представлена в приложении В.

Основное предназначение САР уровня в ПК – удержание раствора в пределах геометрических размеров пульс-камеры. Рассмотрим два случая:

- повышение уровня в пульс-камере приводит к срыву пульсации в колонне, а именно к прекращению поступления энергии в экстракционную зону. Как следствие этого резко увеличивается размер капель дисперсной и сплошной фаз, водная фаза становится сплошной и «вываливается» в нижнюю отстойную зону колонны – повышается уровень границы раздела фаз (ГРФ),

падает задержка дисперсной фазы (ЗДФ), процесс экстракции (реэкстракции) прекращается;

- понижение уровня раствора ниже границы пульс-камеры приводит к срыву пульсации в колонне. Сжатый воздух начинает выходить за пределы пульс-камеры в рабочую зону экстракционной колонны. Противоточное движение фаз прекращается, начинается барботаж, процесс экстракции (реэкстракции) прекращается.

Для САР уровня в ПК накладывается дополнительное требование – стабилизация уровня в ПК. При больших колебаниях уровня в пульс-камере (20-80% по датчику НИОУ) увеличивается количество энергии, передаваемое в систему. Это приводит к следующим последствиям: росту продольного перемешивания в рабочей зоне колонны, уменьшению размеров капель в фазах, ухудшению расслаивания фаз, размытию фронта концентрации металла, к началу уноса водной фазы в органику и органики в водную. Это негативно отражается на технологическом процессе. Также на процесс роста перемешивания значительно влияет то, в какой области пульс-камеры поддерживается уровень (20-40% по шкале НИОУ, либо 70-90% шкалы НИОУ).

Отличительной особенностью САР уровня в пульс-камере является большая скорость изменения уровня, т.е. при незначительном изменении положения регулирующего вентиля (по ДУП $1 \div 2$ %), подающего сжатый воздух в пульс-камеру, уровень в пульс-камере изменится резко ($\sim 1 \div 2$ с) и значительно (10 \div 20 % шкалы НИОУ). Второй отличительной особенностью САР уровня в ПК является её зависимость от величины давления в ресивере и от качества работы САР стабилизации давления в ресивере, поэтому перед настройкой САР уровня в ПК необходимо настроить САР давления в ресивере. Два этих параметра, регулируемых САР, находятся в большой зависимости от количества воздуха, сдуваемого из пульс-камеры.

САР уровня в БЕ.

Основное предназначение САР уровня в БЕ – не допустить переполнения колонны. В качестве датчика уровня в БЕ используется датчик НИОУ-1Д нейтронного индикатора отклонения уровня. Работа САР и согласование регулятора с вентилем производится аналогично САР уровня ГРФ.

В БЕ необходимо поддерживать уровень (соответственно с расходами ВФ и ОФ), чтобы не допустить его опорожнения.

ВН, БС и БЕ образуют систему динамической стабилизации потока ОФ по КЭК, что является основным требованием ведения технологического процесса. Задача этой системы – сгладить модуляцию потока ОФ, возникающую в результате неустойчивости пульсаций в колоннах.

САР уровня ГРФ.

Важнейшую роль в динамической стабилизации потока ОФ по КЭК играет САР уровня ГРФ, приложение В. Основное назначение САР уровня ГРФ – стабилизация уровня границы раздела фаз в нижней отстойной зоне колонны (для ЭК-3 в верхней отстойной зоне) на заданном уровне путем постоянной откачки водной фазы. Это позволяет обеспечить равномерное поступление ОФ через сливную воронку в БЕ-1,2,3. Поддержание уровня ГРФ осуществляется с помощью управления производительностью выносного насоса ВН-1, 2, 3, 4. В качестве прибора измерения уровня ГРФ используется уровнемер буйковый УБ-Э.

Рассмотрим два крайних случая положения ГРФ:

- ГРФ слишком высока (горит сигнализатор верхнего уровня).

Технологической особенностью процесса экстракции, проводимого в системах жидкость – жидкость является образование третьей фазы («медузы»), скапливающейся на поверхности ГРФ. Значительное повышение уровня ГРФ может привести к дроблению медузы на тарелках реакционной зоны колонны, что приведет к резкому ухудшению коэффициентов очистки. При повышении уровня ГРФ повышается общий уровень растворов в колонне, увеличивается поток ОФ в

БЕ и далее на следующую колонну и т.д. по всему каскаду колонн. Таким образом, по каскаду прокатывается волна возмущения, изменяющего скорость движения ОФ, и процесс дестабилизируется.

- ГРФ ниже требуемого уровня (горит сигнализатор нижнего уровня). В этом случае происходит попадание ОФ в агрегат выносного насоса ВН, что приводит к потерям ОФ с водно-хвостовыми растворами. Общее понижение уровня в колонне приводит к прекращению перелива и осушению БЕ, а значит, прекращению поступления органики в следующую колонну. Таким образом, по каскаду опять прокатывается волна возмущения, изменяющего скорость движения органической фазы.

Отличительной особенностью САР уровня ГРФ является большая инерционность системы из-за больших размеров колонн. Проявляется это в том, что при изменении положения регулирующего вентиля система отреагирует не сразу, а с большой задержкой (порядка нескольких минут).

Выводы, которые можно сделать из вышеизложенного обзора систем автоматического регулирования КЭЖ, заключается в том, что при общем понимании проблемы стабилизации ОФ, не было создано законченной системы стабилизации расхода органической фазы (ССР ОФ), а стабилизация ОФ по КЭЖ проходила за счёт САР уровня ГРФ и САР уровня в БЕ, в которых расход ОФ являлся косвенным параметром. Это и послужило предпосылками для создания ССР ОФ как отдельной системы.

3.2 Система стабилизации расхода органической фазы

Первыми попытками создания ССР ОФ стали работы, проводимые сотрудниками кафедры электроники и автоматики физических установок Национального исследовательского Томского политехнического университета: Ливенцовым С.Н., Лысенком А.А., Горюновым А.Г., Зеленецкой Е.П. Исследования были направлены на разработку систем автоматизированного управления технологическими процессами экстракционного каскада, включающими и ССР ОФ. Основной идеей данных исследований было сглаживание колебаний расхода экстрагента путём изменения алгоритма функционирования системы автоматического регулирования уровня с исполнительным механизмом «типа А» в буферных ёмкостях БЕ-1,2 так, чтобы амплитуда колебаний выходного расхода была меньше амплитуды колебаний входного расхода, допустив при этом изменение уровня в ёмкостях в пределах, определяемых положениями сигнализаторов [3].

3.2.1 Описание исходной системы стабилизации расхода органической фазы

Исходная ССР ОФ в буферной ёмкости представлена на рисунке 26. ОФ поступает в ёмкость порциями. Частота поступления органической фазы ($ОФ_{ВХ}$) и объем перекачиваемой жидкости не постоянны. Как отмечалось выше, для качественной экстракции необходимо равномерное поступление ОФ в следующую колонну. Задача ССР ОФ состоит в том, чтобы стабилизировать выходной расход ОФ.

Насос работает в номинальном режиме, выдавая нерегулируемый расход потока ОФ. Управление потоком выкачиваемой жидкости ($ОФ_{ВЫХ}$) производится с помощью вентиля, который управляется исполнительным механизмом постоянной скорости 3 [10]. В данной системе применяется датчик измерения и контроля уровня 1. Отфильтрованный сигнал с датчика $L_{БЕ}$ через фильтр Φ и значение уставки G_L поступают на вход цифрового регулятора P_L [10].

Управляющее воздействие пропорциональное сигналу рассогласования выдается регулятором на ИМ для дальнейшего управления вентилем.

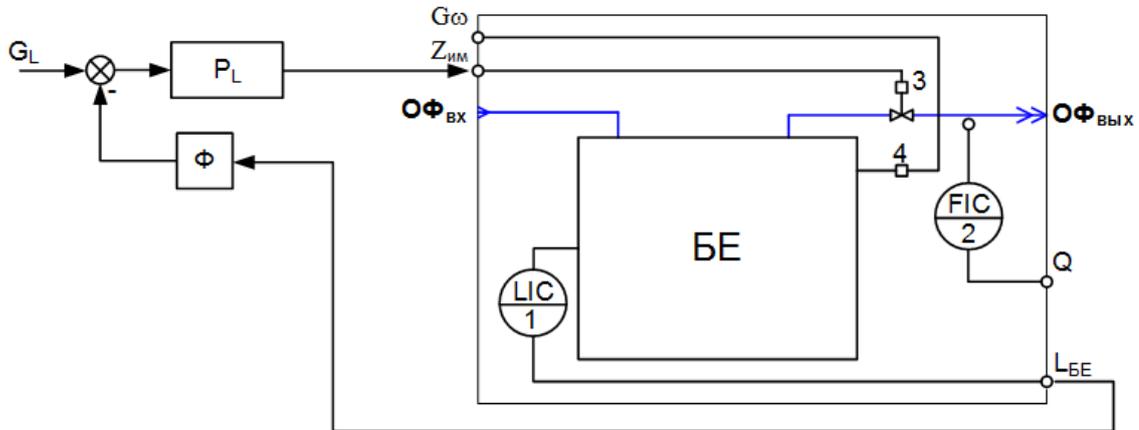


Рисунок 26 Исходная система стабилизации расхода ОФ в БЕ

где: ОФ – поток органической фазы; L_{BE} – уровень в буферной ёмкости; G_L – уставка уровня; Q – расход; G_ω – уставка частоты вращения двигателя насоса; P_L – регулятор уровня; Φ – фильтр; 1 – измерение и контроль уровня; 2 – измерение и контроль расхода; 3 – исполнительный механизм постоянной скорости («тип А») с устройством управления (ПСТ); 4 – устройство управления насосом (частотный преобразователь).

САУ настроена с использованием методики, представленной в работе [3], как система, демпфирующая входной расход $O\Phi_{ВХ}$, с коррекцией уровня L_{BE} , рисунок 27 .

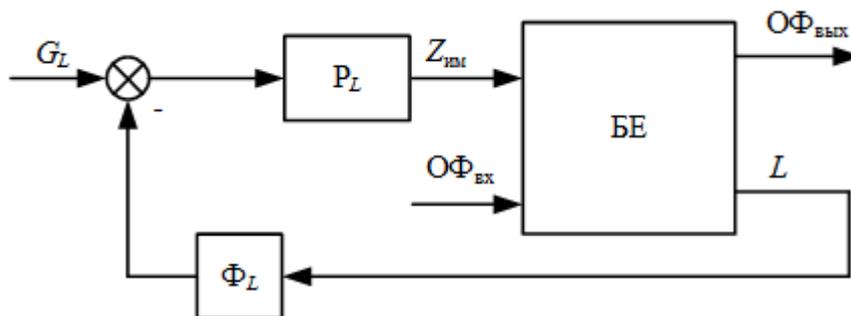


Рисунок 27 Структурная схема исходной ССР ОФ

Регулятор уровня P_L представляет собой ПДД²-регулятор, который совместно с широтно-импульсным модулятором (ШИМ) и ИМ формирует ПИД-закон регулирования [10, 74].

Экспериментально подтверждено [10], что ПДД²-ШИМ удовлетворительно аппроксимирует ПИД-закон в очень узкой области параметров его настройки, обеспечивая приемлемое качество регулирования. В остальных же случаях качество регулирования неудовлетворительное. Попытки улучшить качество регулирования за счет оптимизации параметров настройки регулятора не дают положительного результата. Кроме этого, контур управления с ИМ может не обеспечивать требуемой точности и качества управления в результате существенного выбега вала ИМ [75, 76, 77].

Также следует отметить, что регулирование потока жидкости происходит открытием и закрытием вентиля посредством ИМ, в то время как электродвигатель постоянно вращает вал насоса с номинальной частотой. В этом случае вся система, насос и ИМ работают с меньшим КПД, в результате чего уменьшаются сроки текущего и капитального ремонтов [7].

ССР ОФ должна обеспечивать демпфирование расхода жидкости на выходе БЕ не менее 200 с при колебаниях уровня в заданных границах (20÷70%).

3.2.2 Исследование исходной системы стабилизации расхода органической фазы на модели

Для анализа ССР ОФ использовалась компьютерная модель, описанная в главе 2, учитывающая нелинейные характеристики ИМ, дроссельной заслонки и насоса. При моделировании предложенной САУ использовались параметры регулятора, представленные в таблице 13.

Таблица 13 Параметры регулятора исходной САУ

коэффициент передачи (K_{Π})	0,25
время интегрирования ($T_{\text{и}}$), с	200
минимальная длительность импульсов ШИМ ($Z_{\text{ИМ}}$), с	0,1
время цикла регулятора ($T_{\text{ц}}$), с	5

В результате были получены данные, представленные на рисунках 28, 29 и таблице 14.

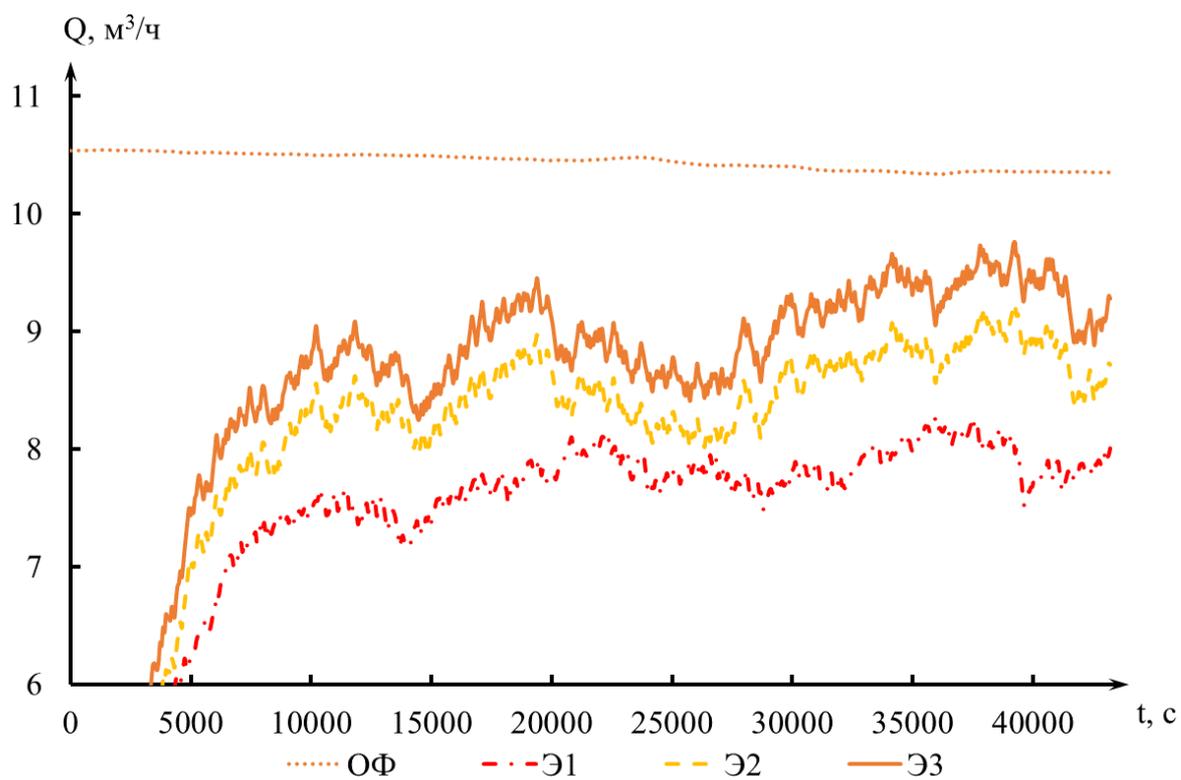


Рисунок 28 Значения расходов в КЭЖ при работе исходной ССР ОФ

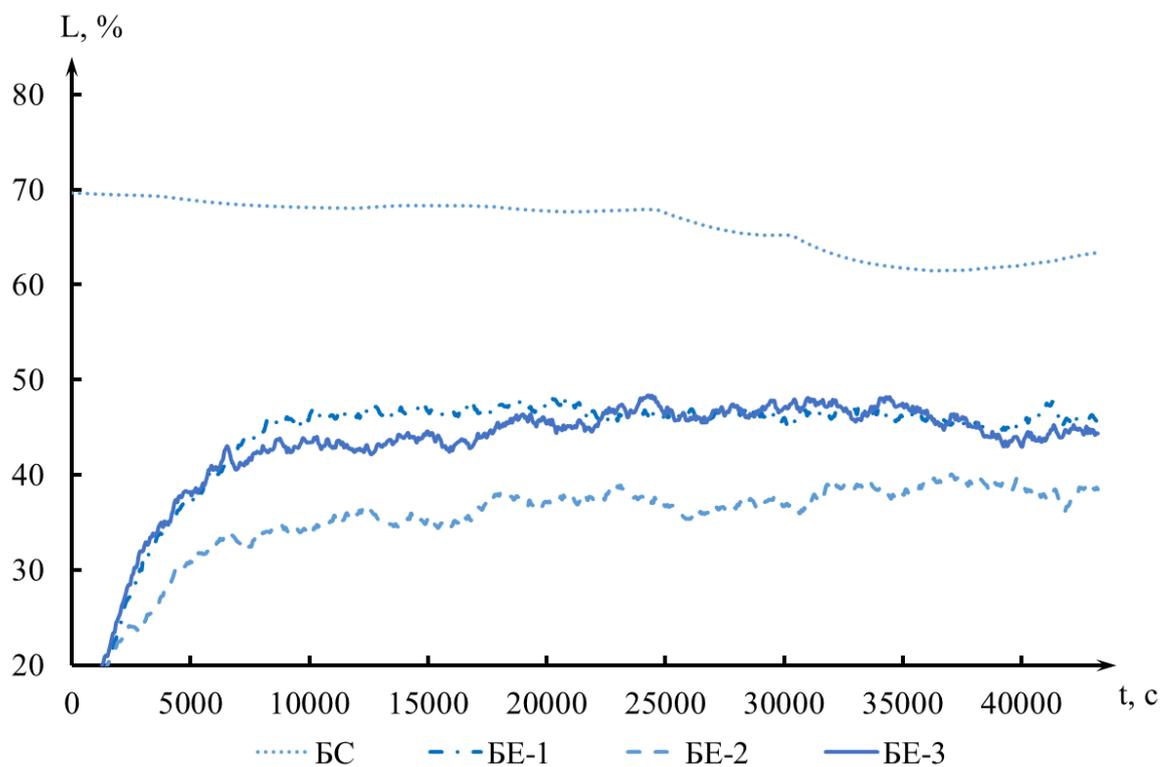


Рисунок 29 Значения уровня в КЭЖ при работе исходной ССР ОФ

Таблица 14 Данные анализа исходной ССР ОФ

	Q_{OF}	$Q_{Э1}$	$Q_{Э2}$	$Q_{Э3}$	L_{BC}	L_{BE-1}	L_{BE-2}	L_{BE-3}
	$m^3/ч$				$\%$			
Среднее, \bar{x}	10,43	7,78	8,53	9,01	65,90	46,46	37,03	45,51
Минимум, min	10,20	0,06	3,98	3,98	60,80	5,96	13,40	6,88
Максимум, max	10,68	11,61	12,00	12,00	69,68	89,28	70,60	83,20
Амплитуда, A	0,48	11,54	8,02	8,02	8,87	83,32	57,20	76,32
Дисперсия, δ	0,01	6,21	10,55	10,55	8,33	157,59	138,98	256,72
СКО, σ	0,09	2,50	3,26	3,26	2,88	12,77	11,84	16,13

Из представленных данных видно, что регулятор уровня, настроенный как фильтр нижних частот, оказывает минимальное воздействие на расход. Однако хорошо справляется с задачей стабилизации уровня. Данные результаты наглядно показывают, что ССР ОФ, основанная на регуляторах уровня, не обеспечивает требуемого качества стабилизации расхода и необходим более эффективный способ демпфирования величины расхода.

3.3 Двухконтурная адаптивная система стабилизации расхода органической фазы

Решить задачу качественной стабилизации расхода с применением САУ с исполнительными механизмами постоянной скорости затруднительно по причине недостаточного быстродействия и низкой точности последних. Поэтому была предложена схема управления расходом с применением частотного управления погружными центробежными насосами. Такой подход должен обеспечить решение задачи стабилизации расхода в КЭЖ, а также позволит значительно снизить затраты по электроэнергии и продлить ресурс работы насосов.

3.3.1 Синтез новой системы стабилизации расхода органической фазы

Предлагаемая система строится на основе адаптивного регулятора с ПИД-законом, на входы которого подаются сигнал задания (уставки) и сигналы с датчиков расхода и уровня. Адаптивная система управления – это система, которая в процессе эволюции и функционирования демонстрирует способность к целенаправленному приспособляющемуся поведению в сложных средах. Адаптивная система может приспособляться к изменениям как внутренних, так и внешних условий [32].

Данный регулятор относится к классу адаптивных систем управления с самонастройкой. В нашем случае в соответствии с изменениями внешней среды меняются значения параметров системы. Регулятор формирует управляющий сигнал для преобразователя частоты, который за счет изменения скорости вращения двигателя поддерживает управляемую величину (расход), равную значению уставки [7].

Принципиальная схема предлагаемой ССР ОФ представлена на рисунке 30. В этой системе управление расходом производится посредством насоса, управляемого частотным преобразователем (ЧП). Вентиль предлагается установить в определенном фиксированном положении и изменять поток

органической фазы посредством изменения частоты вращения асинхронного двигателя.

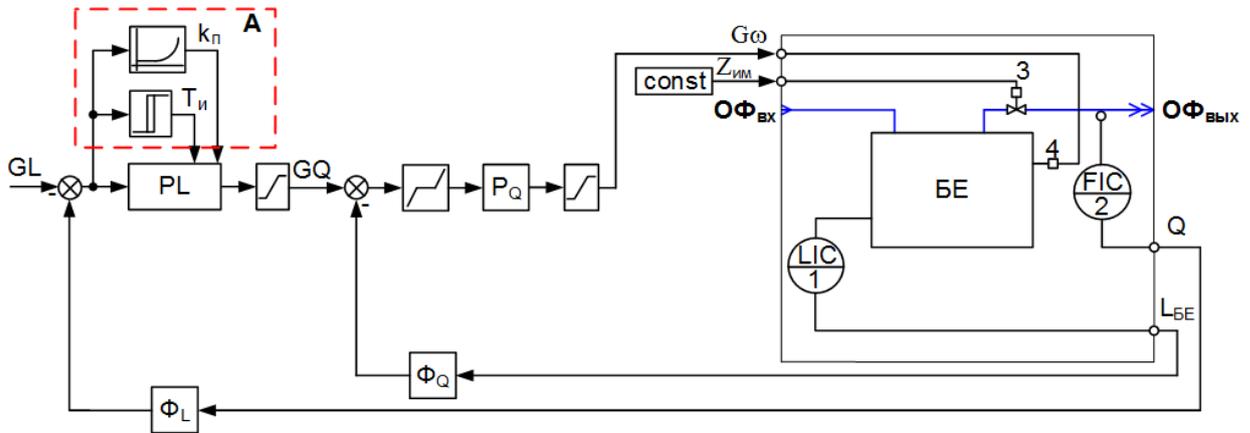


Рисунок 30 Предлагаемая система стабилизации расхода ОФ в БЕ

Предлагаемая ССР ОФ представляет собой двухконтурную систему управления. Внутренний контур системы отвечает за регулирование выходного расхода, внешний контур за управление уровнем. Измерение уровня $L_{БЕ}$ и выходного расхода $Q_{ВЫХ}$ производится при помощи датчиков измерения и контроля уровня 1 и расхода 2 соответственно. Сигнал с датчика уровня через фильтр Φ_L и значение уставки G_L поступают на ПИ-регулятор уровня P_L в виде сигнала рассогласования между ними. Аналогично сигнал с датчика расхода через фильтр Φ_Q и уставка G_Q поступают на вход ПИ-регулятора расхода P_Q . Сигнал с регулятора расхода поступает на устройство управления насосом 4 (частотный преобразователь), которое согласно значению входного сигнала изменяет частоту вращения двигателя насоса.

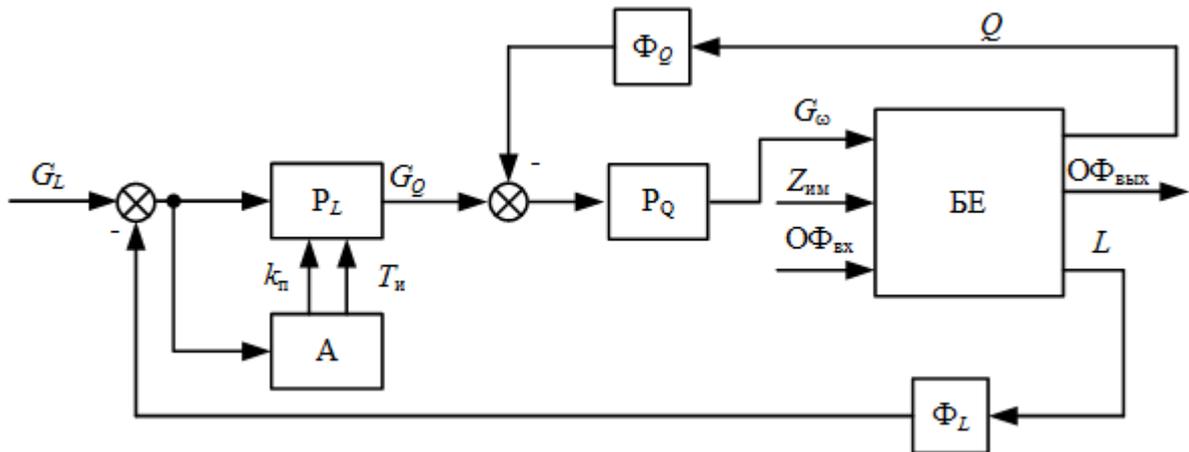


Рисунок 31 Структурная схема предлагаемой ССР ОФ

$$W_{RQ}(s) = \frac{1}{T_{ж}s + 1}, \quad (31)$$

где $T_{ж} = 60$ с – желаемая постоянная времени контура расхода $ОФ_{ВЫХ}$, $W_{RQ}(s)$ – замкнутая передаточная функция контура расхода $ОФ_{ВЫХ}$. Параметры настройки ПИ-регулятора, полученные из выражения (31):

$$\begin{cases} k_n = \frac{T_n}{K_{\omega} K_Q T_{ж}} = 0,4, \\ T_n = T_n = 60 \text{ с} \end{cases}, \quad (32)$$

Внешний контур управления уровнем жидкости в БЕ $L_{БЕ}$ включает передаточную функцию $W_{БЕ}(s)$:

$$W_{БЕ}(s) = \frac{1}{T_{БЕ}s}, \quad (33)$$

где $T_{БЕ} = 1600$ с – постоянная времени БЕ, коэффициент передачи датчика уровня $K_y = 100/0,17$ (%/м), а также и передаточную функцию регулятора уровня $W_{RL}(s)$.

Как уже отмечалось выше, преимуществом новой системы является то, что при небольших возмущениях по входному расходу $Q_{ВХ}$ внешний контур уровня настраивается как фильтр нижних частот. Раскроем данную тему более подробно.

Упростим линейную модель САУ БЕ, представленную на рисунке 32. В результате получим упрощенную линейную модель, представленную на рисунке 33.

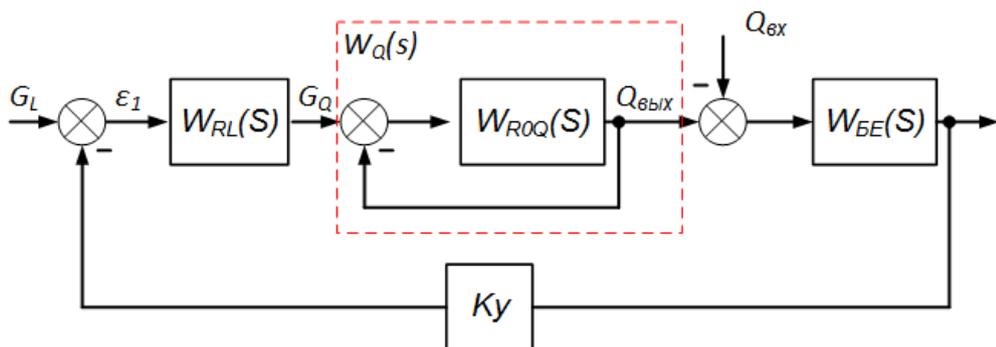


Рисунок 33 Упрощенная линейная модель САУ БЕ

Преобразуем полученную линейную модель так, чтобы входом была переменная $Q_{ВХ}$, а выходом уставка расхода G_Q . В результате получим схему, представленную на рисунке 34.

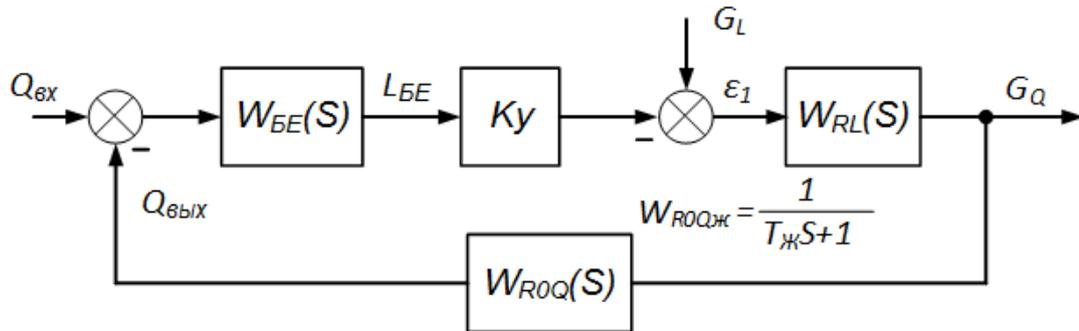


Рисунок 34 Представление линейной модели САУ БЕ относительно уставки G_Q

Внешний контур уровня настраивается как фильтр нижних частот:

$$\frac{G_Q}{Q_{ВХ}} = \frac{1}{T_{ЖФ}S + 1}, \quad (34)$$

Найдём передаточную функцию для внешнего контура уровня:

$$(Q_{ВХ} - Q_{ВЫХ})W_{БЕ} = L, \quad (35)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = G_L - LK_y \\ \varepsilon_1 W_{RL} = G_Q \end{cases}, \text{ при } G_L=0 \quad (36)$$

$$L = -\frac{G_Q}{K_y W_{RL}}, \quad (37)$$

$$G_Q W_{RL} = Q_{ВЫХ}, \quad (38)$$

$$(Q_{ВХ} - G_Q W_{РОQ})W_{БЕ} = -\frac{G_Q}{K_y W_{RL}}, \quad (39)$$

$$Q_{ВХ}W_{БЕ} = G_Q \left(W_{РОQ}W_{БЕ} - \frac{G_Q}{K_y W_{RL}} \right), \quad (40)$$

$$\frac{G_Q}{Q_{ВХ}} = \frac{K_y W_{RL} W_{БЕ}}{W_{РОQ} W_{БЕ} - 1}, \quad (41)$$

$$W_{RL}(s) = \frac{W_{Ж} W_{РОQ} W_{БЕ} - W_{Ж}}{K_y W_{БЕ}}, \quad (42)$$

$$W_{RL}(s) = \frac{W_{ЖФ} W_{R0Q} W_{БЕ} - W_{ЖФ}}{K_y W_{БЕ}}, \quad (43)$$

$$W_{RL}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{(T_d s + 1)} + \frac{1}{(s T_{ЖФ} + 1)}, \quad (44)$$

При малых отклонениях уровня дифференциальной составляющей можно пренебречь. Интегральная составляющая ПИ-регулятора практически отключается путем установки большой постоянной времени интегрирования, порядка 2000 с, это связано с особенностями промышленного контроллера. Тогда, $T_{ЖФ} = 35$ с – желаемая постоянная времени фильтра, $W_{RL}(s)$ – замкнутая передаточная функция контура стабилизации уровня $L_{БЕ}$. Параметры настройки ПИ-регулятора с постоянной времени фильтра $T_{Ф}$, полученные из выражения (44):

$$\begin{cases} K_p = \frac{T_{БЕ}}{K_L K_y T_{ЖФ}} = -0,4 \\ T_{Ф} = T_{ЖФ} = 35 \text{ с} \end{cases}, \quad (45)$$

При больших возмущениях по входному расходу $Q_{ВХ}$ внешний контур уровня настраивается как контур стабилизации уровня жидкости в БЕ. Регулятор расхода $W_{RL}(s)$ может быть настроен в этом случае методом оптимального модуля [80] с коэффициентом передачи $k_{П} = -1,2$ и постоянной времени интегрирования $T_{И} = 300$ с.

Непрерывный расчет параметров настройки ПИ-регулятора уровня жидкости в БЕ реализуется следующим образом:

$$\begin{cases} T_{и} = 300 \text{ с}, |\varepsilon| \geq 30\% \\ T_{и} = 2000 \text{ с}, |\varepsilon| < 10\% \\ T_{и} = T_{и}(t - T_{ц}), 10 < |\varepsilon| < 30 \\ k_{п} = -0,0005 \varepsilon^2 \\ k_{п} = -0,4, k_p > -0,4 \\ k_{п} = -1,2, k_p < -1,2 \end{cases}, \quad (46)$$

где $T_{ц}$ – время цикла регулятора расхода.

Для адаптера, описываемого системой уравнений (46), малыми отклонениями уровня являются отклонения менее 10%, большими – более 30%.

При малых отклонениях интегральная составляющая ПИ-регулятора практически отключается путем установки большой постоянной времени интегрирования.

Зависимость коэффициента передачи k_{II} и времени интегрирования T_{II} от ошибки регулирования ε представлены на рисунках 35а и 35б, соответственно.

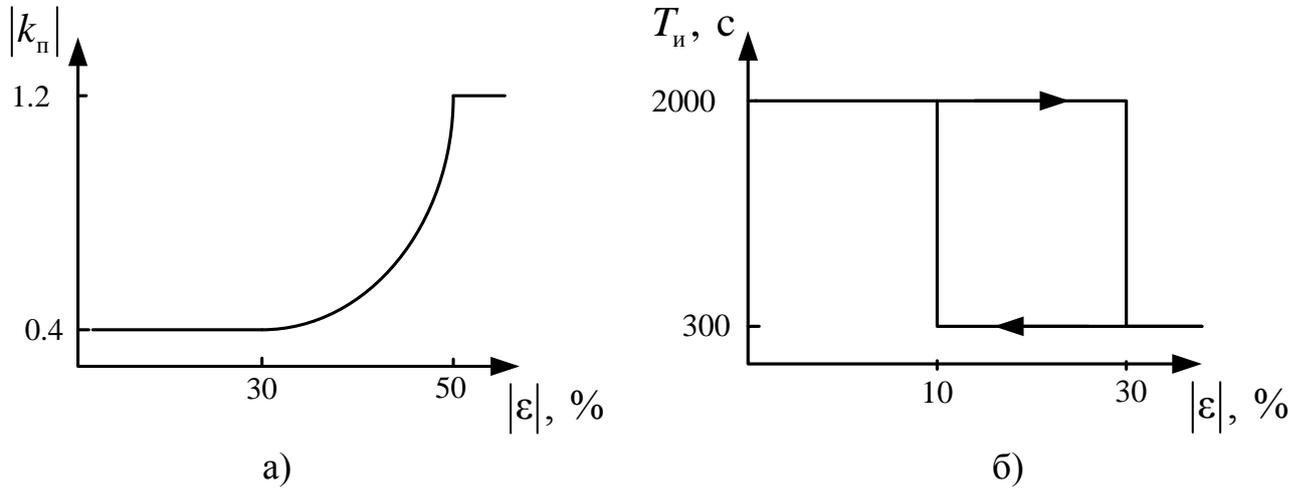


Рисунок 35 Механизм непрерывного расчета параметров ПИ-регулятора уровня
ОФ в БЕ

3.3.2 Исследование новой системы стабилизации расхода органической фазы на модели

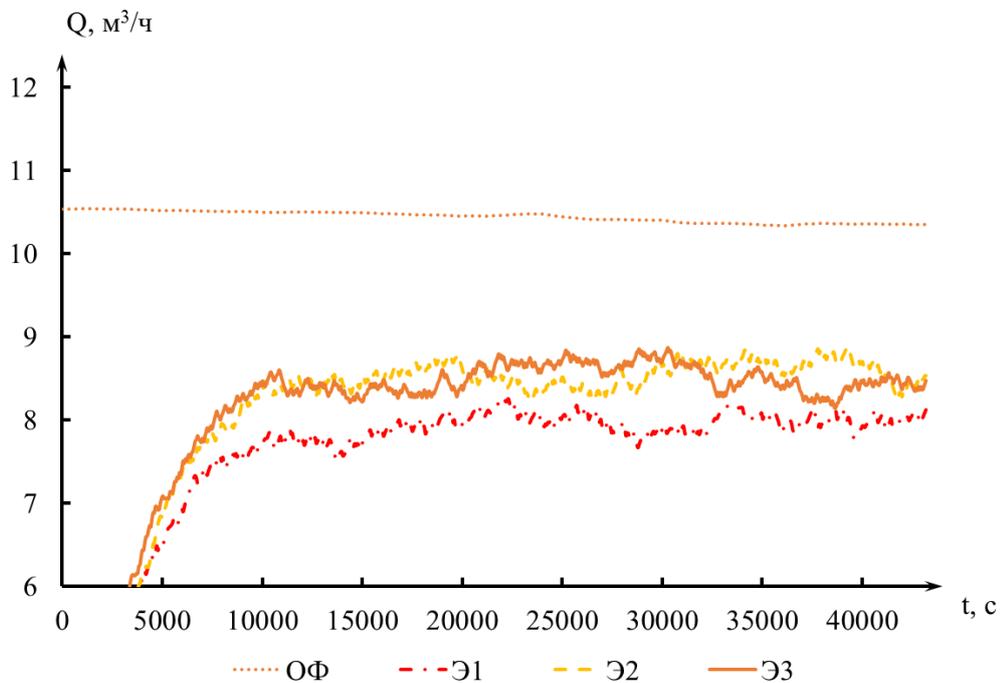


Рисунок 36 Значения расходов в КЭЖ при работе новой ССР ОФ

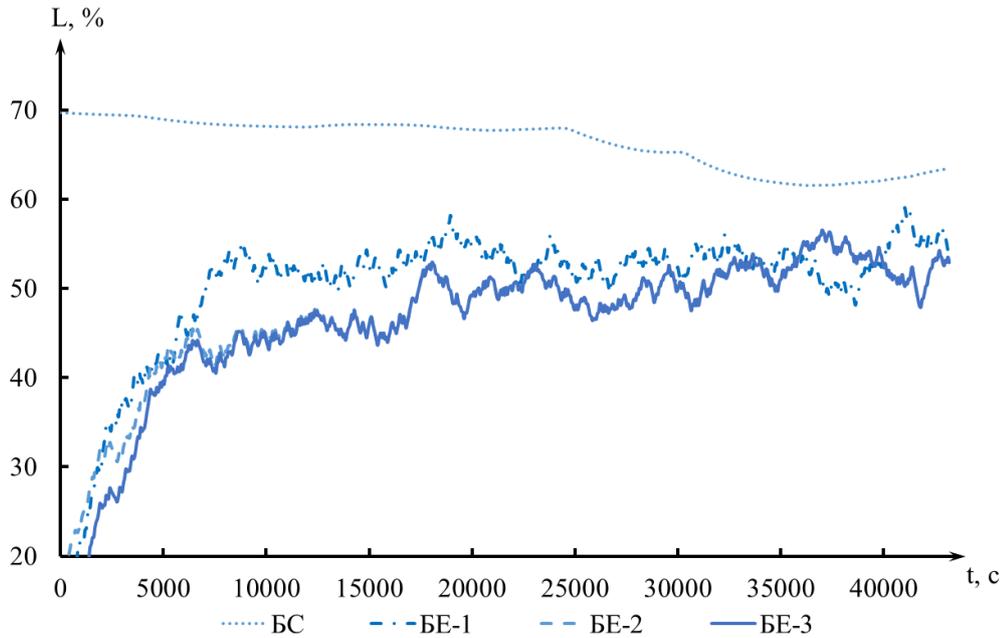


Рисунок 37 Значения уровня в КЭЖ при работе новой ССР ОФ

Таблица 15 Данные анализа адаптивной САУ

	Q_{OF}	$Q_{Э1}$	$Q_{Э2}$	$Q_{Э3}$	L_{BC}	L_{BE-1}	L_{BE-2}	L_{BE-3}
	$м^3/ч$				$\%$			
Среднее, \bar{x}	10,43	7,95	8,53	8,53	69,43	53,25	49,51	49,51
Минимум, min	10,20	3,35	5,50	5,50	69,24	5,96	11,12	11,12
Максимум, max	10,68	9,99	11,50	11,50	69,68	99,98	99,74	99,74
Амплитуда, A	0,48	6,64	5,99	5,99	0,44	94,02	88,62	88,62
Дисперсия, δ	0,01	3,83	4,03	4,03	0,05	1017,23	731,20	731,20
СКО, σ	0,09	1,97	2,05	2,04	2,88	31,83	26,97	27,04

Как видно из представленных данных, переход на частотный привод позволил решить задачу качественной стабилизации расхода и избавиться от негативных эффектов исполнительного механизма постоянной скорости (недостаточного быстродействия и низкой точности). В результате этого качество стабилизации расхода возросло. Однако из-за ограничений, описанных в главе 2.2.3, качество стабилизации падает, уровень ОФ в буферных ёмкостях выходит за разрешённые границы работы системы.

Всё вышеизложенное потребовало переосмысления ССР ОФ и введения дополнительного канала управления.

3.4 Введение второго канала управления

Новым в настоящей работе является необходимость создания двухканальной системы стабилизации органической фазы с частотным приводом и исполнительным механизмом «типа А». Это связано с ограничениями, накладываемыми на работу системы управления: постановка на «подпятник» и режимы работы насоса. Данные особенности потребовали введения второго канала управления – управление вентилем.

3.4.1 Аналитический обзор исследований по проблеме в научных источниках

В ходе выполнения работы был проведён анализ литературы, как отечественной, так и зарубежной по темам: регуляторы систем автоматического управления, многоканальные системы управления, адаптивное управление, оптимальное управление, системы автоматического управления с использованием байпаса.

При анализе литературы на предмет использования многоканальных адаптивных систем управления было установлено, что они используются совместно со сложными математическими моделями объекта управления и не менее сложными алгоритмами адаптации. Применяют, в основном, численные методы и нечёткую логику, что приводит к необходимости использования больших вычислительных мощностей и сложного программного обеспечения [43, 44, 45, 46, 47, 48]. Также обзор зарубежных источников показал, что на сегодняшний день рассмотренная проблема актуальна. Однако методов решения данной проблемы немного.

Изучение существующей литературы [31÷48] на предмет двухканальных систем показало, что такие системы представлены классом каскадных двухконтурных САУ с единственным исполнительным механизмом, рисунок 38а, где $Z_{им}$ – степень открытия выдачного вентиля в химическом реакторе, T – температура в химическом реакторе, C – концентрация. Подобный класс задач

широко распространён на практике: химический реактор [31, 32, 33, 37], легковые автомобили с полным приводом [31, 37], системы управления авиационными двигателями [39], станции по опреснению воды [46, 47], водоснабжение и водоотведение [43], системы кондиционирования [44, 45] и т.д. В рассмотренной литературе постановка задачи управления с помощью введения дополнительного канала управления либо отсутствует полностью [31, 32, 33, 34], либо каналы «разносятся» по частоте настолько сильно, что система становится одноканальной САУ [46, 47]. Однако в нашем случае существуют дополнительные условия, накладываемые на канал управления по частоте ω . ω_{\min} – минимально возможное число оборотов вала двигателя насоса, при котором насос не встал на подпятник. Это приводит к необходимости создания двухканальной системы управления с логикой работы грубо/плавно, где канал «грубо» - управление вентилем $Z_{\text{им}}$, а «плавно» - канал управления числом оборотов вала двигателя насоса, рисунок 38б.

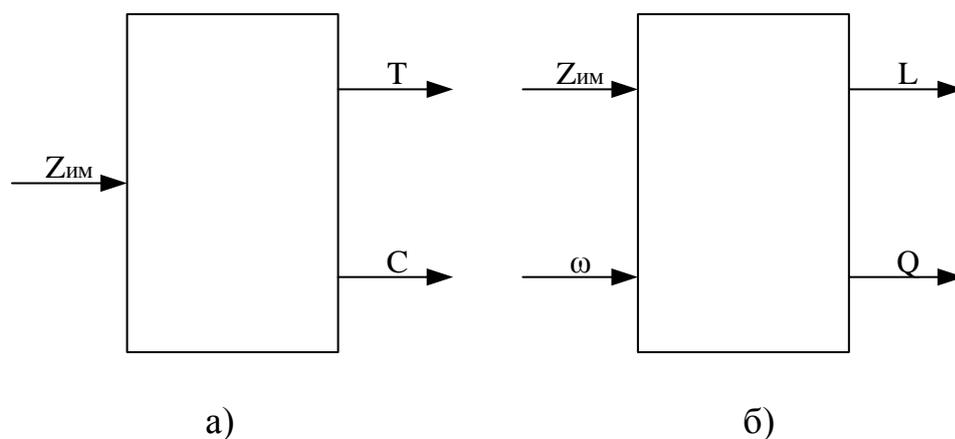


Рисунок 38 Двухканальные системы управления

3.4.2 Описание двухконтурной адаптивной системы стабилизации расхода органической фазы с двумя каналами управления

Структурная схема двухконтурной адаптивной ССР ОФ с двумя каналами управления представлена на рисунке 30. В этой системе управление расходом производится посредством насоса, управляемого ЧП – канал «плавно», и вентиля – канал «грубо».

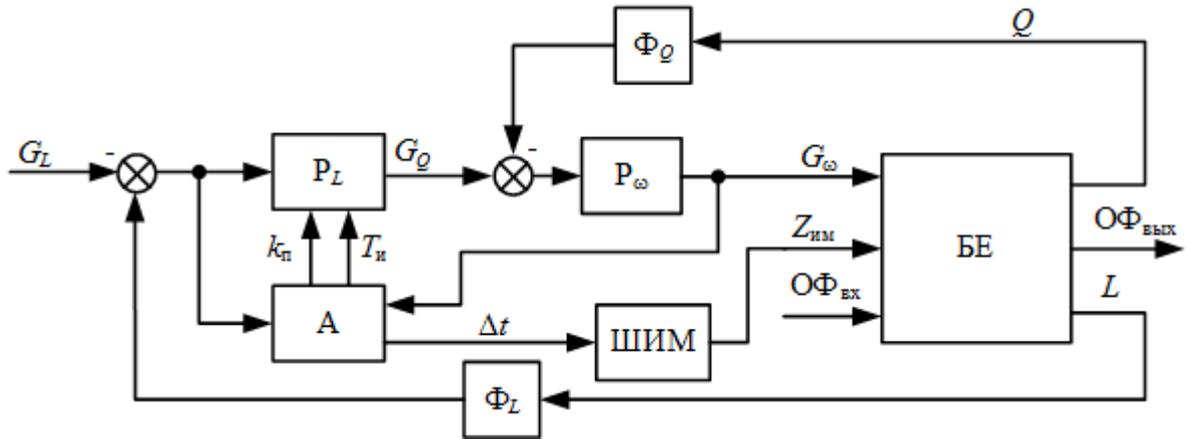


Рисунок 39 Двухканальная адаптивная система управления

В предложенной САУ в отличие от САУ, где положение вентиля зафиксировано, адаптер помимо расчета параметров настройки k_{Π} и $T_{\text{И}}$ формирует длительность Δt импульсов ШИМ согласно условию (47).

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta t_i = \Delta t_{i-1} \frac{|G_{\omega}^n - G_{\omega}|}{\Delta G_{\omega}}, \text{ при } G_{\omega} = G_{\omega}^{\max} \text{ или } G_{\omega} = G_{\omega}^{\min} \\ \Delta t_i = \Delta t_{\min}, \text{ при } \Delta t_i < \Delta t_{\min} \\ \Delta t_i = \Delta t_{\max}, \text{ при } \Delta t_i > \Delta t_{\max} \\ \Delta t = \Delta t_i, \text{ при } G_{\omega} = G_{\omega}^{\max} \\ \Delta t = -\Delta t_i, \text{ при } G_{\omega} = G_{\omega}^{\min} \end{array} \right. , \quad (47)$$

где G_{ω}^{\max} , G_{ω}^{\min} , G_{ω}^n – максимальное, минимальное и номинальное значения частоты вращения вала двигателя насоса, Δt_i , Δt_{i-1} – текущее и предыдущее значения импульсов ШИМ, ΔG_{ω} – приращение G_{ω} в результате воздействия на ИМ импульса ШИМ длительностью Δt_{i-1} , Δt_{\min} , Δt_{\max} – минимальная и максимальная длительности импульсов ШИМ.

С целью экономии электроэнергии, потребляемой насосом, формируются импульсы ШИМ в соответствии с выражением (48):

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta t_i = \Delta t_{i-1} \frac{|G_{\omega}^n - G_{\omega}|}{\Delta G_{\omega}}, \text{ при } G_{\omega} > G_{\omega}^n, |\varepsilon| < 10, \left| \frac{dG_{\omega}}{dt} \right| < 1 \\ \Delta t = 0, \text{ при } \Delta t_i < \Delta t_{\min} \\ \Delta t = \Delta t_{\min}, \text{ при } \Delta t_i > \Delta t_{\min} \end{array} \right. , \quad (48)$$

3.4.3 Испытания на модели

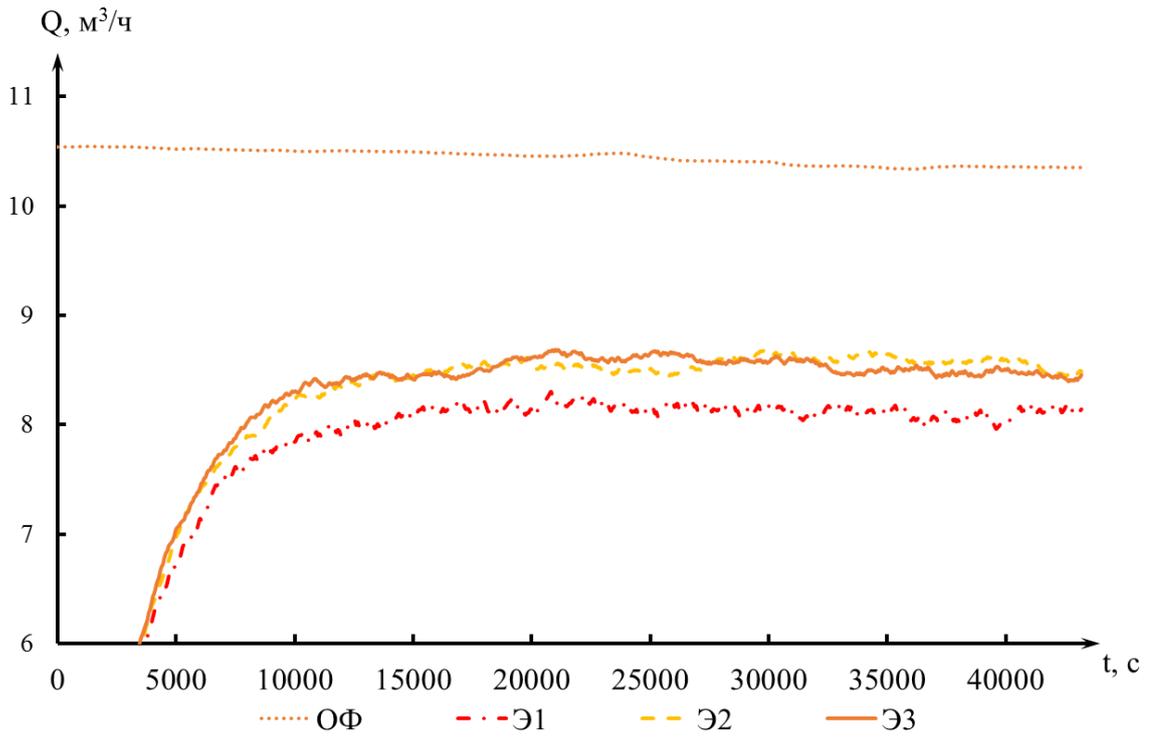


Рисунок 40 Значения расходов в КЭЖ с введением 2-го канала ССР ОФ

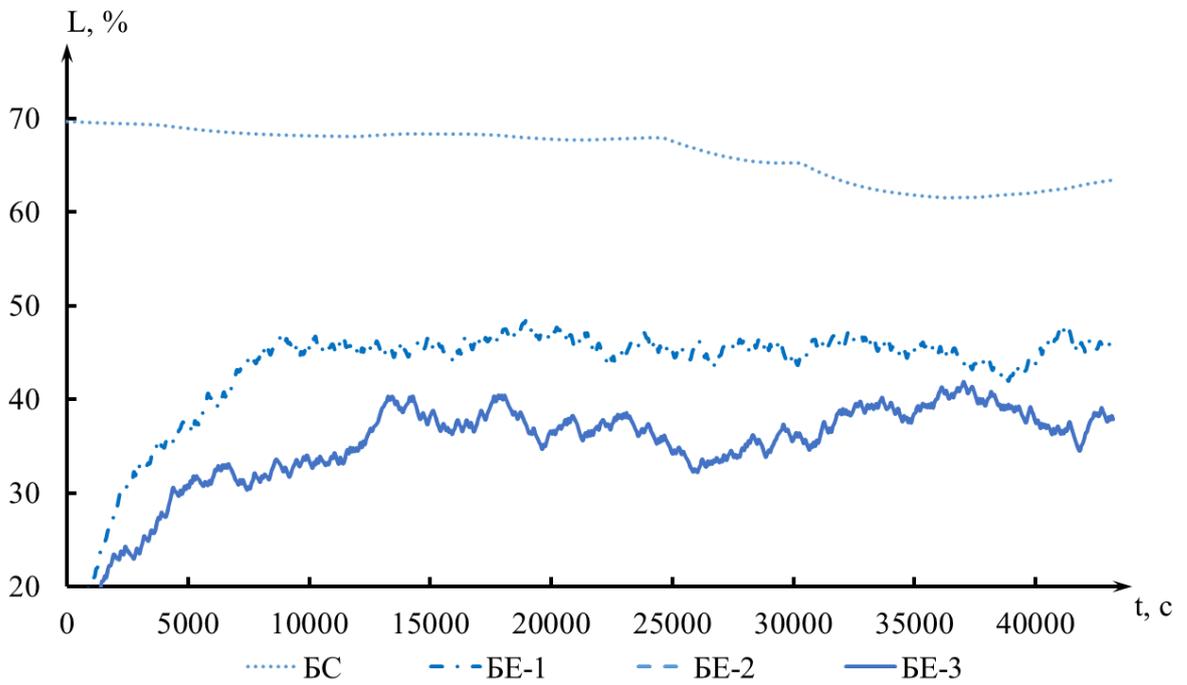


Рисунок 41 Значения уровня в КЭЖ с введением 2-го канала ССР ОФ

Таблица 16 Данные анализа двухканальной САУ

	Q_{OF}	$Q_{Э1}$	$Q_{Э2}$	$Q_{Э3}$	L_{BC}	L_{BE-1}	L_{BE-2}	L_{BE-3}
	$м^3/ч$				$\%$			
Среднее, \bar{x}	10,43	8,12	8,53	8,53	65,90	45,59	36,71	36,71
Минимум, min	10,20	5,90	7,50	7,50	60,80	5,96	10,40	10,40
Максимум, max	10,68	9,50	9,60	9,60	69,68	79,74	69,64	69,64
Амплитуда, A	0,48	3,60	2,10	2,10	8,87	73,78	59,24	59,24
Дисперсия, δ	0,01	1,23	0,39	0,39	8,33	403,17	399,71	399,71
СКО, σ	0,09	1,18	0,80	0,82	2,88	20,08	19,94	19,97

Из проведённых модельных исследований видно, что введение дополнительного канала управления позволило снять ограничения по минимальному числу оборотов двигателя и повысить качество управления. Усложнение системы, стало следствием тех ограничений, которые накладывает безаварийный режим работы КЭЖ. Исходя из данных представленных на рисунках 40, 41 и таблицы 16 удалось добиться существенной стабилизации ОФ по всему КЭЖ, это говорит, о том, что данная ССР ОФ работает корректно и большая часть энергии возмущающего воздействия расходуется на колебания уровня ОФ в буферных ёмкостях.

3.5 Сравнение систем стабилизации расхода органической фазы

В заключение этапа синтеза ССР ОФ необходимо провести сравнительный анализ полученных систем для определения количественных показателей качества полученной САУ.

3.5.1 Исследование переходных процессов

Параметры ПИД-закона для исходной системы, реализуемой с помощью ПДД2-ШИМ: коэффициент передачи – 0,25; время интегрирования – 200 с; минимальная длительность импульсов ШИМ – 0,1 с; время цикла регулятора – 5 с.

Для исследования переходных процессов в рассмотренных САУ использовался адаптер, описываемый выражением (46). Кроме этого, были применены параметры настройки $G_{\omega}^{\max} = 2910$ об/мин, $G_{\omega}^{\min} = 1810$ об/мин, период следования импульсов, рассчитанных по выражению (47) составлял 100 с, а по выражению (48) – 300 с.

На рисунках 42 и 43 приведены переходные процессы в рассмотренных ССР ОФ для БЕ-1 при ступенчатом возмущении по расходу жидкости на входе БЕ-1 с 7,4 м³/ч до 8 м³/ч. При этом выбег вала ИМ составлял 2%. Наилучшее демпфирование в 200 с обеспечила предложенная двухканальная адаптивная САУ с адаптивным регулятором (далее по тексту «2-х канальная»). Наихудшее демпфирование обеспечила «исходная» система (менее 100 с). Число включений ИМ за 1 час работы с момента запуска для «исходной» и «2-х канальной» составило: 14 и 5. Адаптивный регулятор обеспечил наименьшее включение ИМ.

Увеличение ступенчатого возмущения по расходу жидкости на входе в БЕ-1 с 0,6 м³/ч до 2 м³/ч в «исходной» САУ приводит к выходу уровня жидкости в БЕ-1 за установленные пределы. Компенсация выбега вала с 2% до 0,2% [81, 82] позволяет в «исходной» САУ увеличить демпфирование до требуемых 200 с, однако уровень жидкости в БН выходит за установленные пределы. С другой стороны, выбег вала ИМ не оказывает существенного влияния в «2-х канальной»

САУ с адаптивным регулятором, что обусловлено адаптацией длительностей импульсов по выражению (47).

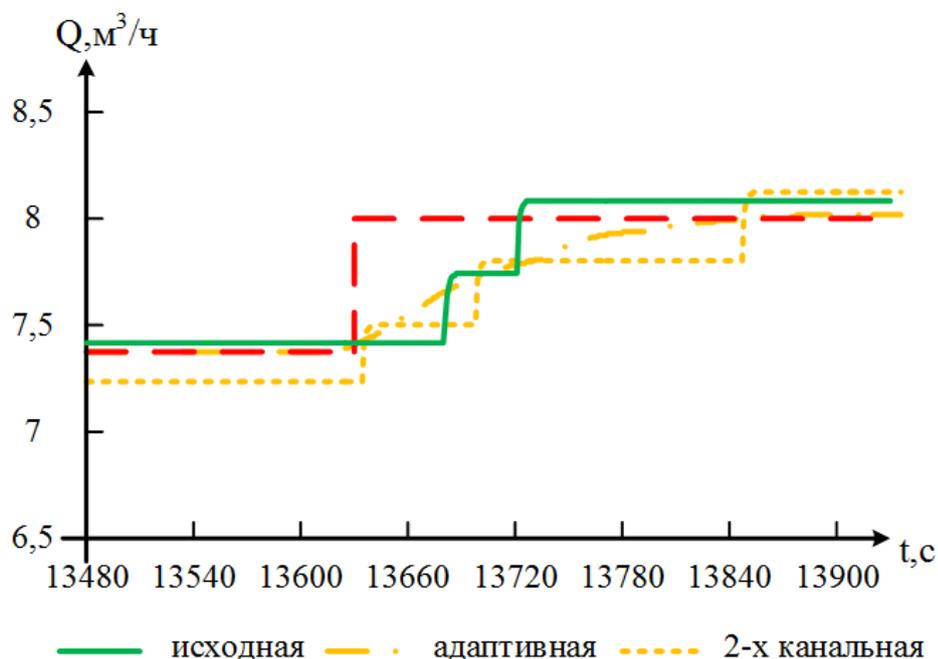


Рисунок 42 Переходные процессы расхода ОФ при ступенчатом возмущении входного расхода

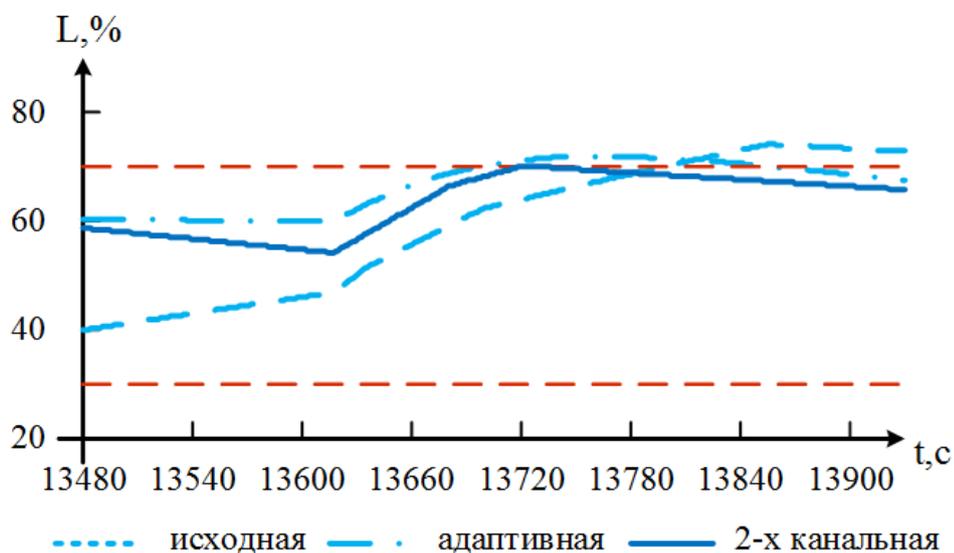


Рисунок 43 Переходные процессы уровня в БЕ-1 при ступенчатом возмущении входного расхода

В таблице 17 приведены показатели качества управления САУ БЕ-1 (число включений ИМ и отношения дисперсий расхода ОФ на выходе БЕ-1 к расходу жидкости на входе БЕ-1) за 3 часа работы при непрерывных возмущениях по расходу ОФ на входе БЕ-1 согласно выражению:

$$\begin{cases} Q_{\text{вх}}(t) = 0,6 \sin(0,19t) + 7,4 \text{ при } t < 3600 \\ Q_{\text{вх}}(t) = 0,6 \sin(0,19t) + 9,4 \text{ при } t \geq 3600' \end{cases} \quad (49)$$

Таблица 17 Показатели качества управления ССР ОФ для БЕ-1

Регулятор	Выбег вала ИМ 2%		Выбег вала ИМ 0,2%	
	Число включений ИМ	Отношение дисперсий $Q_{\text{вых}}/Q_{\text{вх}}$	Число включений ИМ	Отношение дисперсий $Q_{\text{вых}}/Q_{\text{вх}}$
«Исходная»	472	0,48	52	0,13
«Адаптивная»	-	0,34	-	0,57
«2-х канальная»	8	0,06	11	0,06

Анализ таблицы 17 показывает, что САУ на основе предложенного адаптивного регулятора обеспечивает лучшее демпфирование расхода ОФ при меньшем числе включений ИМ по сравнению с исходной системой. Также новая система не требует применения компенсации выбега вала ИМ. Выбег вала ИМ существенно влияет на демпфирование расхода ОФ в штатной САУ и практически не влияет в САУ с адаптивным регулятором. При этом средняя частота вращения вала электродвигателя насоса составила 2200 об/мин по сравнению с 2930 об/мин у исходной системы.

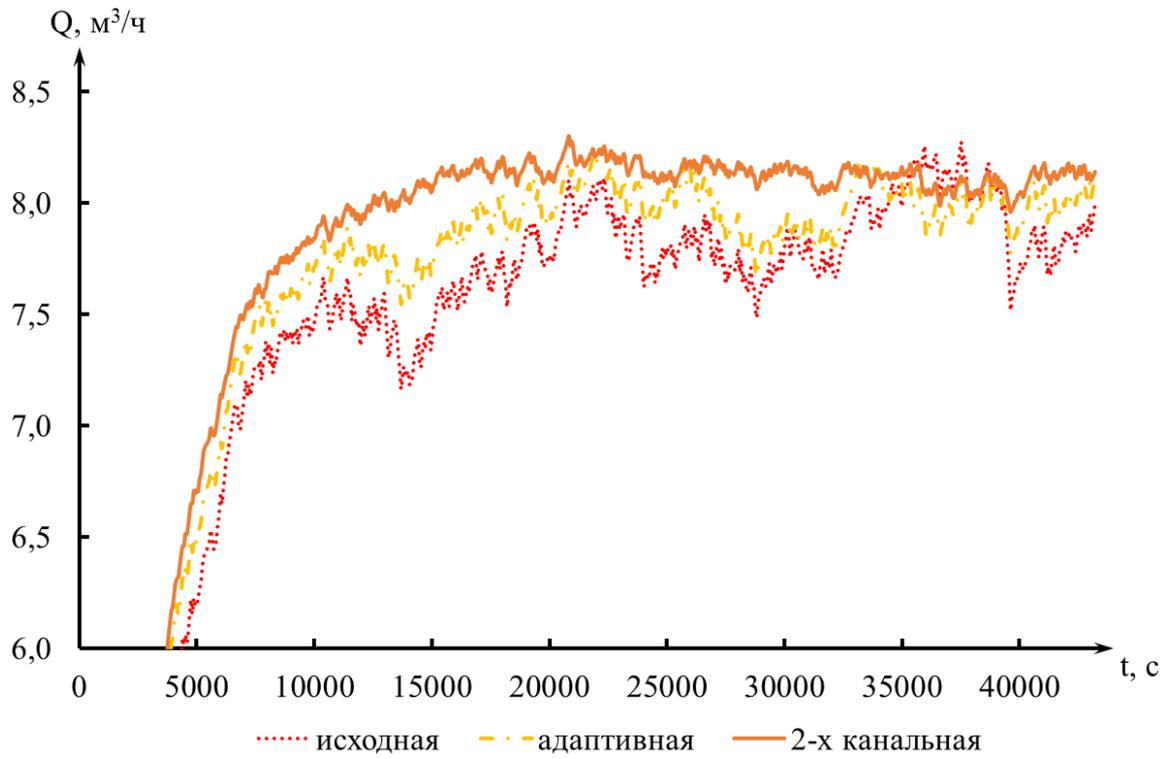


Рисунок 44 Отфильтрованное значение расхода

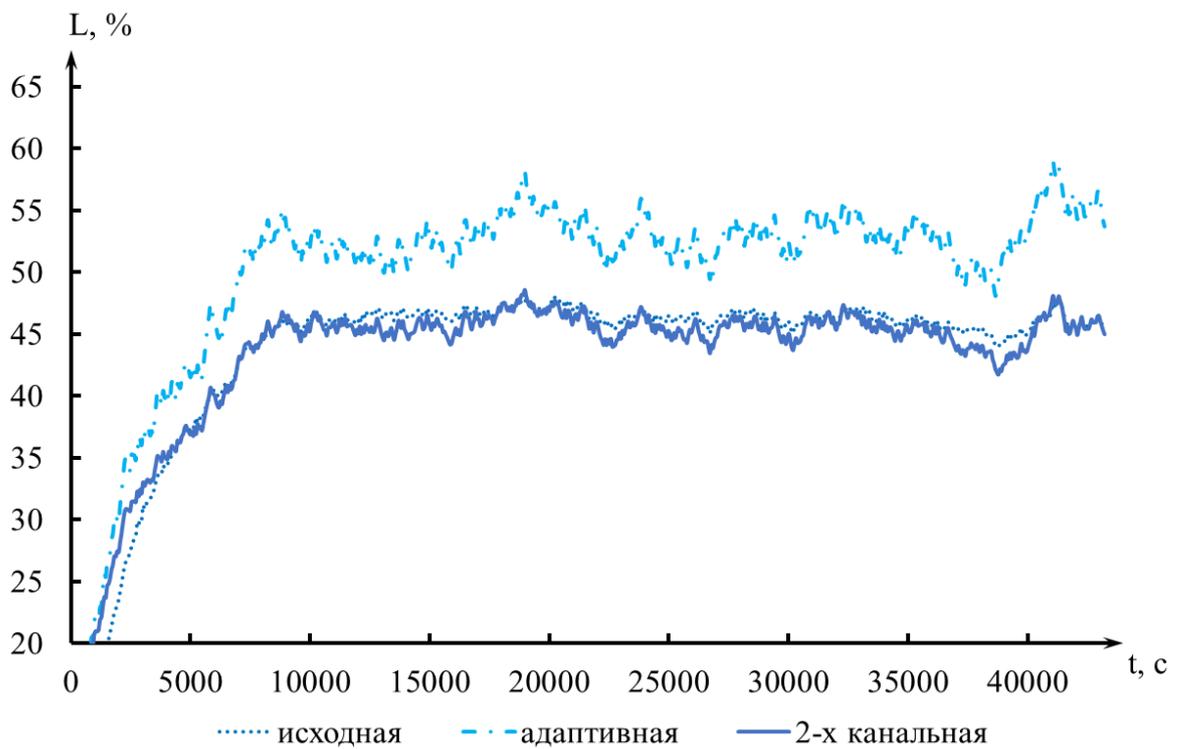


Рисунок 45 Отфильтрованное значение уровня

Таблица 18 Данные сравнения исходной и предлагаемой САУ

	$Q_{Э1_И}$	$Q_{Э1_А}$	$Q_{Э2_2К}$	$L_{БЕ-1_И}$	$L_{БЕ-1_А}$	$L_{БЕ-1_2К}$
	$м^3/ч$			$\%$		
Среднее, \bar{x}	7,78	7,95	8,53	46,46	53,25	45,59
Минимум, min	0,06	3,35	7,50	5,96	5,96	5,96
Максимум, max	11,61	9,99	9,60	89,28	99,98	79,74
Амплитуда, А	11,54	6,64	2,10	83,32	94,02	73,78
Дисперсия, δ	6,21	3,83	0,39	157,59	1017,23	403,17
СКО, σ	2,50	1,97	1,18	12,77	31,83	20,08

Как видно из представленных данных, переход на частотный привод позволил решить задачу качественной стабилизации расхода и избавиться от негативных эффектов исполнительного механизма постоянной скорости (недостаточного быстродействия и низкой точности), в результате чего качество стабилизации расхода возросло. Однако из-за ограничений, описанных в главе 2.2.3, качество стабилизации падает, уровень ОФ в буферных ёмкостях выходит за разрешённые границы работы системы. Решением данной проблемы явилось введение дополнительного канала управления вентилем.

3.6 Выводы к главе

Создание ССР ОФ является одной из основных задач данного исследования. Процесс создания учитывал опыт предыдущих исследователей. Благодаря этому опыту, взяв за основу принцип максимального изменения уровня в буферных ёмкостях и используя новые технические решения, удалось реализовать иной подход при создании САУ.

Новым в настоящей работе являлась необходимость создания двухканальной системы стабилизации органической фазы с частотным приводом и исполнительным механизмом «типа А». Это связано с ограничениями, накладываемыми на работу системы управления: постановка на «подпятник» и режимы работы насоса. Данные особенности потребовали создания адаптивной двухконтурной системы с двумя каналами управления – насосом и вентилем.

В процессе создания системы был проанализирован зарубежный опыт использования многоканальных адаптивных систем управления. Было установлено, что использование многоканальных адаптивных систем управления сопряжено с использованием сложных математических моделей объекта управления и не менее сложными алгоритмами адаптации. Использование численного метода и нечёткой логики приводит к необходимости использования больших вычислительных мощностей и сложного программного обеспечения. Мы же не обладали данными ресурсами.

Синтез ССР ОФ проведен на базе математической модели КЭК, представленной в главе 2. Данная модель позволила произвести структурный и параметрический синтез, а также провести проверку работоспособности ССР ОФ.

Исследование возможных вариантов проводилось по многокритериальной методике с помощью компьютерной модели, включающей имитационную модель КЭК, линейные и нелинейные модели регуляторов. При этом использовался метод анализа переходных процессов САУ при ступенчатых воздействиях по основным возмущениям (расходу ВФ1, ОФ и амплитуде пульсаций). Для оценки качества управления использовался ряд критериев качества: время регулирования,

динамический коэффициент регулирования, суммарная статическая ошибка регулирования ОФ по КЭК. В результате анализа было установлено, что САУ на основе предложенного адаптивного регулятора обеспечивает 8-кратное преимущество в сравнении с исходной системой, при меньшем числе включений ИМ. Также новая система не требует применения компенсации выбега вала ИМ. Выбег вала ИМ существенно влияет на демпфирование расхода ОФ в штатной САУ и практически не влияет в САУ с адаптивным регулятором. При этом средняя частота вращения вала электродвигателя насоса составила 2200 об/мин по сравнению с 2930 об/мин у исходной системы.

Исследования на компьютерной модели реакций системы на синусоидальные воздействия по основным возмущениям позволили установить максимально допустимые отклонения этих переменных, около 2 м³/ч, при которых САУ обеспечивает удовлетворительное качество управления.

В результате проделанной работы получили САУ ОФ в КЭК. Данные технические решения являются новыми, а их применения научно-обоснованными. На основе САУ ОФ разработана адаптивная система стабилизации органической фазы с двумя каналами управления.

4 Внедрение системы автоматизированной стабилизации органической фазы

Четвертая глава имеет практическую направленность. Лейтмотивом главы является процесс внедрения полученных результатов на РХЗ. Начинается глава с описания технической базы для реализации ССР ОФ. Рассматриваются этапы внедрения системы в технологический процесс. Обозреваются полученные результаты испытаний на действующей установке. Завершается глава расчётом экономического эффекта от внедрения ССР ОФ в КЭК на РХЗ и получением практических результатов.

4.1 Техническая реализация системы автоматизированной стабилизации на РХЗ

Перед испытаниями синтезированной САУ на установке экстракции урана провели предварительную подготовку. Проверили ЧП на специально созданном для этого стенде, приложение А. Подготовили МСКТП и шкаф управления насосным оборудованием с использованием ЧП. Для испытаний использовали ЧП модели FC200 фирмы Danfoss. В ходе испытаний был проведён ряд экспериментов, которые позволили установить:

- при любом рабочем давлении значение тока резко возрастает при приближении значений оборотов вала двигателя к отметке 500 об/мин. Можно предположить, что насос становится на «подпятник» при частоте вращения, близкой к 500 об/мин;

- при значениях частоты в пределах 1000÷3000 об/мин система частотного управления не влияет на износ механической части, а, напротив, уменьшает эту нагрузку на части насоса;

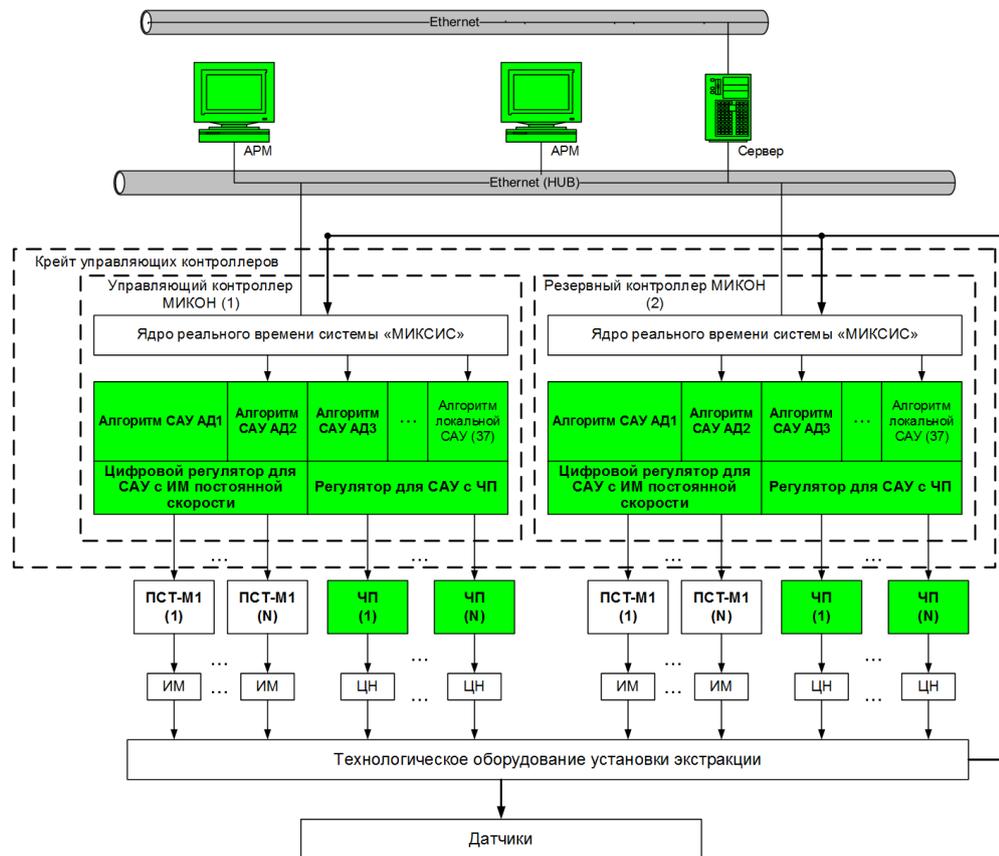
- чем ниже рабочее давление, тем выше температура обмоток двигателя;

- чем меньше частота вращения насоса, тем он меньше нагревается, причём при частоте вращения менее 2000 об/мин нагрева насоса практически не наблюдается при любом рабочем давлении. Таким образом, эффективность

охлаждения насоса не изменяется при снижении производительности насоса путём уменьшения частоты вращения.

Следующим этапом была подготовка МСКТП. Итоговая версия структуры программно-технических средств МСКТП экстракционной установки представлена на рисунке 46, а внедрённый алгоритм на рисунке 47. В результате проведенной работы введены в эксплуатацию алгоритмы локальных САУ с ЧП и цифровым регулятором в количестве 38 контуров. Основная часть предложенных алгоритмов управления установкой реализована в виде алгоблочных процедур задачи «RsProg» [63], функционирующей под управлением ядра реального времени «mlb» [63] и операционной системы Linux.

После ввода в эксплуатацию МСКТП все ПАЗ, автоматика и регуляторы реализуются с помощью промышленных контроллеров комплекса технических средств «МИКОН» и многофункциональной инструментальной комплексной системы «МИКСИС» [63].



ИМ - исполнительный механизм постоянной скорости; ЦН - центробежный насос; ПСТ- М1 - модернизированный пускатель симисторный

Рисунок 46 Итоговый вариант структуры программно-технических средств МСКТП ССР ОФ

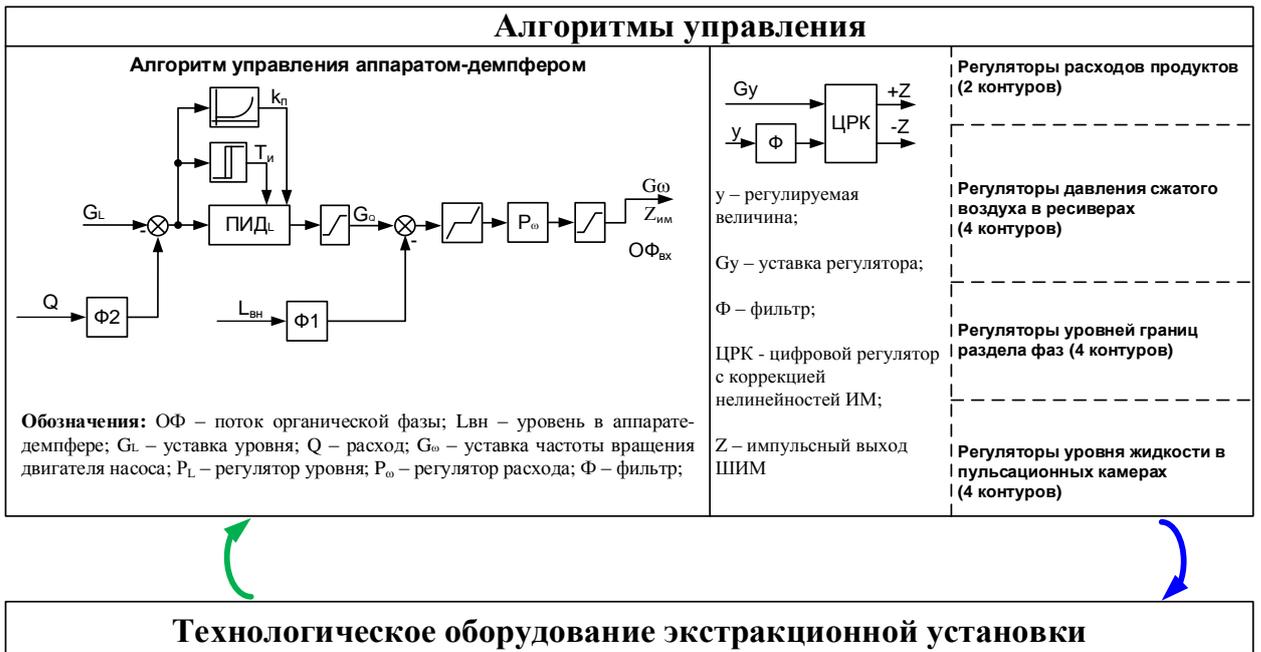


Рисунок 47 Алгоритмы управления ССР ОФ

Предложенная система успешно испытана на радиохимическом заводе АО «СХК». На рисунках 48, 49 представлены временные диаграммы расхода и уровня САУ БЕ для исходной и предложенной систем.

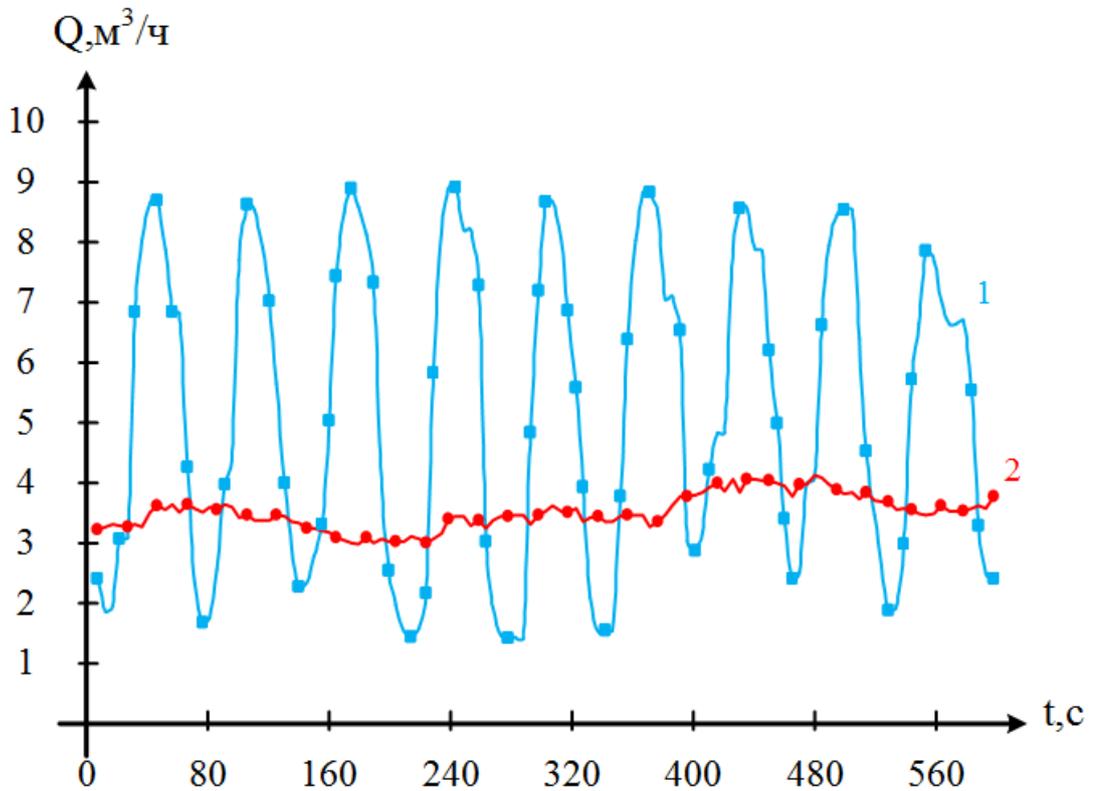


Рисунок 48 Временные диаграммы выходного расхода после БЕ-1 в КЭЖ: 1 – в исходной системе; 2 – в предложенной системе.

В общем случае критерием управления может служить оценка среднеквадратичного отклонения мгновенного значения потока органической фазы от заданного среднего значения расхода органической фазы:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\bar{X} - x_i)^2}{n - 1}}, \quad (50)$$

где \bar{X} – среднее значение расхода органической фазы, x_i – текущее (мгновенное) значение расхода органической фазы, n – количество используемых отсчётов. При этом целью управления является минимизация критерия управления, а именно, снижение значения среднеквадратичного отклонения мгновенного значения суммарного расхода органической фазы с выхода БЕ-1, БЕ-2, БЕ-3.

Результаты испытаний системы приведены в таблице 19.

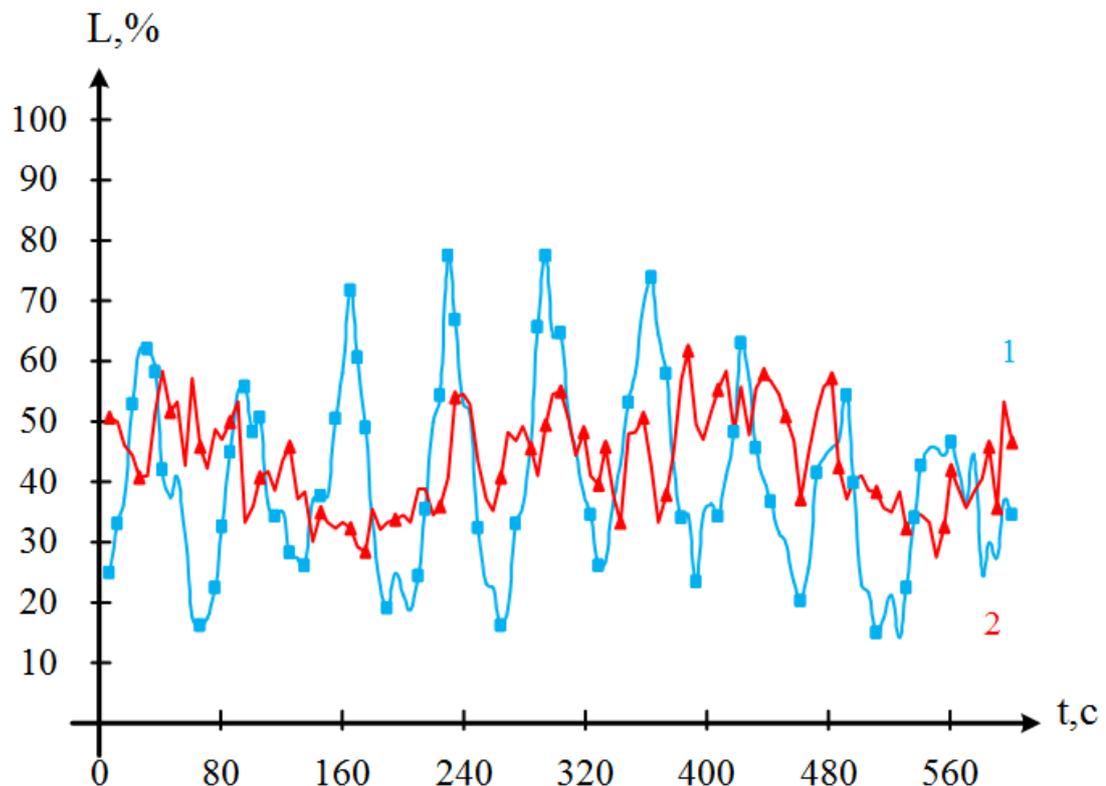


Рисунок 49 Временные диаграммы уровня жидкости в БЕ-1: 1 – в исходной системе; 2 – в предложенной системе.

Таблица 19 Результаты испытаний ССР ОФ для БЕ-1

Физическая величина	Исходная	Предложенная	Исходная / Предложенная
Среднеквадратичное отклонение расхода $Q_{\text{ВЫХ}}$, %	30	3	10
Среднеквадратичное отклонение расхода $L_{\text{БЕ}}$, %	14	7	2
Частота вращения насоса N , об/мин	2944	900	3,3
Действующий ток насоса I , А	9,5	6,3	1,5
Потребляемая насосом мощность W , Вт	5,5	0,6	9,8

Причиной больших отклонений в исходной системе являются нелинейности ИМ и регулирующего вентиля, устранить которые в исходной системе затруднительно.

4.2 Эффект от внедрения системы автоматизированной стабилизации на РХЗ

Деятельность по совершенствованию организации производства является важным средством повышения эффективности производственных систем. Определение экономической эффективности улучшения организации осуществляется путем реализации ряда последовательных этапов, рисунок 50.

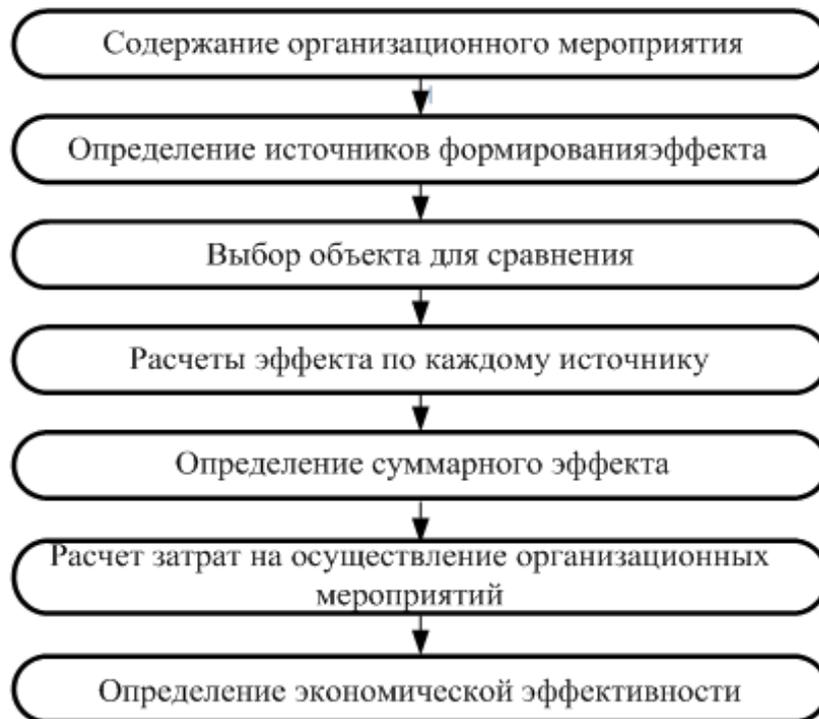


Рисунок 50 Основные этапы определения экономической эффективности совершенствования организации производства

Методы оценки эффективности основаны на сопоставлении показателей сравниваемых объектов, поэтому по каждому мероприятию необходимо выбрать объект для сравнения.

Возможны следующие варианты сопоставления:

- сравнение с базой, т.е. фактическим положением до осуществления организационного мероприятия;
- сравнение с вариантом плана совершенствования организации производства для выбора лучшего варианта;
- сравнение с аналогичными объектами на других предприятиях;

-сравнение на основе нормативов организации производства.

Экономический эффект рассчитывается по каждому источнику эффективности. При этом следует иметь в виду, что факторы, определяющие экономический эффект, по возможности их измерения подразделяются на следующие группы:

-факторы, поддающиеся стоимостному измерению и, следовательно, калькуляции, расчетам, например, себестоимость продукции, прибыль и др.;

-факторы, измеряемые не стоимостными количественными показателями, но которые могут быть представлены и в стоимостном выражении (объем выпуска продукции, трудозатраты и т.д.);

-факторы, которые не поддаются количественному и стоимостному измерению (например, монотонность труда).

При расчетах экономического эффекта учитываются две первые группы факторов. Однако экономическая оценка должна выполняться во всех случаях организационного совершенствования. Необходимо и не поддающиеся стоимостному измерению факторы охарактеризовать количественно и качественно, сравнить с затратами на осуществление данного организационного мероприятия и принять решение о целесообразности его проведения в жизнь.

После того как выполнены расчеты экономического эффекта по каждому источнику эффективности, определяется суммарный эффект.

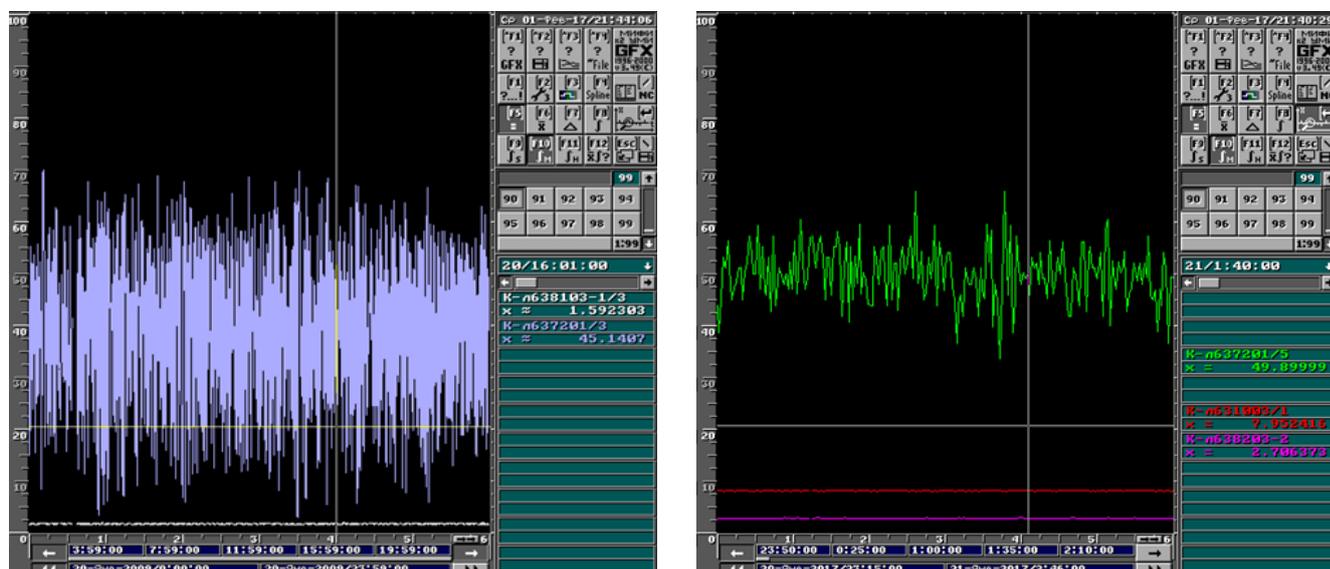
Экономический эффект рассчитывается по каждому источнику эффективности: 1) экономия на времени ведения технологического процесса; 2) экономия электроэнергии; 3) экономия на обслуживании (ТО и ТР):

Экономия на времени ведения технологического процесса:

Экономическая эффективность составляет около **1,2 млн. руб.**

Для определения роли ССР ОФ сравним показания амплитуды пульсации уровня в БЕ после ЭК-3 (из-за максимального влияния возмущающих факторов), и показания расхода ВФ1 (сравнить показания расхода ОФ не представляется возможным из-за отсутствия расходомера на данном продукте в 2009 году, однако

можно оценить по расходу ВФ1), до введения ССР ОФ и после, рисунок 51, таблица 20.



а) до ССР ОФ

б) после ССР ОФ

Рисунок 51 Мгновенные показания уровня в БЕ после ЭК-3 и показания расхода ВФ1

Таблица 20 Влияние расхода ВФ1 на поток ОФ

Технологический параметр	Отношение двух ССР ОФ до/после
Расход ВФ1	1,69
Ср. уровень в БЕ-1	1,32
Дисперсия уровня в БЕ-1	2,88
Амплитуда колебаний уровня в БЕ-1	3,33

Из рисунка 51 и таблицы 20 следует, что увеличение расхода ВФ1 (и как следствие расхода ОФ) при отсутствии ССР ОФ, приведёт к ухудшению ведения технологического процесса (частое срабатывание блокировок и переход в аварийный режим). Система образца 2009 года не позволит увеличить производительность.

Предложенная система за счёт эффективного демпфирования расхода обеспечивает техническую возможность увеличения расхода, что является необходимым, но не достаточным условием (также необходимы изменения в технологии) для увеличения производственной программы.

По экспертной оценке, доля вклада АСУ ТП в увеличение производственной программы составляет около 2 % от всех мероприятий. Это является основанием для расчёта доли участия схем АСУТП в повышении производственной программы.

Исходя из итогов производственной деятельности завода за 2009 и 2016 годы, производственная программа выросла на 64 %. Разница между производственными программами составила $\Delta = 104$ суток в год, в пересчёте на количество рабочих дней.

Расчёт экономической эффективности по нормам расхода химических реагентов нецелесообразен, т.к. происходит расход химических реагентов на производство продукции.

Исходя из разницы между производственными программами в 104 дня, рассчитаем экономическую эффективность:

Экономическая эффективность ($\text{ЭЭ}_{\text{ТП}}$) = (цена затрат на энергоресурс пар ($\text{ЦЗЭ}_{\text{пар}}$) + цена затрат на энергоресурс электроэнергия ($\text{ЦЗЭ}_{\text{электроэнергия}}$) + цена затрат на энергоресурс промышленная вода ($\text{ЦЗЭ}_{\text{пром. вода}}$))* доля участия АСУ ТП (ДУ).

Цена затрат на энергоресурс N1 (ЦЗЭ_{N1}) = разница между производственными программами (Δ) * норма потребления ресурса (НПР) * цена ресурса (ЦР):

$$\text{ЦЗЭ}_{\text{пар}} = 104 \text{ (сут.)} * 125 \text{ (Гкал/сут)} * 1560,08 \text{ (р/Гкал)} = 20\,281\,040,00 \text{ (р.)}$$

$$\text{ЦЗЭ}_{\text{электроэнергия}} = 104 \text{ (сут)} * 106090 \text{ (кВт/сут)} * 3,1 \text{ (р/кВт)} = 34\,203\,416,00 \text{ (р.)}$$

$$\text{ЦЗЭ}_{\text{пром. вода}} = 104 \text{ (сут.)} * 9040 \text{ (м}^3\text{/сут)} * 6,27 \text{ (р/м}^3\text{)} = 5\,889\,904,97 \text{ (р.)}$$

$$\begin{aligned} \text{ЭЭ}_{\text{ТП}} &= (20\,281\,040,00 \text{ (р.)} + 34\,203\,416,00 \text{ (р.)} + 5\,889\,904,97 \text{ (р.)}) * 0,02 \\ &= 1\,207\,487,22 \text{ (р/год)} \end{aligned}$$

Вклад ССР ОФ в экономию энергоресурсов 1,2 млн. руб.

Экономия электроэнергии:

Экономическая эффективность составляет около **300 тыс. руб.**

Для определения роли затрат на электроэнергию в расчёте экономической эффективности воспользуемся графиком работы установки в 2016 году, рисунок 52.

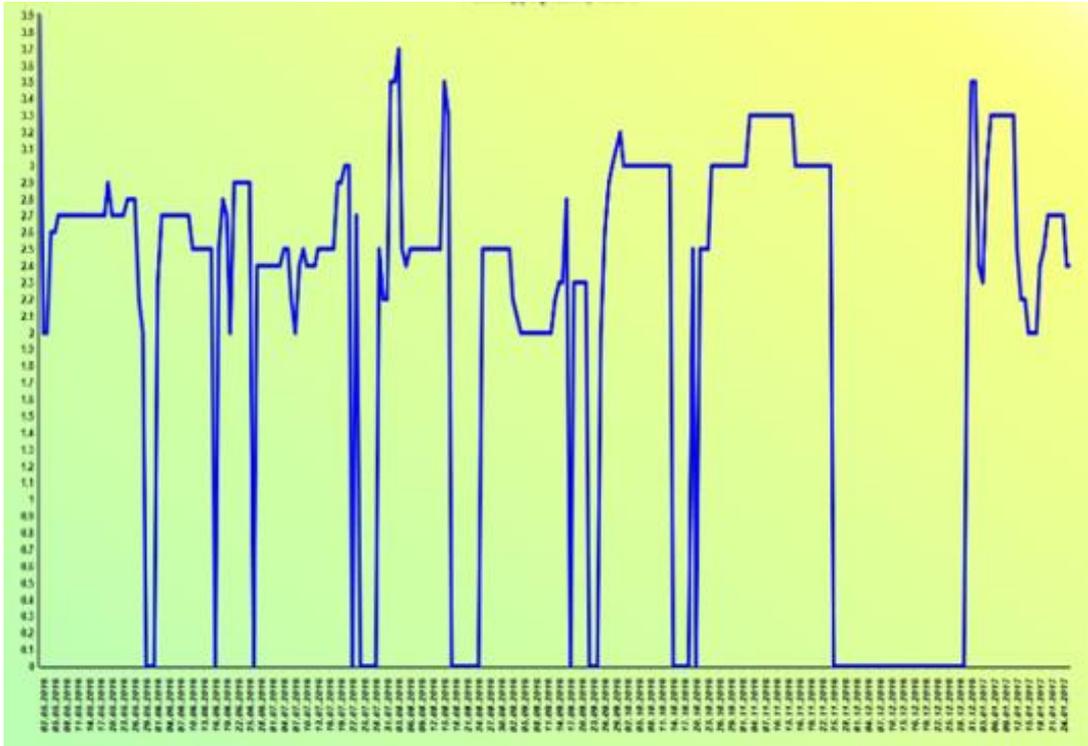


Рисунок 52 График работы КЭК в 2016 г.

Продолжительность работы установки (ПРУ) в 2016 году составляет 271 дня.

В системе ССР ОФ основными потребителями электроэнергии являются 4 насоса в ёмкостях БС, БЕ-1, БЕ-2, БЕ-3. График потребления тока ССР ОФ в течение суток представлен на рисунке 53.

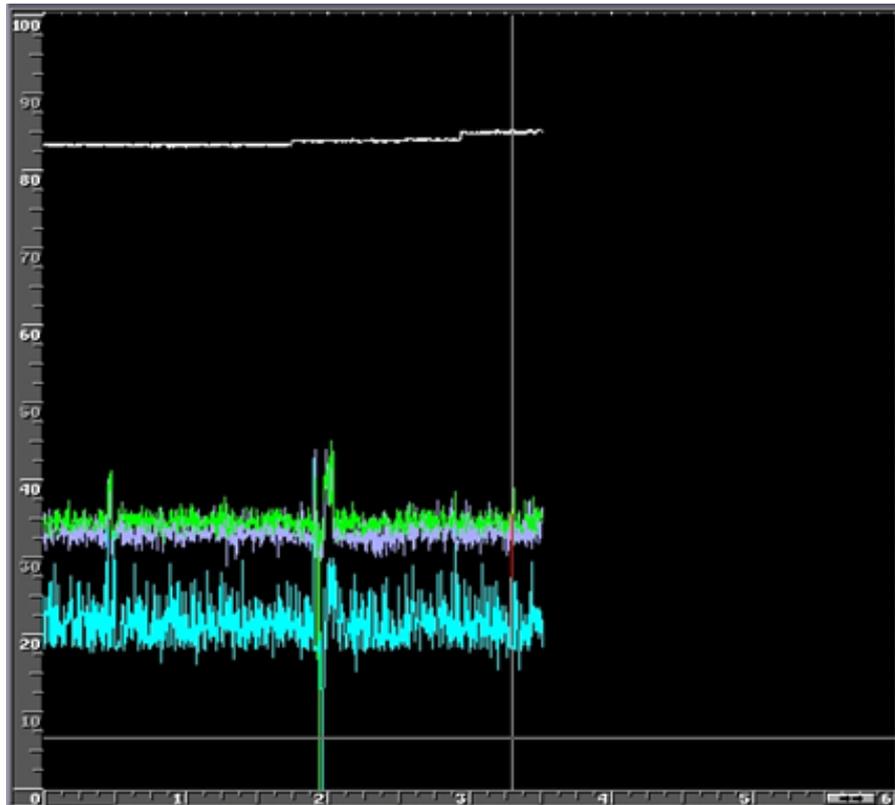


Рисунок 53 График суточного потребления тока ССР ОФ.

Данные по потреблению электроэнергии представлены в таблице 21.

Таблица 21 Основной объём потребляемой энергии ССР ОФ

	до ССРОФ	после ССРОФ
дней работы, сутки	271	271
количество насосов в системе ОФ, шт	4	4
напряжение U, В	380	380
ток I, А	17	7,63
Объём потреблённой энергии, кВ/ч	6460	2899,4
Суточный объём потреблённой энергии, кВ/ч	155040	69585,6

Цена затрат за сутки ($\text{ЦЗ}_{\text{сут}}$) эксплуатации одного насоса составляет:
потреблённой энергии за сутки ($\text{ПЭ}_{\text{сут}}$) * стоимость электроэнергии (СЭ).

$$\text{ЦЗ}_{\text{сут}} = 155,04 \text{ (кВ/ч)} * 3,1 \text{ (р)} = 480,62 \text{ (р)} \text{ для установки без ССР ОФ}$$

$$\text{ЦЗ}_{\text{сут}} = 69,58 \text{ (кВ/ч)} * 3,1 \text{ (р)} = 215,69 \text{ (р)} \text{ для установки с ССР ОФ}$$

$$\text{Годовая эксплуатация одного насоса: } \text{ЦЗ}_{\text{год}} = \text{ЦЗ}_{\text{сут}} * \text{ПРУ}$$

$$\text{ЦЗ}_{\text{год}} = 480,62 \text{ (р)} * 271 = 130\,249,10 \text{ (р)} \text{ для установки без ССР ОФ}$$

$$\text{ЦЗ}_{\text{год}} = 215,69 \text{ (р)} * 271 = 58\,450,8 \text{ (р)} \text{ для установки с ССР ОФ}$$

$$\text{Затраты на всю установку: } \text{ЦЗУ}_{\text{год}} = \text{ЦЗ}_{\text{год}} * 4$$

$\text{ЦЗУ}_{\text{год}} = 130\,249,10 \text{ (р)} * 4 = 520\,996,4 \text{ (р)}$ для установки без ССР
ОФ

$\text{ЦЗУ}_{\text{год}} = 58\,450,8 \text{ (р)} * 4 = 233\,803,2 \text{ (р)}$ для установки с ССР ОФ

Экономический эффект по энергоэффективности (ЭЭэ): $\text{ЭЭэ} = \text{ЦЗУ}_{\text{год}}$
без ССР ОФ - $\text{ЦЗУ}_{\text{год}}$ с ССР ОФ

$\text{ЭЭэ} = 520\,996,4 \text{ (р)} - 233\,803,2 \text{ (р)} = 287\,193,23 \text{ (р/год)}$

Затратами электроэнергии на АСУ ТП (контроллер, АРМы и т.д.) можно пренебречь, т.к. оборудование АСУ ТП использовалось в обоих случаях.

Экономия на техническом обслуживании и ремонте:

Экономическая эффективность составляет около **5000** руб.

Для определения роли затрат на техническое обслуживание и ремонт воспользуемся данными, полученными из БД «ПОЛИГОН», см. таблицу 22.

Таблица 22 Техническое обслуживание и ремонт

Количество ТОиТР в год, ч	2,25
Ставка норм/час, р.	600
Количество приводов типа "А" в системе ОФ, шт	4
Экономический эффект на ТОиТР ($\text{ЭЭ}_{\text{ТОиТР}}$), р/год	5400

Оценка общей экономической эффективности:

$\text{ОЭ} = \text{ЭЭ}_{\text{ТП}} + \text{ЭЭэ} + \text{ЭЭ}_{\text{ТОиТР}}$

$\text{ОЭ} = 1\,207\,487,22 \text{ (р/год)} + 287\,193,23 \text{ (р/год)} + 5400 \text{ (р/год)} = 1\,500\,080,45 \text{ (р/год)}$

Общая экономическая эффективность системы стабилизации органической фазы составляет около **1 500 000** (р/год).

4.3 Выводы к главе

В результате проделанной работы была внедрена ССР ОФ на радиохимическое производство. В процессе внедрения были разработаны алгоритмы управления и создана программная часть АСУ. Использована современная техническая база с частотным управлением насосами. Перед этапом внедрения проведены испытания на ЭВМ с использованием разработанной модели КЭК. Благодаря испытаниям на ЭВМ удалось снизить риски при внедрении результатов работы на опасном производстве.

Внедрение ССР ОФ позволило снизить ошибку управления расходом и амплитуду колебания уровня в буферных ёмкостях в 2 раза, что обеспечило необходимое условие для технической возможности увеличения производственной программы. Промышленные испытания показали 10-кратное снижение низкочастотных колебаний расхода органической фазы по сравнению со штатной системой. Снижение частоты вращения вала электродвигателя насоса в 3 раза и энергопотребления в 10 раз позволяет судить о возможности существенного продления срока службы насосов.

Исходя из анализа итогов производственной деятельности завода за 2009 и 2016 годы можно наблюдать увеличение производственной программы более чем в 1,5 раза. Данный факт является формальным основанием для подтверждения полученных результатов, так как ранее говорилось о проблемах, возникающих в технологическом процессе, при увеличении производительности без изменения ССР ОФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной диссертационной работы решена научная задача и изложены результаты научно обоснованного технического решения: набор алгоритмов, программная и техническая часть АСУ ТП. Результаты данных исследований внесли заметный вклад в повышение эффективности аффинажа урана на радиохимическом производстве.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведённый анализ технологического процесса экстракции урана позволил сделать вывод, что в качестве основных управляющих воздействий, при стабилизации органической фазы во всём каскаде экстракционных колонн, необходимо использовать расходы органической фазы и экстракта после 1,2,3 колонн. Для дальнейших исследований каскада экстракционных колонн появилась потребность в создании математической модели. Математическая модель является удобным инструментом, позволяющим обойтись без прямого воздействия на реальный объект исследования. Сама модель потребовала математического описания технологических процессов, протекающих в структурных элементах каскада экстракционных колонн: буферной ёмкости и экстракционной колонне. Ранее подобные исследования буферной ёмкости как технологического объекта управления не проводились.

Использование современного имитационного подхода в моделировании позволило, с меньшей трудоёмкостью, решить сложные задачи по исследованию динамики протекания процессов. Преимущество имитационного моделирования в том, что оно не накладывает жестких ограничений на вид исходных данных. Данный вид моделирования позволяет применять весь объём собранной информации вне зависимости от ее формы представления и степени формализации (таблицы, матрицы, полиномиальные зависимости, передаточные функции, ОДУ и т.д.). Данное преимущество имитационного моделирования особенно актуально при

моделировании буферной ёмкости из-за ограничений, связанных с исходными данными. В процессе моделирования были получены новые знания о способах обучения модели на основе нейронечёткой сети. В основе этих знаний лежит анализ экспериментальных данных, полученных в ходе работы каскада экстракционных колонн.

2. Разработана новая математическая модель каскада экстракционных колонн, описывающая динамику прохождения органической фазы. Модель позволила синтезировать и испытать алгоритмы управления действующими аппаратами. Использование системы нечеткого вывода позволило снять ограничения на аппроксимацию классическими методами, связанными с недостатком экспериментальных данных. В отличие от других методов (полиномы, сплайны, и др.) нечеткая нейронная сеть позволила эффективно решить задачу аппроксимации экспериментальных данных, которые были представлены в виде разреженных матриц. Это позволяет говорить о нечеткой нейронной сети как об универсальном эффективном аппроксиматоре. Каждая созданная модель проверялась на адекватность. Сравнение модели с рабочей системой подтвердило адекватность предложенной модели. Полученная модель каскада экстракционных колонн воспроизводит процесс движения органической фазы по всему каскаду колонн. Модель адекватна реальному процессу, и её погрешность меньше допустимой основной приведённой погрешности. Предложенная модель подходит для дальнейших исследований.

Математическая модель каскада экстракционных колонн реализована в виде компьютерной программы в программном пакете Matlab (Simulink).

3. Был создан алгоритм управления системы стабилизации потока органической фазы в каскаде экстракционных колонн. Данный алгоритм отличается одновременным управлением частотой вращения вала двигателя насоса и напором, что обеспечивает существенное демпфирование расхода органической фазы в каскаде экстракционных колонн.

Процесс создания был основан на творческом переосмыслении опыта предыдущих исследователей. Благодаря изучению предыдущего опыта был взят за основу принцип фильтра нижних частот для расхода органической фазы.

Новым в настоящей работе являлась необходимость создания двухканальной системы стабилизации органической фазы с частотным приводом и исполнительным механизмом «типа А». Это связано с ограничениями, накладываемыми на работу системы управления: постановка на «подпятник» и режимы работы насоса. Данные особенности потребовали создания адаптивной двухконтурной системы с двумя каналами управления насосом и вентилем.

В процессе создания системы был проанализирован зарубежный опыт использования многоканальных адаптивных систем управления. Было установлено, что использование многоканальных адаптивных систем управления сопряжено с использованием сложных математических моделей объекта управления и не менее сложными алгоритмами адаптации. Использование численного метода и нечёткой логики приводит к необходимости использования больших вычислительных мощностей и сложного программного обеспечения. В рамках данной работы таких ресурсов не было.

Синтез системы стабилизации расхода органической фазы проведен на базе математической модели, созданной в рамках данной работы. Данная модель позволила произвести структурный и параметрический синтез, а также провести проверку работоспособности системы стабилизации расхода органической фазы.

Исследование возможных вариантов проводилось по многокритериальной методике с помощью компьютерной модели, включающей имитационную модель каскада экстракционных колонн, линейные и нелинейные модели регуляторов. При этом использовался метод анализа переходных процессов САУ при ступенчатых воздействиях по

основным возмущениям (расходу ВФ1, ОФ и амплитуде пульсаций). Для оценки качества управления использовался ряд критериев качества: время регулирования, динамический коэффициент регулирования, суммарная статическая ошибка регулирования органической фазы в каскаде экстракционных колонн. В результате анализа было установлено, что САУ на основе предложенного адаптивного регулятора обеспечивает 8-кратное преимущество в сравнении с исходной системой при меньшем числе включений исполнительного механизма. Также новая система не требует применения компенсации выбега вала исполнительного механизма. Выбег вала исполнительного механизма существенно влияет на демпфирование расхода органической фазы в штатной САУ и практически не влияет в САУ с адаптивным регулятором. При этом средняя частота вращения вала электродвигателя насоса составила 2200 об/мин по сравнению с 2930 об/мин у исходной системы.

Исследования на компьютерной модели реакции системы на синусоидальные воздействия по основным возмущениям позволили установить максимально допустимые отклонения этих переменных, около 2 м³/ч, при которых САУ обеспечивает удовлетворительное качество управления.

В результате проделанной работы был создан универсальный алгоритм, который может использоваться в задачах двухканального управления. Данные технические решения являются новыми, а их применения научно-обоснованы.

4. В результате проделанной работы была внедрена система стабилизации расхода органической фазы на радиохимическом производстве. В процессе внедрения были разработаны алгоритмы управления и создана программная часть АСУ. Использована современная техническая база с частотным управлением насосами. Перед этапом внедрения проведены испытания на ЭВМ с использованием разработанной модели каскада

экстракционных колонн. Благодаря испытаниям на ЭВМ, удалось снизить риски при внедрении результатов работы на опасном производстве.

Внедрение системы стабилизации расхода органической фазы позволило снизить ошибку управления расходом и амплитуду колебания уровня в буферных ёмкостях в 2 раза, что обеспечило необходимое условие для технической возможности увеличения производственной программы. Промышленные испытания показали 10-кратное снижение низкочастотных колебаний расхода органической фазы по сравнению со штатной системой. Снижение частоты вращения вала электродвигателя насоса в 3 раза и энергопотребления в 10 раз позволяет судить о возможности существенного продления срока службы насосов.

Исходя из анализа итогов производственной деятельности завода за 2009 и 2016 годы, можно наблюдать увеличение производственной программы более чем в 1,5 раза. Данный факт является формальным основанием для подтверждения полученных результатов, так как ранее говорилось о проблемах, возникающих в технологическом процессе, при увеличении производительности без изменения ССР ОФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарин В.М. Обращение с опасными отходами: учеб. пособие / ред. В.М. Гарин и Г.Н. Соколова. М.: ТК «Велби»; Проспект, 2006. с. 224
2. Кулагина Т.А., Матюшенко А.И., Комонов С.В. и др. Управление промышленными и особо опасными отходами. М.: Маджента, 2010. с. 567
3. Ливенцов С.Н., Козлов С.Е., Лысенко А.А., Симогаев Г.А. Система стабилизации потока органической фазы в каскаде колонн установки М-1345 // Отчёт по НИР. – 2004. с. 6–13
4. Горюнов А.Г. Специальная тема: Диссертации канд. техн. наук. – Томск, 2006. – 180 с.
5. Горюнов А.Г., Дядик В.Ф., Ливенцов С.Н., Чурсин Ю.А. Математическое моделирование технологических процессов водно-экстракционной переработки ядерного топлива: монография // Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 237 с.
6. Горюнов А.Г., Иванов К.А., Шенцов Э.Ю., Биянов А.В. Система стабилизации потока органической фазы каскада экстракционных колонн с применением частотного управления погружными центробежными насосами // Известия высших учебных заведений. Физика, 2010. – №11/2. – с. 206–210.
7. Горюнов А.Г., Иванов К.А. Система стабилизации потока органической фазы каскада колонн с частотным управлением насосами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2011. – № 6. – с. 47-52.
8. Горюнов А.Г., Иванов К.А., Шенцов Э.Ю., Биянов А.В. Система стабилизации потока органической фазы каскада экстракционных колонн с применением частотного управления погружными центробежными насосами // Известия высших учебных заведений. Физика, 2010. – №11/2. – с. 206–210.
9. Петров Д. Применение современных преобразователей частоты // Силовая электроника. – 2005. – № 1. – с. 62–66

10. Горюнов А. Г., Ливенцов С.Н. Цифровой регулятор для системы управления с исполнительным механизмом постоянной скорости // Известия ТПУ. – 2004. – Т.307, № 6. – с. 131-134.
11. Ливенцов С.Н., Козлов С.Е., Лысенко А.А., Симогаев Г.А. Система стабилизации потока органической фазы по каскаду экстракционных колонн установки «Утес» // Физика. – 2000. – Т.43, № 5. – с. 106–110.
12. Копырин А. А., Карелин А. И., Карелин В. А. Технология производства и радиохимической переработки ядерного топлива: Учеб. Пособие для вузов. – М.: ЗАО «Издательство Атомэнергоиздат», 2006. – 576 с.
13. Годовой отчёт Госкорпорации «Росатом» за 2014 год, с.13-16.
14. Конверсия на СХК: новый завод по производству гексафторида урана [Электронный ресурс]: sdelanounas.ru. – URL <http://sdelanounas.ru/blogs/33956/> (дата обращения: 16.05.2016).
15. Герцкин М. Г., Шмидт В. С., Хацкевич М. В., Щербатых В. И., Жданов В. Д. и др. Разработка и исследование автоматической системы регулирования технологического процесса с управляющей ЭВМ в контуре регулирования. Научный отчет СХК и предприятия п.я. Р-6575. СХК, инв. №13381, гос. рег. №Х33946, 1983. – 21 с.
16. Хацкевич М. В., Калинин О. В., Молчанов А. В. и др. Исследование по измерению задержки и границы раздела фаз на модели пульсирующей экстракционной колонны. Научный отчет СХК и предприятия п.я. Р-6575. СХК, инв. № 13370, 1974. – 31 с
17. Леоненков А.В. Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
18. Руководство по определению характеристик технологических объектов управления и настройке параметров регуляторов с ИМ постоянной скорости: Отчет о НИР / ТПУ, СХК; исполн.: Ливенцов С. Н. [и др.]. – Инв. № 60-05/4821 от 24.11.97. – Томск, 1997. – 23 с.
19. Мировой рынок урана [Электронный ресурс]: cmmarket.ru. – URL <http://www.cmmarket.ru/markets/unworld.htm> (дата обращения: 21.05.2016).

20. На мировом рынке урана произошло повышение цен [Электронный ресурс]: [cmmarket.ru.](http://www.skс.ru/press/news/item/4223858/) – URL <http://www.skс.ru/press/news/item/4223858/> (дата обращения: 21.05.2016)
21. На мировом рынке металлов стоимость урана за последний месяц снизилась (обзор) [Электронный ресурс]: [cmmarket.ru.](http://www.kazatomprom.kz/ru/#!/article/1259) – URL <http://www.kazatomprom.kz/ru/#!/article/1259> (дата обращения: 21.05.2016)
22. Коновалов В.Ф., Головинский С.А., Бойцов А.В., Кротков В.В. Производство урана в России: история, состояние, перспективы развития // Разведка и охрана недр. 2005. № 10. С. 104-109.
23. Рынок услуг по конверсии и обогащению урана [Электронный ресурс]: [rosatom.ru](http://ar2013.rosatom.ru/104.html) – URL <http://ar2013.rosatom.ru/104.html> (дата обращения: 21.05.2016)
24. Обогащение урана [Электронный ресурс]: [rosatom.ru](http://www.rosatom.ru/aboutcorporation/activity/energy_complex/uraniumenrichment/) – URL http://www.rosatom.ru/aboutcorporation/activity/energy_complex/uraniumenrichment/ (дата обращения: 21.05.2016)
25. Балашов А. А., Лоссиевский В. Л., Чернышев В. Н., Шваб А. Ф., Шелемин Б. В. Схемы и средства автоматизации радиохимических производств. – М.: Госатомиздат, 1963. – 192 с.
26. Карпачева С. М., Захаров Е. И. Основы теории и расчета пульсационных колонных реакторов. – М.: Атомиздат, 1980, с. 256.
27. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973.
28. Справочник проектировщика АСУТП. // Г. Л. Смилянский, Л. З. Амлинский. – М.: Машиностроение, 1983.
29. Цибровский Я. Процессы химической технологии. Пер. с польск. под ред. П. Г. Романкова. – Л.: Госхимиздат, 1958.
30. Кафаров В. В., Глебов М. Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 400 с.

31. Лабутин А.Н., Семёнов Ю.В. Синтез синергетической системы управления концентрацией компонента в химическом реакторе. //Известия высших учебных заведений. Экономика, финансы и управление производством. 2010. № 4. С. 82-89.
32. Невиницын В.Ю., Грименицкий П.Н., Григорьев Ю.В. Адаптивная система управления химическим реактором // Известия высших учебных заведений. Экономика, финансы и управление производством. 2011. № 1. С. 109-112.
33. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В. Синтез и моделирование многомерной системы управления каскадом химических реакторов. // Известия высших учебных заведений. Экономика, финансы и управление производством. 2012. № 2. С. 150-157.
34. Жилейкин М.М., Чулюкин А.О. Алгоритм работы системы динамической стабилизации для автомобиля 4x4 с подключаемой задней осью. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 4. С. 90-123.
35. F. G. Shinskey, Process Control System, 4th ed., New York: McGraw-Hill, 1996.
36. M. Johansson, Piecewise Linear Control Systems. PhD thesis, Lund Inst. Technology, 1999.
37. T. F. Edgar, Feedback Controller synthesis, Amer Inst of Chemical Engineers, 1998.
38. Finn Haugen, PID control, Tapir Forlag, 2004.
39. John A. Shaw, Process Control Solutions. Rochester, New York, 2003.
40. J. G. Ziegler and N. B. Nichols, Optimum setting for automatic controllers, Trans. ASME, November 1994.
41. Fradkov, A. L., Miroshnik, I. V., Nikiforov, V. O. Nonlinear and Adaptive Control of Complex Systems. (Series: Mathematics and Its Applications. Vol. 491.) Dordrecht: Kluwer, 1999

42. Franklin, G. F., D. Powell and M. Workman. Digital Control of Dynamic Systems. Ellis-Kagle Press, 1998.
43. Arsene, C.T.C.; Al-Dabass, D.; Hartley, J., A Study on Modeling and Simulation of Water Distribution Systems Based on Loop Corrective Flows and Containing Controlling Hydraulics Elements, Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), 2012 Third International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation, 8-10 Feb. 2012.
44. M. Komareji, J. Stoustrup, H. Rasmussen, N. Bidstrup, P. Svendsen, and F. Nielsen, Simplified Optimal Control in HVAC Systems, Control Applications, (CCA) & Intelligent Control, (ISIC), 2009 IEEE, 8-10 July 2009
45. Vakiloroyaya, V.; Ha, Q.P., Modeling and control of an energy-efficient hybrid solar-assisted air conditioning system, Power Engineering Conference (AUPEC), 2013 Australasian Universities, Sept. 29 2013-Oct. 3 2013
46. A. Gambier and E. Badreddin, Control of Small Reverse Osmosis Desalination Plants with Feed Water Bypass, Control Applications, (CCA) & Intelligent Control, (ISIC), 2009 IEEE, 8-10 July 2009
47. Gambier, A.; Miksch, T.; Badreddin, E., Fault-tolerant control of a small reverse osmosis desalination plant with feed water bypass, American Control Conference (ACC), 2010, June 30 2010-July 2 2010
48. Kutsevich I., Petrsovsky M. "Integrated Environment for Acquisition, Processing and Control by Digital Data" The international Symposium on Problems of Modular information Computer Systems and NetWorks, ESONE Committee, 1996.
49. Ivanov K.A., Goryunov A.G. Capacity pump control by dual-channel adaptive system with throttle and frequency Control // Advanced Materials Research Vol. 1084, 2015, P. 630-635
50. Теория автоматического управления: учебное пособие // В.Ф. Дядик, С.А.Байдали, Н.С.Креницын. Томск, изд.ТПУ, 2011г.
51. Микропроцессорный комплекс общего назначения (МикКОН). – М. ЗАО «Инкоммет» // Руководство по эксплуатации.

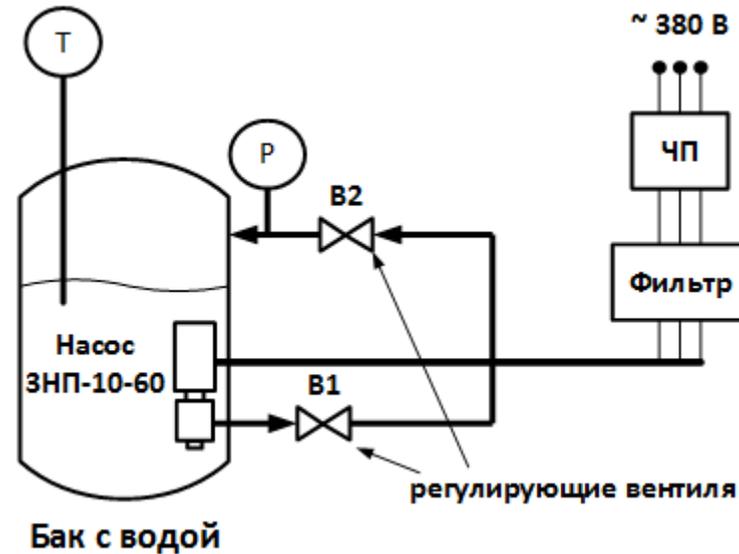
52. Мейстель А. М., Комплектные тиристорные устройства для управления асинхронными электродвигателями // А. М. Мейстель, В. А. Найдис, Ю. И. Херсонский. – М.: "Энергия", 1971 - 120с.
53. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами // Под ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыгина, М. Л. Самовера. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 416 с.
54. Отчет о НИР по специальной теме (промежуточный) // ТПУ; рук. Ливенцов С. Н.; исполн.: Горюнов А. Г. [и др.]. – Инв. № 4587 от 04.10.06. – Томск, 2006. – 125 с.
55. Отчет о НИР по специальной теме (заключительный) // ТПУ; рук. Ливенцов С. Н.; исполн.: Горюнов А. Г. [и др.]. – Инв. № 4588 от 04.10.06. – Томск, 2006. – 188 с.
56. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие // А. С. Ключев, А. Т. Лебедев, С. А. Ключев, А. Г. Товарнов; Под ред. А. С. Ключева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.
57. Теоретические основы, методы и модели управления большими электроэнергетическими системами // Васильев С.Н., Воропай Н.И., Гвоздев Д.Б. [и др.]. – М.: ПАО "ФСК ЕЭС", 188 с.
58. Развитие методов и систем имитации в СССР и России. // Якимов И.М., Девятков В.В. – М.: Наука, 2002 – 5 с.
59. Моделирование сложных систем. // Бусленко Н.П. М.: Наука, 1978 – 400 с.
60. Имитационное моделирование систем - искусство и наука. // Шеннон Р. Дж. – М.: Мир, 1978 г. - 418 с.
61. Моделирование на GPSS. // Шрайбер Т. Дж. – М.: Машиностроение, 1980 г. - 592 с.

62. Имитационное моделирование производственных систем // Под. ред. А. А. Вавилова. — М.: Машиностроение; Берлин: Ферлаг Техник, 1983. — 416с.
63. Комплекс технических средств «МИКОН». Комплекс программного обеспечения «МИКСИС» [Электронный ресурс]: Техническое описание / ЗАО «ИНКОММЕТ». — Электрон. дан. — М., 2006. — URL: <http://www.inkommet.ru>. (дата обращения: 21.05.2016)
64. Михайлов В. П. Дифференциальные уравнения в частных производных. М., 1976.
65. Ракин Л. В. Введение в теорию уравнений математической физики. СПб., 1999.
66. Фрэнкс Р. Математическое моделирование в химической технологии. — М.: Химия, 1971.
67. Справочник по экстракции. В 3-х т. // Под общ. ред. д.-ра хим. Наук А. М. Розена, Т. 1. Николотова З. И., Карташова Н. А. Экстракция нейтральными органическими соединениями. — М.: Атомиздат, 1976. 600 с.
68. Столер А., Ридчарс Р. Переработка ядерного горючего: Пер. с англ. А. П. Зефинова. — М.: АТОМИЗДАТ, 1964. — 645 с.
69. Закгейм А. Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов. Математическое описание процессов. — М.: Химия, 1971.-272с.
70. Zadeh L. Fuzzy sets // Information and Control. — 1965. — №8. — P. 338-353.
71. Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide, Version 2. The MathWorks, Inc., 1999.
72. Балинова В.С. Статистика в вопросах и ответах: Учеб. пособие. — М.: ТК. Велби, Изд-во Проспект, 2004. — 344 с.
73. Эконометрика: Учебник / Под ред. И.И. Елисеевой. — М: Финансы и статистика, 2002. — 344 с.
74. А. Isidori, Nonlinear Control Systems. Berlin: Springer-Verlag, second ed. 1989. 297 p.

75. Горюнов А.Г. Устройство управления исполнительным механизмом постоянной скорости систем автоматического управления и противоаварийной защиты // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2011. – № 6. – С. 47–51.
76. Rodrigo Alvite Romano, Claudio Garcia Valve friction and nonlinear process model closed-loop identification // Journal of Process Control 21 (2011) P. 667–677.
77. R.A. Romano, C. Garcia, Karnopp friction model identification for a real control valve, in: Proceedings of the 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, 2008.
78. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах. - Москва: Мир, 1983.
79. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход. - Москва, "Вильямс", 2004, 992 с.
80. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием / Пер. с польского. – М.: Машиностроение, 1974.– 328 с.
81. Goryunov A.G. Ustroystvo upravleniya ispolnitelnymi mekhanizmami postoyannoy skorosti system avtomaticheskogo upravleniya i protivovariynoy zashshity [The device controlling the actuator constant speed of automatic control and emergency protection] // Pribory I sistemy. Upravlenie, control, diagnostika. [Devices and systems. Management, monitoring, diagnostics]. 2011. № 6. P. 47–51.
82. Goryunov A.G., Mikhaylov V.S. The automatic control system of a multi-component nonequilibrium extraction process in the pulse column // Journal of Process Control 22 (2012) – P. 1034–1043.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты испытаний ЧП Danfoss FC200 на стенде

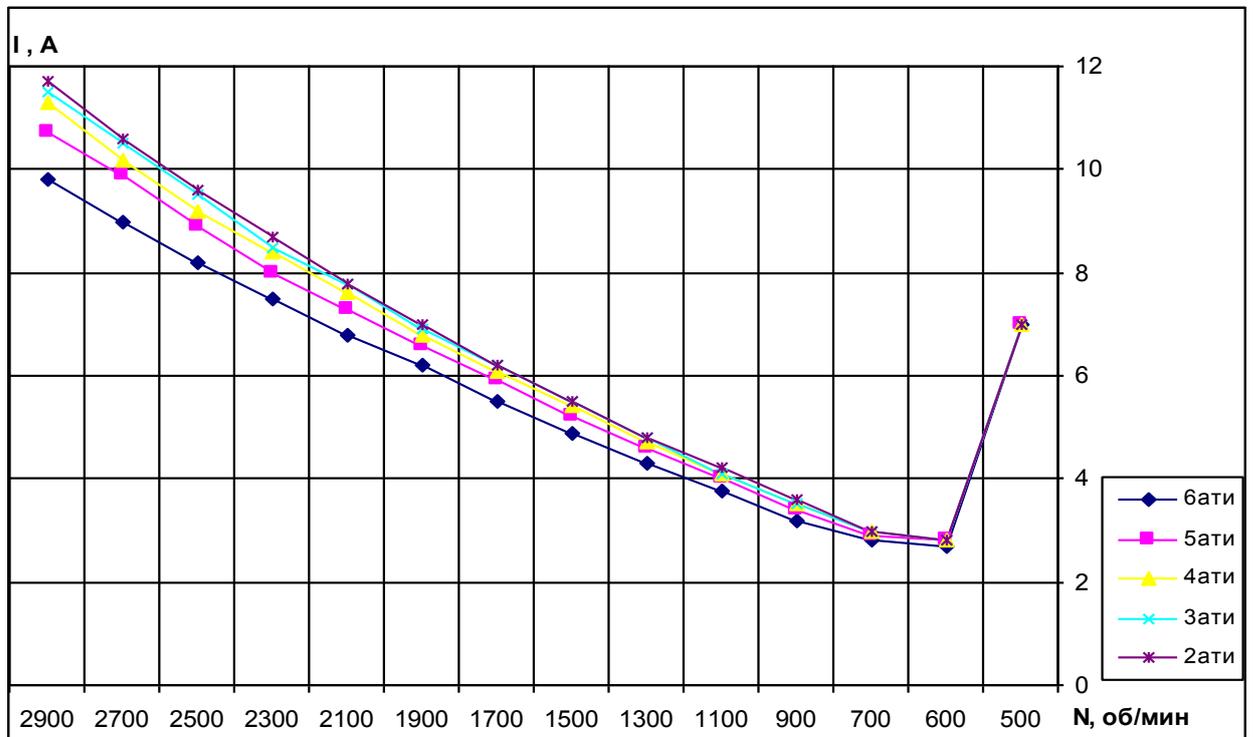


Состав установки:

- бак с водой ($V=1\text{м}^3$);
- насос ЗНП-10-60;
- система трубопроводов и вентиляй;
- датчик давления (измеряет давление в выходном трубопроводе);
- датчик температуры (измеряет температуру воды в баке);
- тестер Fluke 990 DSL (измеряет температуру обмоток двигателя);
- частотный преобразователь Danfoss VLT AQUA Drive FC 200 и фильтр нижних частот.

Сводные данные эксперимента

Обороты (N)	Давление (P), атм	Ток (I), А								
2900	6	9,8	5	10,7	4	11,3	3	11,5	2	11,7
2700	5,2	9	4,4	9,9	3,5	10,2	2,6	10,5	1,8	10,6
2500	4,5	8,2	3,7	8,9	3	9,2	2,2	9,5	1,6	9,6
2300	3,8	7,5	3,1	8	2,5	8,4	1,9	8,5	1,4	8,7
2100	3,2	6,8	2,6	7,3	2,1	7,6	1,6	7,8	1,2	7,8
1900	2,6	6,2	2,1	6,6	1,7	6,8	1,3	6,9	1	7
1700	2,1	5,5	1,7	5,9	1,4	6,1	1,1	6,2	0,9	6,2
1500	1,7	4,9	1,4	5,2	1,1	5,4	0,9	5,5	0,7	5,5
1300	1,3	4,3	1,1	4,6	0,9	4,7	0,8	4,8	0,6	4,8
1100	1	3,75	0,8	4	0,7	4,1	0,6	4,1	0,5	4,2
900	0,75	3,2	0,6	3,4	0,55	3,5	0,5	3,5	0,4	3,6
700	0,5	2,8	0,5	2,9	0,5	3	0,4	3	0,4	3
600	0,45	7	0,4	7	0,4	7	0,4	7	0,3	7
500	0,45	7,5	0,4	7,5	0,4	7,4	0,4	7	0,3	7,3



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Рабочий режим модели КЭЖ

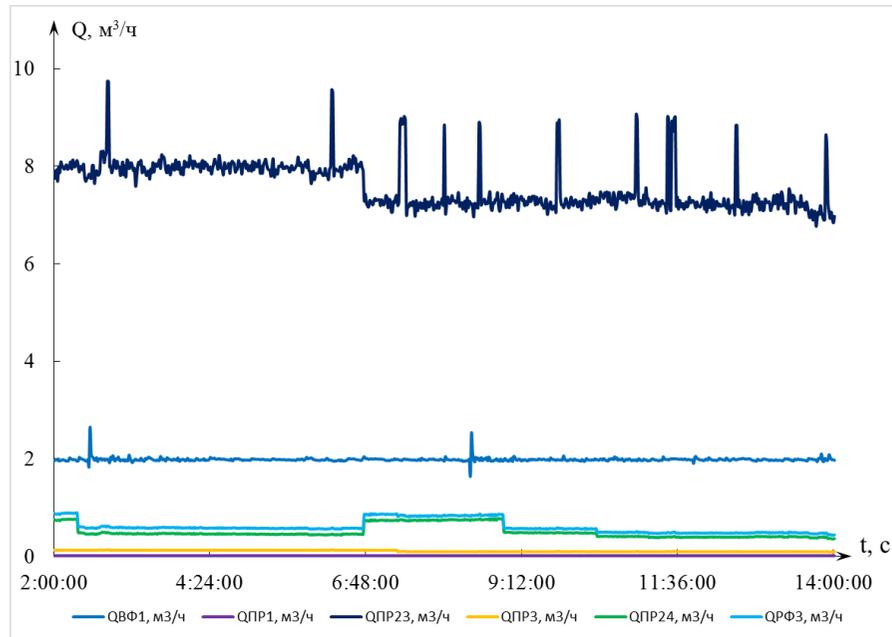


Рисунок 54 Реальные тренды

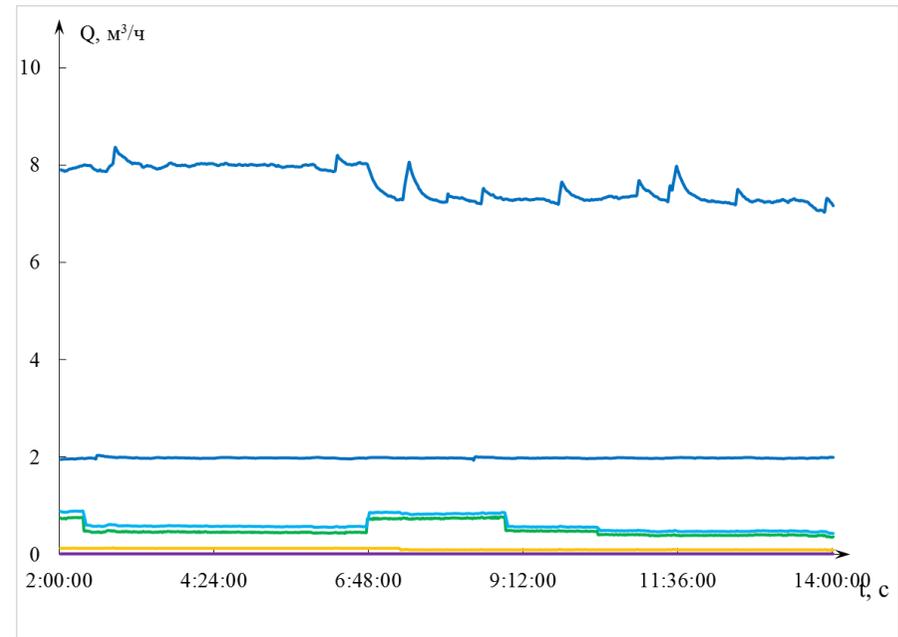
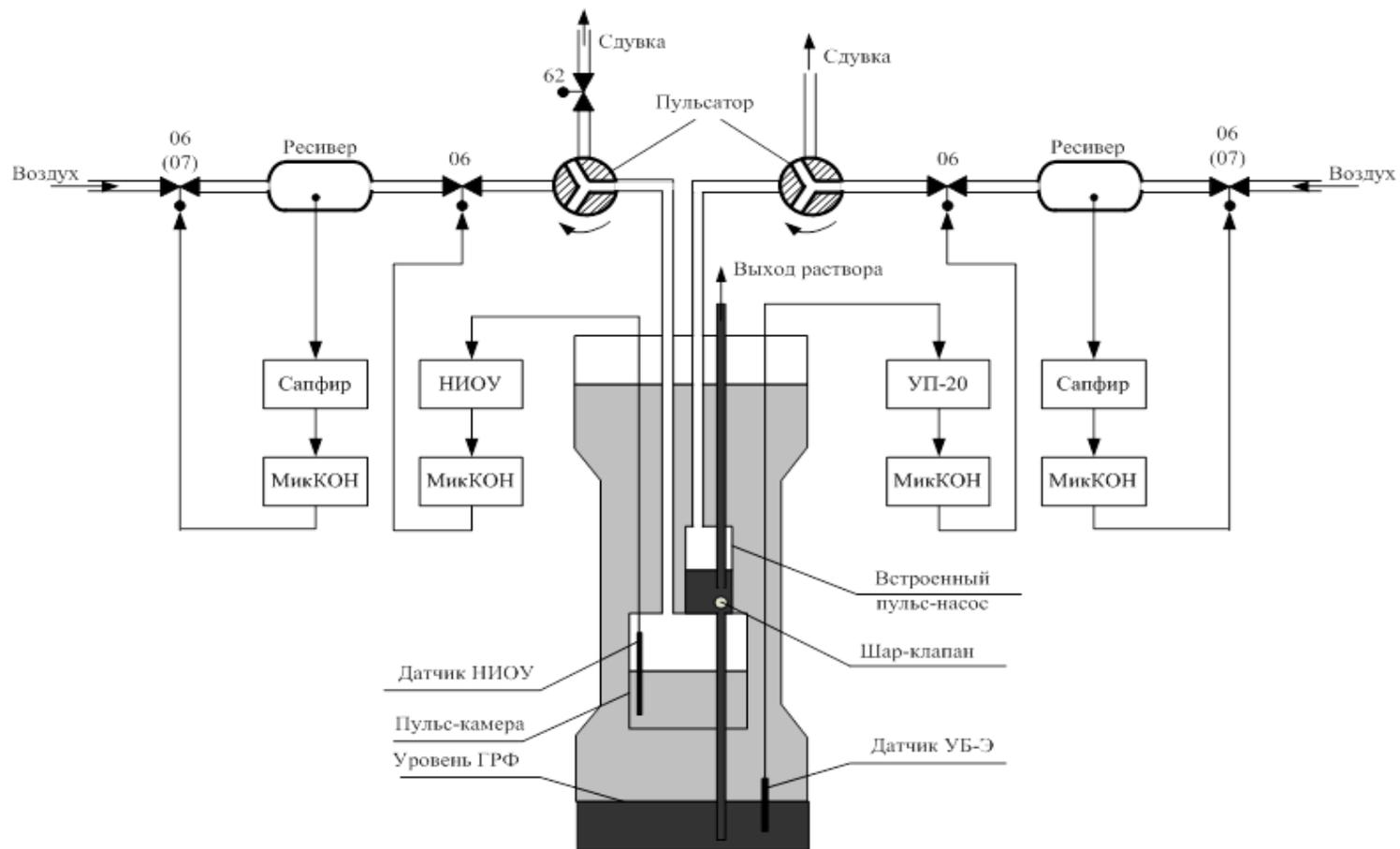


Рисунок 55 Отцифрованные тренды

	ВФ1	РФ1	РФ2	ПР1	ПР23	РР	ПР3	ПР24	РФ3
	из трендов	из регламента	из регламента	из трендов	из трендов	из регламента	из трендов	из трендов	из регламента
Среднее	1,986	2,000	0,008	0,008	7,589	7,578	0,109	0,497	0,605
Стандартное отклонение	0,045	0,000	0,000	0,0005	0,472	0,343	0,018	0,130	0,131
Минимум	1,653	2,000	0,005	0,005	6,764	7,300	0,086	0,349	0,436
Максимум	2,646	2,000	0,014	0,014	9,744	8,000	0,139	0,771	0,889
Дисперсия выборки	0,002	0,000	0,000	0,000	0,222	0,117	0,000	0,017	0,017

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Схема работы САР уровня ПК и ГРФ



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт внедрения на АО «СХК»

Копия


СИБИРСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ
 ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»
 Акционерное общество
 «СИБИРСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ»
 (АО «СХК»)
 РАДИОХИМИЧЕСКИЙ ЗАВОД
 (РХЗ)
 АКТ № 70/1445
 22.05.2017
 по результатам работы

УТВЕРЖДАЮ

Директор по производству



Н. Л. Шинкаркин
 2017г.

Комиссия в составе:

Председатель комиссии:
 Члены комиссии

А.И. Сильченко
 О.И. Николаенков
 С.А. Пашков
 Д.В. Чернышов
 Д.Г. Rogoznyy

рассмотрела результаты работ, проведенных при непосредственном участии инженера по АСУ ТП Иванова К.А. по созданию систем автоматизированного управления на Радиохимическом заводе АО «СХК», и составила настоящий акт о внедрении этих результатов, вошедших в диссертационные исследования.

Иванов К.А. являлся исполнителем НИОКР СХК №02-55/247 ДСП от 17.11.2008 г. (п.25). по теме «Разработка системы стабилизации расхода органической фазы».

Комиссия подтверждает, что в соответствии с Планом по внедрению новой техники и улучшению условий эксплуатации оборудования КИПиА в 2012г. п.3.9 («ССР ОФ») №05/305 от 28.12.2011г. и Мероприятиям № 70-05/103 от 07.03.2012 о вводе в эксплуатацию системы стабилизации расхода органической фазы с частотным приводом, при непосредственном участии Иванова К. А. была разработана и внедрена система стабилизации расхода органической фазы, включающая в себя алгоритмы локальных САУ с использованием исполнительных механизмов типа частотный привод и цифровыми регуляторами в количестве 4 контуров управления расходом (протокол №70/1305 от 19.05.2014).

Внедрение ССР ОФ позволило снизить ошибку управления расходом и амплитуду колебания уровня в буферных ёмкостях в 2 раза, что обеспечило необходимые условия для технической возможности увеличения производственной программы. Также, использование ССР ОФ позволило сократить производственные затраты согласно приложенной справке №70/1297 от 05.05.2017.

В настоящее время система стабилизации расхода органической фазы находится в эксплуатации, Акт №7/367 от 14.07.2014.

В результате внедрения разработанной системы управления при непосредственном активном участии Иванова К. А., согласно оценочной справке №70/1297 от 05.05.2017, получен экономический эффект, который составляет около 1,5 млн. рублей в год в ценах 2016 года.

По оценке комиссии, личный вклад Иванова К. А. в результаты работ составляет не менее 70%.

Главный инженер РХЗ

А.И. Сильченко

Главный специалист
(по техническому развитию)

О.И. Николаенков

Главный технолог
(по радиохимическому производству)

А.И. Хило
С.А. Пашков

Начальник ПТО РХЗ

Д.В. Чернышев

И.о. начальника УЭ КИПиА

Д.Г. Рогозный