

На правах рукописи

Караневская Татьяна Николаевна

**ОПТИМИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И
ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК
ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДГОТОВКИ НЕФТИ НА ОСНОВЕ
ЭКОНОМИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь, 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: **ШУМИХИН Александр Георгиевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные
оппоненты: **МУРАВЬЕВА Елена Александровна**
доктор технических наук, профессор,
филиал ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический
университет» (в г. Стерлитамаке),
кафедра «Автоматизированные технологические
и информационные системы»,
заведующая кафедрой

ШМЕЛЕВ Валерий Александрович
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный
технический университет», кафедра
«Автоматизация производственных
процессов», доцент кафедры

Ведущая организация: Государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Альметьевский государственный нефтяной институт»

Защита диссертации состоится «20» октября 2023 г., в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д ПНИПУ.05.14, созданного на базе ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://pstu.ru/>).

Автореферат диссертации разослан «7» июля 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д ПНИПУ.05.14
доктор технических наук, доцент

В.И. Фрейман

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В топливно-энергетическом комплексе России нефтегазовая промышленность занимает ключевое место.

Технологический процесс промысловой подготовки нефти является многостадийным и представляет собой совокупность последовательных операций по обработке продукции скважин для достижения конечного результата – получения товарной нефти, утилизации попутно-добываемого газа и воды.

Основной задачей при проектировании новой установки промысловой подготовки нефти (УПН) или реконструкции существующей является получение продукции заданного качества в требуемом объеме в наиболее экономически целесообразном аппаратурно-технологическом оформлении процессов. При эксплуатации существующей УПН необходимо таким образом управлять производством, чтобы при подготовке поступающей на УПН сырой нефти обеспечить получение нефти товарного качества на выходе установки при минимальных текущих затратах. Кроме того, при эксплуатации УПН необходимо учитывать изменения параметров исходного сырья, требования к конечной продукции, изменение режимов работы оборудования и т.д.

В связи с этим, проведение исследований, направленных на эффективное решение задач оптимизации и управления при проектировании и эксплуатации автоматизированных установок промысловой подготовки нефти, с использованием математических методов и компьютерных технологий, является важным и **актуальным**, позволяющим обеспечить эффективное функционирование технологических объектов и планирование инвестиций в развитие нефтедобывающих комплексов.

Степень проработанности темы.

Совершенствованием технологии и управления процессами подготовки нефти занимались отечественные ученые В.С. Бойко, Ю.П. Борисов, З.К. Рябинина, В.П. Тронов, Г.С. Лутошкин и др. Системный анализ и технологические основы процессов промысловой подготовки нефти освящены в работах В.В. Кафарова, В.П. Мешалкина, А.В. Кравцова, Н.В. Ушевой, А.А. Ишмурзина, Р.А. Храмова.

В публикациях В.Д. Лысенко, А.П. Веревкина, И.Д. Ельцова, О.В. Кирюшина освящены вопросы моделирования и оптимизации процессов добычи нефти. Моделированием химико-технологических процессов занимались зарубежные ученые Jonson A., Losoda A., Brusset H., Depeyre D., Rao D., Powers S., Kurabunda A. и др.

В работах Т.Н. Гартмана, Д.В. Клушина детально рассмотрены вопросы построения математических моделей типовых химико-технологических процессов, в монографии В.Л. Беякова – проектирование типовых систем и технических средств автоматизации, контроля и регулирования.

Автоматизация проектирования химических производств рассмотрена в работах С.С. Хачатряна, Г.Г. Арунянца, где значительное внимание уделено параллельному проектированию аппаратурно-технологического оформления и

автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), однако не освещается информация о форме и составе критериев для решения задач оптимизации и управления.

С.А. Ахметовым, М.Х. Ишмияровым, А.П. Веревкиным и др. приведена структура модели оптимизации производительности технологической установки первичной переработки нефти по критерию удельных затрат за сутки, имеющему вид однопараметрической функции.

В рассмотренных работах критерии для оценки эффективности при параллельном проектировании УПН и систем автоматизации с определением оптимальных значений параметров технологического режима, а также оценки эффективности управления при эксплуатации УПН не приводятся, что определяет актуальность их разработки для решения задач оптимизации и управления при проектировании и эксплуатации автоматизированных УПН и внедрения разработок в проектную практику и автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) УПН.

Объектом исследования являются процессы проектирования и эксплуатации автоматизированных установок промышленной подготовки нефти.

Предмет исследования – методы, модели и алгоритмы оптимизации и управления процессами промышленной подготовки нефти.

Цель диссертационной работы – повышение эффективности процессов проектирования и эксплуатации автоматизированных установок промышленной подготовки нефти на основе разработанных методов, моделей и алгоритмов оптимизации и управления.

Поставленная цель определяет необходимость решения следующих **задач**:

1. На основе анализа технологии промышленной подготовки нефти формализовать ее описание как объекта оптимизации и управления при проектировании и эксплуатации.

2. Для решения задач оптимизации и управления многостадийным технологическим процессом промышленной подготовки нефти разработать математические модели процессов стадий, метод и алгоритм идентификации моделей, метод и алгоритм оптимизации, критерии для определения оптимального состава оборудования при проектировании автоматизированной установки и оптимальных значений параметров ее технологического режима в условиях эксплуатации.

3. Разработать структурную модель автоматизированной системы оптимизации и оперативного управления технологическим режимом работы оборудования установки промышленной подготовки нефти.

4. Апробировать и внедрить методику определения оптимального состава оборудования и параметров технологического режима установок в проектную и производственную деятельность, относящуюся к промышленной подготовке нефти.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Разработаны экспериментально-аналитические модели, связывающие переменные каждой стадии процесса и отличающиеся тем, что для их построения

и идентификации используются данные измерений переменных с действующих установок промышленной подготовки нефти и информация из отраслевых нормативных документов, а также метод и алгоритм оперативной параметрической идентификации моделей, основанные на построении нейронных сетей для определения параметров моделей по измеренным значениям входных и выходных переменных стадий. Это позволяет прогнозировать по моделям режимы работы установок на стадиях проектирования и эксплуатации, и повысить оперативность идентификации моделей.

2. Разработан алгоритм решения задачи оптимизации многостадийного технологического процесса подготовки нефти, основанный на принципе оптимальности Беллмана, с экономическими критериями оптимальности, отличающимся тем, что на этапе проектирования критерием является аддитивная функция приведенных затрат по стадиям, позволяющая учитывать капиталовложения в оборудование и эксплуатационные затраты, а на этапе эксплуатации – прибыль производства, включающий локальные эксплуатационные затраты по стадиям. Это позволяет производить декомпозицию задач оптимизации как для проектирования объекта, так и для управления технологическим режимом действующей установки, и для расчета эксплуатационных затрат в обоих критериях использовать одни и те же функциональные зависимости.

3. Предложены методы определения и коррекции оптимальных значений управляющих переменных на стадиях процесса подготовки нефти, отличающиеся тем, что зависимости, связывающие найденные при решении задачи оптимизации значения управляющих переменных для стадий и их входных переменных, представляются в виде нейросетевых моделей, что позволяет повысить оперативность определения и реализации оптимальных значений управляющих переменных в зависимости от значений входных переменных стадий.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в разработанном научно-методическом подходе к параллельному проектированию аппаратурно-технологического оформления и системы управления автоматизированных установок промышленной подготовки нефти, а также методах, моделях и алгоритмах оптимизации технологических режимов работы оборудования, что повышает эффективность управления действующими установками, в том числе экономическую, в условиях неустойчивости режима работы скважин и нестабильности состава нефти.

Практическая значимость заключается в следующем:

– в разработанной методике расчета и оптимизации технологических режимов работы автоматизированных установок подготовки нефти по критерию «приведенные затраты» при проектировании установок и по критерию «прибыль» при их эксплуатации;

– в учете в критериях оптимальности при проектировании и эксплуатации автоматизированных установок подготовки нефти меняющейся конъюнктуры

рынка товарной нефти и ее группы качества, а также налогового режима в отрасли;

– в методике параллельного проектирования технологии и системы управления установкой, заключающейся в том, что алгоритмы оптимизации и управления технологическими режимами установок разрабатываются на этапе проектирования и передаются на эксплуатацию вместе с проектами строительства установок промышленной подготовки нефти;

– в разработанной и внедренной программе «Choice equipment» выбора оптимального состава технологического оборудования из номенклатурного ряда, представленного в виде баз данных, позволяющей «пользователям» производить выборки требуемого оборудования и экспресс-оценку его стоимости.

Методы исследования. В процессе работы над диссертацией использовались методы теории управления, математического моделирования и оптимизации, теории массо- и теплообмена, экономического анализа и статистической обработки информации.

Внедрение результатов работы. Внедрение предложенных методов, моделей и алгоритмов в алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы управления и оптимизации технологических режимов работы оборудования действующей установки подготовки нефти приводит к сокращению времени, затрачиваемого на определение параметров ведения технологического процесса центральной инженерно-технологической службой (ЦИТС), на 35-40%, что нашло отражение в акте о внедрении результатов диссертационной работы в деятельность Филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг «ПермНИПИнефть» в г. Перми. Оптимизация технологических режимов позволяет повысить эффективность работы установки и сэкономить до 15% суммарных затрат на подготовку нефти.

Внедрение в Филиале ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг «ПермНИПИнефть» в г. Перми программы выбора оптимального состава технологического оборудования «Choice equipment» позволяет повысить оперативность поиска информации по характеристикам оборудования, снижает затраты времени на выбор технологического оборудования и средств автоматизации при проектировании установок без увеличения численности персонала на 42%. Точность прогнозирования приведенных затрат в технико-экономическом обосновании строительства объекта с использованием алгоритма оптимизации по результатам расчета технико-экономических показателей после ввода объекта в эксплуатацию в среднем увеличилась в 3 раза для выбранного варианта аппаратурно-технологического оформления.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель многостадийного технологического процесса промышленной подготовки нефти с математическими моделями стадий, идентифицирующими зависимости показателя качества товарной нефти от показателя обводненности сырой нефти и значений технологических переменных процессов стадий. Метод и алгоритм оперативной параметрической идентификации моделей связи входных и выходных переменных стадий по данным их измерения на

технологической установке с использованием технологии нейронных сетей (п. 8 паспорта специальности).

2. Алгоритм оптимизации многостадийного технологического процесса с экономическими критериями оптимальности для подбора оборудования при проектировании объекта подготовки нефти и определения режима его работы при эксплуатации (п. 4 паспорта специальности).

3. Методы определения и коррекции оптимальных значений управляющих переменных на стадиях процесса подготовки нефти, позволяющие связать найденные при решении задачи оптимизации значения управляющих переменных и значения входных переменных стадий нейросетевыми моделями (п. 4 паспорта специальности).

4. Результаты апробации полученных разработок и внедрения методики определения оптимальных состава оборудования и параметров технологического режима установок в проектную, производственную и учебную деятельность (п.п. 4, 9 паспорта специальности).

Достоверность результатов подтверждается сравнением и совпадением теоретических и практических результатов исследований, не противоречащих результатам, полученным другими авторами, и отраслевым нормативным документам.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» в 2016-2018 гг. и кафедры «Оборудование и автоматизация химических производств» в 2019-2022 гг. Пермского национального исследовательского политехнического университета, а также получили положительную оценку на конференциях и семинарах: 5-я Международная научно-практическая конференция «Сбор, подготовка и транспортировка нефти и газа. Проектирование, строительство, эксплуатация», г. Сочи, 2016 г.; Международная научно-практическая конференция «Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса», г. Нижневартовск, 2017 г.; X Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники», г. Уфа, 2017 г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Автоматизированные системы управления и информационные технологии», г. Пермь, 2017 г.; Всероссийская научно-практическая конференция «Химия. Экология. Урбанистика», г. Пермь, 2018 г., 2020 г.; Конкурсах на лучшую научно-техническую разработку молодых ученых и специалистов ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», г. Пермь в 2016 г., г. Москва в 2022 г.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 14 печатных работах, в том числе 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК России для публикации результатов кандидатских диссертаций, 1 статья – в издании, индексируемом в Web of Science, получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 113 наименований, и 12 приложений. Работа изложена на 208 листах машинописного текста, содержит 48 рисунков и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, раскрыты научная новизна и практическая значимость результатов диссертации, отмечены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе анализа основных схем и технологий подготовки нефти определены основные структурные составляющие и узлы технологического процесса подготовки нефти: сепарация первой ступени, предварительное обезвоживание, нагрев, глубокое обезвоживание и обессоливание, конечная ступень сепарации. Технологические схемы промышленной подготовки нефти разрабатывают в зависимости от условий эксплуатации месторождения и свойств продукции скважин. Выполнен топологический анализ систем промышленной подготовки нефти, для упрощения расчетов материального и теплового балансов многостадийного технологического процесса схема подготовки нефти в диссертации представлена в виде характеристического потокового графа и соответствующей ему матрицы смежности. Используемый при принятии решений по составу технологического оборудования установки модульный подход за счёт высокой степени унификации и агрегирования позволяет формализовать задачи выбора оборудования и упростить их алгоритмизацию (рисунок 1).

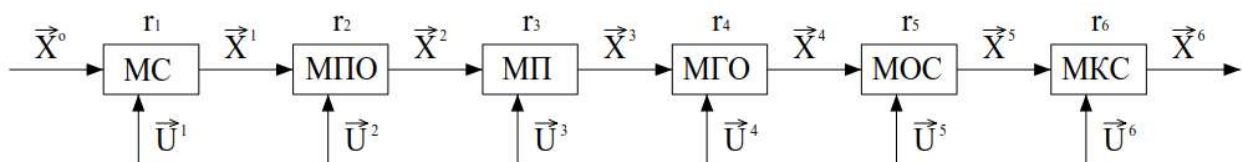


Рисунок 1 – Расчетная схема подготовки нефти:

MC – модуль сепарации; МПО - модуль предварительного обезвоживания;

МП – модуль подогрева; МГО – модуль глубокого обезвоживания;

МОС – модуль обессоливания; МКС – модуль конечной ступени сепарации

В настоящей работе учитывается не только обеспечение заданных свойств технологической структуры, но и рассматривается минимизация совокупных стоимости аппаратурно-технологического оформления на этапе проектирования установки и текущих затрат в процессе ее эксплуатации. Задачи оптимизации при проектировании и эксплуатации технологической установки являются технически и экономически связанными. Совместное (параллельное) проектирование и управление процессом подготовки нефти заключается в том, что на эксплуатацию передается проект строительства или реконструкции объектов, включающий также проект системы автоматизации нижнего уровня и

алгоритмы АСУ ТП, в том числе алгоритмы оптимизации технологических режимов стадий. Проект нижнего уровня АСУ ТП выполняется при этом в соответствии с типовыми техническими решениями, определяемыми отраслевыми стандартами, стандартами предприятий-заказчиков проекта, федеральными нормами и правилами промышленной безопасности.

При решении задач проектирования определяются типоразмеры аппаратов, а также оптимальные значения параметров технологического режима для усредненных в проекте характеристик сырой нефти.

Решение задачи управления действующей установкой заключается в оперативном определении оптимальных значений параметров технологического режима при существующем аппаратном оформлении процесса, меняющихся характеристиках нефтяной эмульсии и термобарических условий на скважине, и в реализации режима.

Вторая глава посвящена моделированию процессов промышленной подготовки нефти. Технология промышленной подготовки нефти представляет собой многостадийный процесс, характеризующийся входными, выходными и управляющими переменными по стадиям подготовки нефти. Описание переменных по стадиям подготовки нефти приведено в таблице.

Таблица

Описание технологических переменных по стадиям подготовки нефти

№ п/п	Стадии процесса подготовки	Вектор входных переменных $\vec{X}^{i-1}, i = \overline{1,6}$	Вектор выходных переменных $\vec{X}^i, i = \overline{1,6}$	Вектор управляющих переменных $\vec{U}^i, i = \overline{1,6}$	Функция (модель), связывающая переменные
1	сепарация	$Q_{нгс}, W_{нгс}, T_{нгс}, P_{нгс}$	$Q_{ж}, Q_{г1}, P_{ж}$	$P_c, \tau_c, L_{ж}$	$F_1(\vec{X}^0, \vec{X}^1, \vec{U}^1) = 0$
2	предварительное обезвоживание		$Q_{ж1}, Q_{в1}, P_{ж1}, W_{н1}$	$P_{по}, Q_{дэ}, \tau_{по}$	$F_2(\vec{X}^1, \vec{X}^2, \vec{U}^2) = 0$
3	подогрев		$T_{ж1}$	T_n, F_m, Q_m	$F_3(\vec{X}^2, \vec{X}^3, \vec{U}^3) = 0$
4	глубокое обезвоживание		$Q_{ж2}, Q_{в2}, P_{ж2}, W_{н2}$	$P_{го}, T_{го}, \tau_{го}$	$F_4(\vec{X}^3, \vec{X}^4, \vec{U}^4) = 0$
5	обессоливание		$Q_{н1}, Q_{в3}, Q_{соль}, P_n, W_n$	$P_{ос}, Q_{пр.в}, \tau_{ос}$	$F_5(\vec{X}^4, \vec{X}^5, \vec{U}^5) = 0$
6	концевая ступень сепарации		$Q_n, Q_{г2}, P_g$	$P_{кс}, \tau_{кс}, L_{кс}$	$F_6(\vec{X}^5, \vec{X}^6, \vec{U}^6) = 0$

Условные обозначения: Q – расход; w – обводненность; T – температура; P – давление; τ – время пребывания; L – уровень; F_m – поверхность теплообмена.
 Индексы переменных: $нгс$ – нефтегазожидкостная смесь; $ж, ж1, ж2$ – жидкость (1, 2); $г, г1, г2$ – газ (1, 2); $в1, в2, в3$ – вода 1 (2, 3); $н, н1, н2$ – нефть (1, 2); $дэ$ – деэмульгатор; $т$ – топливо; $пр. в$ – пресная вода.
 Индексы стадий подготовки: $с$ – сепарация; $по$ – предварительное обезвоживание; $п$ – подогрев; $го$ – глубокое обезвоживание; $ос$ – обессоливание; $кс$ – концевая ступень сепарации; i – номер стадии технологического процесса.

Разработаны экспериментально-аналитические модели процессов подготовки нефти, используемые для определения оптимальных значений управляющих переменных стадий. Представление математического описания процессов подготовки нефти в виде аналитических выражений расчета процессов сепарации, обезвоживания, нагрева имеет преимущество при алгоритмизации задач оптимизации и управления действующими объектами промышленной подготовки нефти, так как позволяет дополнить аналитические выражения значениями параметров, определенными по экспериментальным данным, полученным на объекте, и использовать информацию из отраслевых нормативных документов.

В качестве примера представлены схема (рисунок 2) и математическое описание процесса обезвоживания.

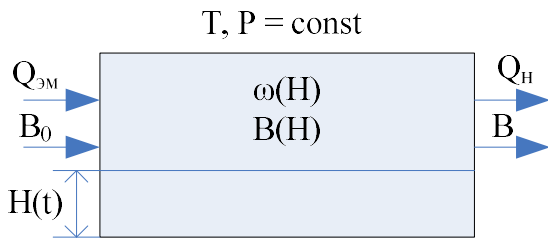


Рисунок 2 - Упрощенная схема отстойника

Условные обозначения:

$Q_{эм}$, $Q_н$ – количество эмульсии, поступающей на вход отстойника, и выходящей из отстойника обезвоженной нефти; B_0 , B – обводненности эмульсии на входе и нефти на выходе из отстойника; $\omega(H)$ – распределение скорости стесненного осаждения капель воды по высоте отстойника; $B(H)$ – изменение обводненности эмульсии по высоте отстойника; $H(t)$ – высота водяной подушки; T – температура; P – давление.

Математическое описание процесса обезвоживания нефти включает следующие соотношения:

$$1. \frac{H(t^{(k)}) - H(t^{(0)})}{\Delta t} \cong \frac{B_0 Q_{эм} - B Q_{эм}}{S \rho_в} \equiv f_1; \quad 2. H(t^{(0)}) = H^{(0)};$$

$$3. S = \pi \frac{D^2}{4} \frac{2 \arcsin\left(\frac{2}{D} \sqrt{DH - H^2}\right)}{360} - \sqrt{DH - H^2} \left(\frac{D}{2} - H\right); \quad 4. Q_{эм} = \rho_{эм} S H;$$

$$5. \omega_0 = \frac{Q_{эм} (D - H)}{S L}; \quad 6. \frac{18 \omega_{0i} \mu_н (1 - B)^2}{d_{\max}^2 (\rho_в - \rho_н) g \left[(1 - B)^2 - \left(1 - \frac{B}{B_0}\right)^2 \right]} = (1 - B)^{4,7};$$

$$7. d_{\max} = 43,3 \frac{\sigma^{1,5} + 0,7 \mu_в \cdot u^{0,7} \cdot \sigma^{0,8}}{u^{2,4} \cdot Re^{0,1} \cdot g_{см}^{0,1} \cdot \rho_н \cdot \mu_н^{0,5}},$$

где D – диаметр отстойника, м; S – площадь поперечного сечения емкости, занятой эмульсией, м²; $Q_{эм}$ – нагрузка по эмульсии, м³/с; $\rho_{эм}$ – плотность эмульсии, кг/м³; L – длина зоны осаждения, м; ω_{0i} – скорость стесненного осаждения капли размером d_i , м/с; B_0 , B – обводненности эмульсии на входе и нефти на выходе из аппарата, масс. доли; $\rho_в$, $\rho_н$ – плотность

воды и нефти, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м²/с; d_{max} – максимальный размер устойчивых капель, м; σ – поверхностное натяжение, Н·м; μ_v, μ_n – динамическая вязкость воды и нефти соответственно, Па·с; u – линейная скорость потока, м/с; $\vartheta_{см}$ – кинематическая вязкость смеси, м²/с; Re – критерий Рейнольдса.

При разработке экспериментально-аналитических моделей стадий предварительно осуществлен регрессионный анализ полученных статистических данных о технологических процессах подготовки нефти.

Математические модели динамики процессов сепарации, нагрева и обезвоживания нефти разработаны в форме обыкновенных дифференциальных уравнений. В частности, после проведения вычислительного эксперимента на представленной в форме обыкновенного нелинейного дифференциального уравнения модели динамики изменения обводненности внутри отстойника обезвоживания получена передаточная функция канала обводненность $Y(s)$ – расход эмульсии $X(s)$ вида (1), которая использована в примере выполнения проектного расчета типовой системы регулирования:

$$W_{TOY}^A(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{101.2s + 1} \cdot \frac{1}{1.98s + 1} e^{-30s}. \quad (1)$$

Третья глава посвящена разработке критериев оптимальности и модели оптимизации (алгоритмов) при эксплуатации и проектировании установки промысловой подготовки нефти.

Критерий оптимальности R многостадийного процесса представлен в виде аддитивной функции локальных критериев оптимальности r_i по стадиям технологического процесса подготовки нефти.

Сформулированной задаче оптимизации соответствует следующее выражение:

$$\left\{ R(\vec{X}^0, \vec{U}) = \sum_{i=1}^N r_i(\vec{X}^{i-1}, \vec{U}^i) \rightarrow \min_{\vec{U}} \left| \vec{U} = \bigcup_i \vec{U}^i, i = \overline{1, N}; \vec{U} \in \vec{U}_{доп}; \vec{X} \in \vec{X}_{доп}, \vec{X} = \bigcup_i \vec{X}^i \right\} \rightarrow \rightarrow \vec{U}_{opt}^i, i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где $\vec{X}_{доп}, \vec{U}_{доп}$ – допустимые значения входных $\vec{X}^{(i-1)}$, выходных $\vec{X}^{(i)}$ и управляющих $\vec{U}^{(i)}$ переменных процессов стадий; \vec{U}_{opt}^i – оптимальные значения управляющих переменных стадий; N – количество стадий технологического процесса подготовки нефти.

В качестве критерия оптимальности при эксплуатации установки используется показатель «прибыль», при проектировании установки критерием оптимальности является показатель «приведенные затраты». Для расчета эксплуатационных затрат в обоих критериях использованы одни и те же функциональные зависимости. При эксплуатации решается задача минимизации эксплуатационных затрат или максимизации прибыли Pr (выражение (3)), при проектировании решение задачи сводится к минимизации показателя «приведенные затраты» $Pз$, учитывающему в своем составе эксплуатационные

затраты и капитальные вложения на реализацию аппаратурно-технологического оформления процесса (выражение (4)):

$$\left\{ \begin{aligned} \Pi p = B - C = Q_n \Pi - \sum_{i=1}^N Q_i S_i &\rightarrow \max_{\vec{U}} \left(Q_n \Pi - \sum_{i=1}^N Q_i S_i \right) \rightarrow \min_{\vec{U}} \left(\sum_{i=1}^N Q_i S_i - Q_n \Pi \right) \rightarrow \\ &\rightarrow \min_{\vec{U}} \left(\sum_{i=1}^N r_i \right) - Q_n \Pi \end{aligned} \right\} \rightarrow \vec{U}_{j^{opt}}^{(i)}, \quad i = \overline{1, N}; \quad j = 1, 2, \dots, \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \Pi z_{\mu} = K_{\mu} E_n + C = K_{\mu} E_n + \sum_{i=1}^N Q_i S_{i\mu} &\rightarrow \min_{\vec{U}} \left(K_{\mu} E_n + \sum_{i=1}^N Q_i S_{i\mu} \right) \rightarrow K_{\mu} E_n + \\ &+ \min_{\vec{U}} \left(\sum_{i=1}^N r_{i\mu} \right) \end{aligned} \right\} \rightarrow \mu_{opt}, \quad U_{\mu, opt}^{(i)}, \quad i = \overline{1, N}. \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4): B – выручка от реализации товарной нефти, C – себестоимость подготовки товарной нефти, Q_n – кол-во товарной нефти; Π – цена реализации товарной нефти; S_i – себестоимость подготовки нефти по стадиям; Q_i – кол-во целевого продукта по стадиям; r_i – частные критерии оптимальности (эксплуатационные затраты) для стадий; N – кол-во стадий; K_{μ} – капиталовложения по вариантам аппаратурного оформления; E_n – нормативный срок окупаемости капитальных вложений; μ – вариант аппаратурного оформления.

Алгоритм решения задачи оптимизации основан на принципе оптимальности Беллмана для многостадийных процессов, выражение математической формулировки для которого имеет вид:

$$f_i(\vec{X}^{(i-1)}) = \min_{\vec{U}^{(i)}} \left[r_i^*(\vec{X}^{(i-1)}, \vec{U}^{(i)}) + f_{i+1}^*(\vec{X}^{(i-1)}, \vec{U}^{(i)}) \right], \quad (i = \overline{1, N}), \quad (5)$$

где $r_i^*(\vec{X}^{(i-1)}, \vec{U}^{(i)})$ – значение критерия оптимальности i -й стадии процесса; $f_i(\vec{X}^{(i-1)})$ – значение суммы критериев оптимальности последних $N-(i-1)$ стадий; $f_{i+1}^*(\vec{X}^{(i-1)}, \vec{U}^{(i)}) = f_{i+1}[\varphi_i(\vec{X}^{(i-1)}, \vec{U}^{(i)})]$.

Задача оптимизации многостадийного процесса решается в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 3, в два этапа. Для решения задач условной оптимизации по стадиям подготовки нефти применяется метод нелинейного программирования.

На первом этапе определяются оптимальные значения управляющих переменных как функций входных переменных стадий, начиная с последней. Находятся критерий оптимальности всего процесса и зависимости оптимальных управляющих переменных от входных переменных стадий, а также состояние входа всего процесса. Второй этап решения представляет собой последовательный расчет оптимальных значений управляющих переменных, начиная с первой стадии, для всех стадий, с расчетом значений выходных переменных стадий.

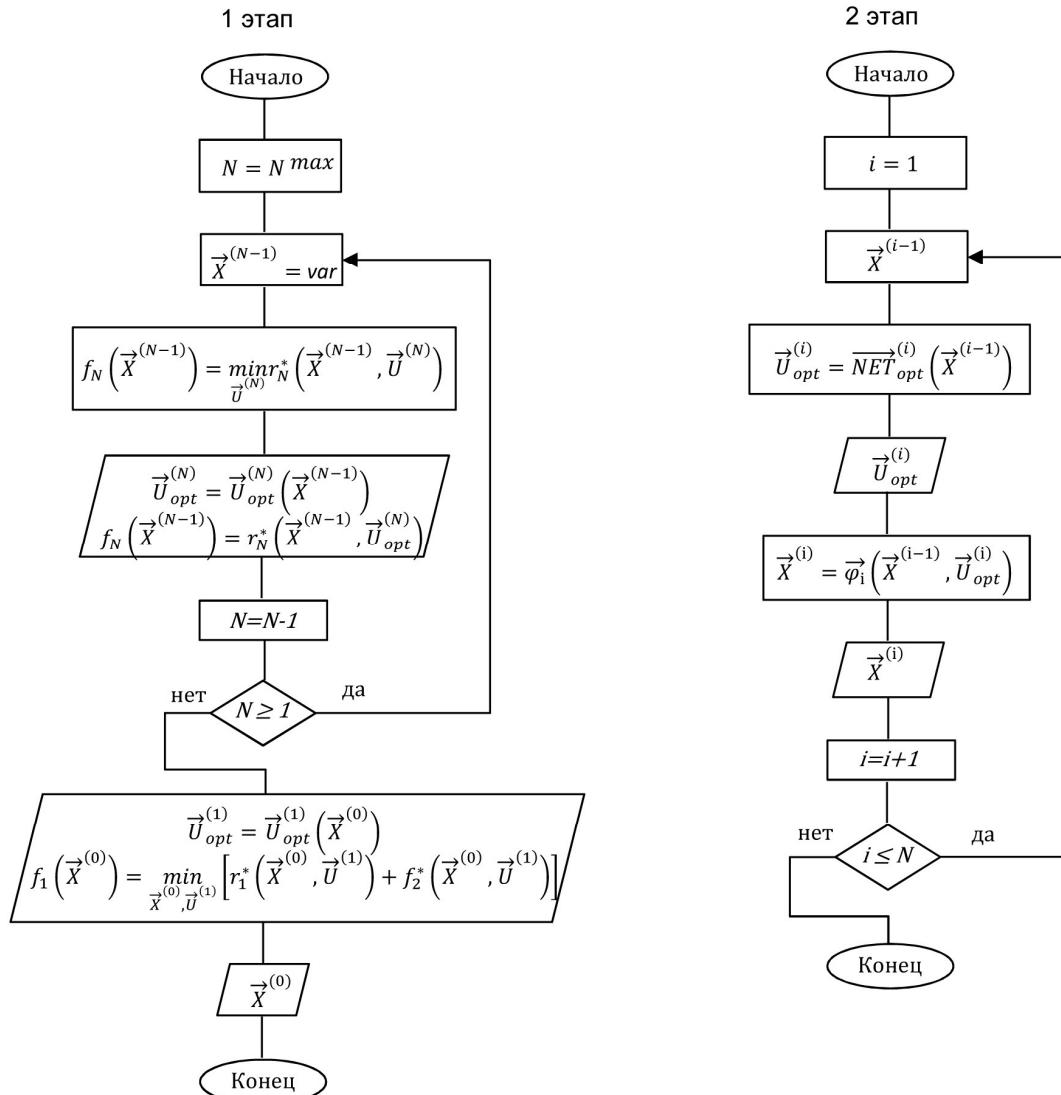


Рисунок 3 – Алгоритм решения задачи оптимизации при эксплуатации установки

В соответствии с алгоритмом решения задачи оптимизации при эксплуатации установки, представленным на рисунке 3 (этап 1), получают для каждой стадии, начиная с последней, массив оптимальных значений управляющих переменных в зависимости от изменения значений входных переменных этой стадии, при этом на выходную переменную (обводненность) последней стадии накладывается ограничение на содержание воды в товарной нефти в соответствии с ГОСТ Р 51858-2002. Решение задачи оптимизации при проектировании технологического процесса подготовки нефти с целью поиска оптимального состава и режимов работы оборудования выполняется для различных вариантов аппаратурно-технологического оформления, охватывающих комбинации состава оборудования в соответствии с используемым при проектировании модульным подходом к его представлению.

Затем на полученных по стадиям подготовки нефти массивах данных проводится обучение нейронных сетей (НС). Входом НС каждой стадии являются значения входных переменных стадии (расход и обводненность нефти), а выходом НС – оптимальные значения управляющих переменных

стадии. При этом найденные по модели технологического процесса стадии значения её выходных переменных (расход и обводненность нефти), как функции входных переменных и оптимальных управляющих переменных стадии, становятся входными переменными НС для вычисления оптимальных значений управляющих переменных следующей стадии подготовки нефти.

Таким образом, для всех стадий процесса получены нейронные сети вида:

$$\vec{U}_{opt}^{(i)} = \overline{NET}^{(i)}(\vec{X}^{(i-1)}), (i = \overline{1, N}). \quad (6)$$

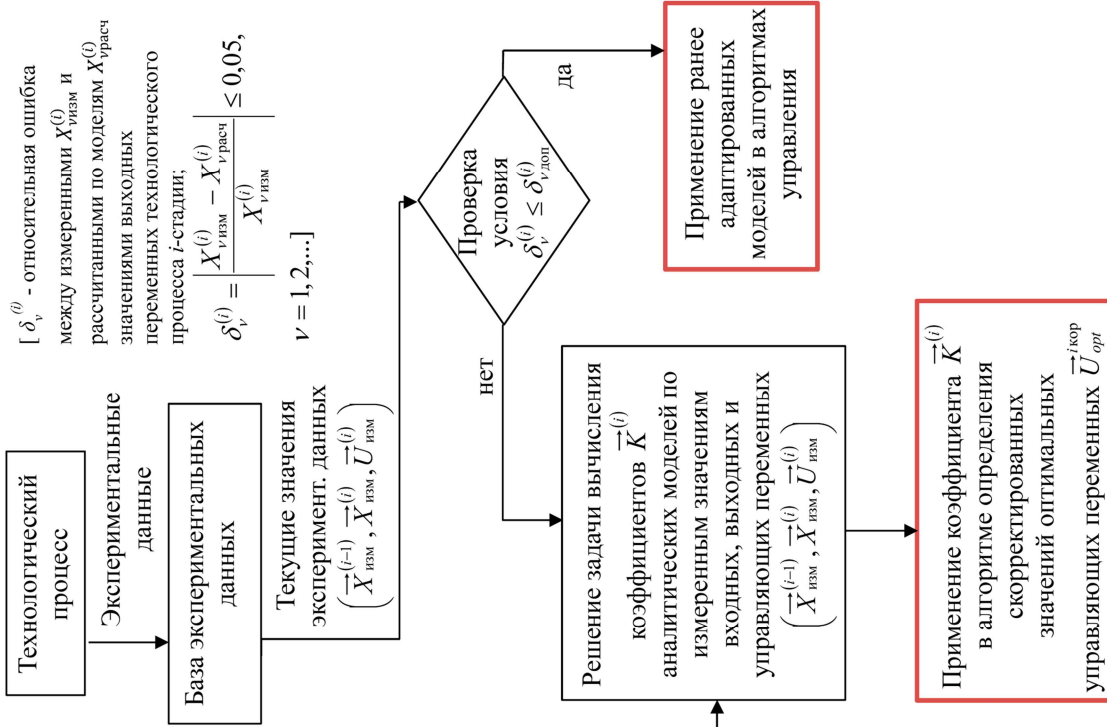
Массивы обучающих последовательностей для построения сетей (6) формируются путём варьирования в допустимых диапазонах входных переменных стадий при решении задачи оптимизации по алгоритму, приведенному на рисунке 3 (этап 1). Выбор топологии и параметров нейронных сетей осуществляется с применением метода сканирования путем варьирования двух переменных (объема обучающей выборки и числа нейронов в скрытом слое), при которых достигается наименьшее значение среднеквадратичной ошибки для выходных переменных обучающей выборки с последующей проверкой на тестовой выборке.

Четвертая глава посвящена параметрической идентификации моделей процессов стадий подготовки нефти и результатам решения задач оптимизации технологического процесса при проектировании и эксплуатации установки промышленной подготовки нефти.

Для адаптации моделей процессов стадий к текущему режиму эксплуатации установки промышленной подготовки нефти разработаны метод и алгоритм оперативной параметрической идентификации математических моделей статики процессов промышленной подготовки нефти, основанные на построении нейросетевых моделей связи коэффициентов моделей $\vec{K}^{(i)}$ с измеренными значениями входных, выходных и управляющих переменных процессов стадий $(\vec{X}_{изм}^{(i-1)}, \vec{X}_{изм}^{(i)}, \vec{U}_{изм}^{(i)})$. Концепция разработки и применения алгоритма идентификации моделей процессов стадий подготовки нефти представлена на рисунке 4. Погрешности вычислений по адаптированным моделям множества значений выходных переменных стадий относительно измеренных значений в рассмотренных примерах обучающей (тестовой) выборки составила 0,02%...4,44%. С увеличением объема обучающей выборки значение погрешности снижается.

Для определения скорректированных значений управляющих переменных по адаптированной модели $U_{j\ opt}^{i\ коп}$ используется подход, заключающийся в коррекции оптимальных значений управляющих переменных $U_{j\ opt}^i$, полученных ранее при решении задачи оптимизации на исходных моделях стадии, скорректированных умножением последних на степенную функцию отношения коэффициентов модели после идентификации $K_{\alpha}^{i\ коп}$ и до идентификации K_{α}^i , в соответствии с выражением (7).

Применение алгоритма идентификации



Разработка алгоритма идентификации

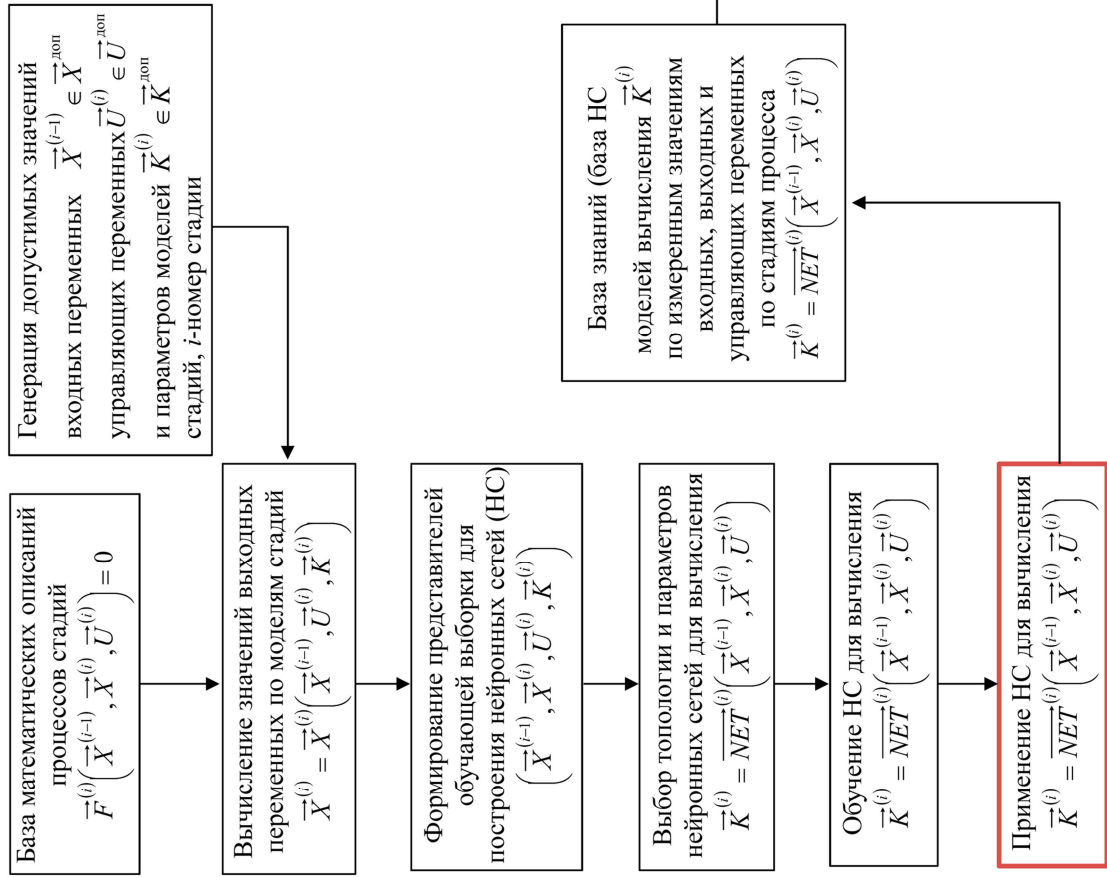


Рисунок 4 – Концепция идентификации моделей процессов стадий подготовки нефти

$$U_{j\text{opt}}^{i\text{кор}} = U_{j\text{opt}}^i \left(\frac{1}{m} \sum_{\alpha=1}^m \frac{K_{\alpha}^{i\text{кор}}}{K_{\alpha}^i} \right)^{n_i}, \quad (7)$$

где α - номер коэффициента модели стадии; m – количество коэффициентов модели; j – номер управляющей переменной стадии; n_i – подбирается в вычислительном эксперименте на этапе проектирования для каждой стадии конкретной установки индивидуально.

В диссертации рассмотрены примеры формирования критериев оптимальности «прибыль» при эксплуатации установки и «приведенные затраты» при проектировании объектов подготовки нефти. Получаемые зависимости для вычисления частных критериев по стадиям приведены для условий конкретной промышленной установки.

Алгоритм решения задачи определения оптимальных значений управляющих воздействий по стадиям при эксплуатации или для одного варианта аппаратного оформления при проектировании технологического процесса реализован на конкретном примере по критерию «прибыль».

На полученных по стадиям подготовки нефти массивах данных входных, управляющих и выходных переменных стадий проведено обучение нейронных сетей. Для всех стадий в качестве нейронной сети принят однослойный персептрон с одним скрытым слоем с 10 нейронами и сигмоидной функцией активации. При обучении нейронной сети использовался метод градиентного спуска. При этом нейросетевые модели для стадий, описывающие процесс подготовки нефти, на выходе дают значения среднеквадратичных ошибок для обучающих выборок по всем стадиям, не превышающие 10^{-2} , что с учётом размерности выходного параметра (доли отделившейся воды) соответствуют ошибкам, не превышающим 1%. Ошибка при тестировании и валидации составляет до 10%.

На рисунке 5 представлен вид поверхностей, построенных по выходам нейросетевых моделей для зависимостей оптимальных управляющих переменных от входных переменных стадий (расхода и обводненности).

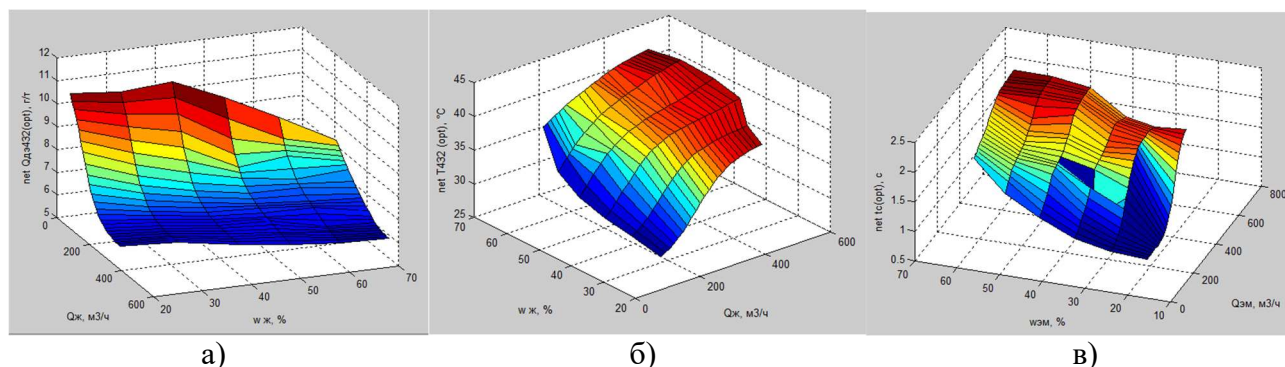


Рисунок 5 – Зависимости оптимальных управляющих переменных от входных переменных:

а) $Q_{дв}^{opt} = NET_{opt}(Q_{ж}, w_{ж})$; б) $T^{opt} = NET_{opt}(Q_{ж}, w_{ж})$; в) $L_c^{opt} = NET_{opt}(Q_{эм}, w_{эм})$

Данные о технологических переменных процесса поступают в базу данных для построения (идентификации) математических моделей, в которой хранятся

тренды технологических параметров, данные лабораторного анализа подготовленной нефти, а также параметры математических моделей процессов.

Затем адаптированные математические модели используются в алгоритме оптимизации для расчета оптимальных значений управляющих воздействий, которые реализуются автоматически или оператором технологического процесса путем изменения заданий регуляторам.

Структурная модель автоматизированной системы оптимизации и управления технологическими процессами приведена на рисунке 6.

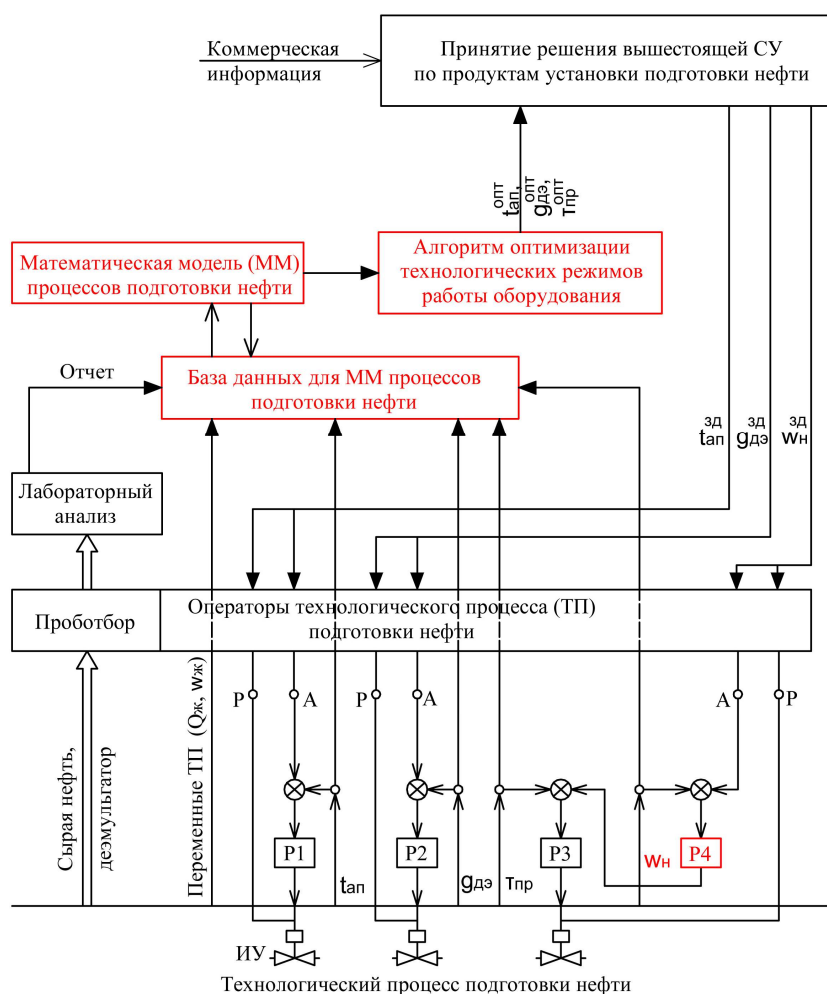


Рисунок 6 – Структурная модель автоматизированной системы оптимизации и оперативного управления технологическим режимом работы оборудования:

$t_{an}^{zd}, g_{dz}^{zd}, W_n^{zd}$ - заданные значения температуры в аппарате, расхода деэмульгатора и обводненности нефти;

$t_{an}, g_{dz}, W_n, \tau_{np}$ - фактические значения температуры в аппарате, расхода деэмульгатора, обводненности нефти и времени пребывания жидкости в аппарате;

$t_{an}^{onm}, g_{dz}^{onm}, \tau_{np}^{onm}$ - оптимальные значения температуры в аппарате, расхода деэмульгатора и времени пребывания жидкости в аппарате; P1, P2, P3, P4 – регуляторы температуры, расхода деэмульгатора, расхода жидкости (времени пребывания в аппарате) и обводненности нефти; P – ручное управление; A – автоматическое управление; ИУ – исполнительное устройство

Пятая глава посвящена практическому применению разработанных моделей, методов и алгоритмов оптимизации и управления технологическими процессами промышленной подготовки нефти.

Адекватность разработанных моделей экспериментальным данным действующего технологического процесса подтверждена на примере работы установки предварительного сброса пластовой воды. Оптимизация технологических режимов позволяет повысить эффективность работы установки и сэкономить до 15% суммарных затрат на подготовку нефти.

Внедрение предложенных разработок в алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы управления и оптимизации технологических режимов работы оборудования установки подготовки нефти, подтвержденное соответствующим актом о внедрении результатов диссертационной работы в деятельность Филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг «ПермНИПИнефть» в г.

Перми, приводит к сокращению времени, затрачиваемого на определение параметров ведения технологического процесса, на 35-40%.

При использовании разработанных моделей динамики процесса обезвоживания для расчета типовых систем регулирования обводненности нефти на этапе проектирования установки отмечается удовлетворительное совпадение значений показателей качества для действующих систем регулирования и полученных в вычислительном эксперименте с разработанными моделями, что позволяет рекомендовать аналитические модели динамики процесса обезвоживания для расчетов и использовать рассмотренный подход при подборе типовых систем и средств автоматизации при проектировании.

Для решения задач проектирования разработана программа выбора оптимального состава технологического оборудования «Choice equipment», реализующая модульный подход к представлению аппаратного оформления, внедрение которой в проектную практику позволяет повысить оперативность поиска информации по характеристикам оборудования, снижает затраты времени на выбор технологического оборудования и средств автоматизации при проектировании установок без увеличения численности персонала на 42%. Точность прогнозирования приведенных затрат в технико-экономическом обосновании строительства объекта с использованием алгоритма оптимизации по результатам расчета технико-экономических показателей после ввода объекта в эксплуатацию в среднем увеличилась в 3 раза для выбранного варианта аппаратно-технологического оформления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа технологических процессов промышленной подготовки нефти разработана методика, реализующая модульный подход к выбору состава технологического оборудования по значениям технологических параметров процессов.

2. Разработана математическая модель многостадийного технологического процесса подготовки нефти как объекта управления и модели стадий.

3. Разработаны метод и алгоритм идентификации математических моделей процессов стадий к текущему режиму эксплуатации установки промышленной подготовки нефти, основанный на построении нейронной сети связи параметров математических моделей и измеренных значений переменных стадий.

4. Разработан алгоритм оптимизации многостадийного технологического процесса и критерии оптимальности с целью подбора оборудования при проектировании объекта подготовки нефти и определения режима работы при управлении действующей установкой.

5. Разработан алгоритм оперативной коррекции оптимальных значений управляющих переменных с учетом текущей параметрической идентификации математических моделей стадий.

6. Разработана структурная модель автоматизированной системы оптимизации и оперативного управления технологическим режимом работы оборудования, предназначенной для реализации в АСУ ТП установки подготовки нефти.

7. Предложенная методика параллельного проектирования технологии и системы управления установкой направлена на то, что алгоритмы оптимизации и управления технологическими режимами конкретных установок разрабатываются на этапе проектирования и передаются на эксплуатацию вместе с проектами строительства установок промышленной подготовки нефти.

8. Апробированы и внедрены разработанные методы, модели, алгоритмы оптимизации и управления при проектировании автоматизированной установки промышленной подготовки нефти в производственной деятельности Филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг «ПермНИПИнефть» в г. Перми, позволившие повысить оперативность поиска информации по оборудованию для выполнения проектов строительства объектов на 42%, повысить точность прогнозирования расчетов в технико-экономическом обосновании по отношению к технико-экономическому показателю реализованного объекта в среднем в 3 раза. Применение методов, моделей и алгоритмов оптимизации в системе управления действующей установки подготовки нефти позволило сократить на 15% суммарные затраты на подготовку нефти, сократить время, затрачиваемое на определение параметров технологического режима работы оборудования установки, на 35-40%.

Список работ, опубликованных автором

Публикации в ведущих рецензируемых журналах ВАК (по научной специальности):

1. Караневская, Т.Н. Критерии и алгоритм оптимизации многостадийного технологического процесса промышленной подготовки нефти / **Т.Н. Караневская**, А.Г. Шумихин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2022. - №2. – С. 138-151.

2. Караневская, Т.Н. Оценка при проектировании объектов промышленной подготовки нефти качества регулирования обводненности типовыми автоматическими системами / **Т.Н. Караневская**, А.Г. Шумихин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2021. - № 2. – С. 28-32.

3. Караневская, Т.Н. Оптимизация при проектировании и управлении технологическим процессом промышленной подготовки нефти / **Т.Н. Караневская**, А.Г. Шумихин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2020. - №4. – С. 185-199.

4. Караневская, Т.Н. Оптимизация технологических режимов при управлении процессами промышленной подготовки нефти // **Т.Н. Караневская**, А.Г. Шумихин // Инженерный вестник Дона [Электронный ресурс] – 2019. - №4. – 12 с. Режим доступа: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5917.

Публикации в изданиях, индексируемых в международной базе цитирования Web of Science:

5. T. N. Karanevskaya. Modeling of technological processes for algorithmization of problem of management of oil field treatment facilities / **T. N. Karanevskaya**, A. G. Shumikhin // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya [Electronic resource]. - 2020. - Vol. 63, Iss. 2- P. 84-90. - Mode of access: <https://www.scopus.com>. - Title from screen. - DOI

10.6060/ivkkt.20206302.6100., Web of Science.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

6. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ. №2021618882 «Программа выбора состава технологического оборудования по заданным параметрам (Choice Equipment)» / **Караневская Т.Н.** Дата регистрации 01.06.2021.

Публикации в других изданиях:

7. Караневская, Т.Н. Математическая модель процесса обезвоживания нефти для решения задач идентификации и оптимизации / **Т.Н. Караневская, А.Г. Шумихин** // Химия. Экология. Урбанистика: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (с междунар. участием). – Пермь, 2020 г. - Т. 4. – С. 312-317.

8. Караневская, Т.Н. Задача комплексной оптимизации технологических систем промышленного обустройства / **Т.Н. Караневская** // Химия. Экология. Урбанистика: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Пермь, 2018. – Т.1. – С. 684-688.

9. Караневская, Т.Н. Реализация программы выбора основного состава технологического оборудования по заданным параметрам / **Т.Н. Караневская** // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Пермь, 2017. – С. 129-133.

10. Караневская, Т.Н. Применение метода динамического программирования в задачах оптимизации параметров нефтепромысловых систем / **Т.Н. Караневская** // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Нижневартовск, 2017. – С. 258-263.

11. Караневская, Т.Н. Реализация программы выбора основного состава технологического оборудования по заданным параметрам / **Т.Н. Караневская** // Актуальные проблемы науки и техники - 2017: материалы X Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа, 2017. – С. 225-227.

12. Караневская, Т.Н. Автоматизированный выбор технологических систем сбора и промышленной подготовки нефти на основе модульного подхода к их представлению / **Т.Н. Караневская, А.В. Попова** // Нефть. Газ. Новации. – 2016. - № 5 (186). – С. 20-23.

13. Караневская, Т.Н. Автоматизированный выбор технологических систем сбора и промышленной подготовки нефти на основе модульного подхода к их представлению / **Т.Н. Караневская, А.В. Попова** // Сбор, подготовка и транспортировка нефти и газа. Проектирование, строительство, эксплуатация 2016: сб. докл. 5-й Междунар. науч.-практ. конф. – Сочи, 2016 г. – С. 20-24.

14. Бормотова, Т.Н. (Караневская). Анализ и представление данных о модульных технологических системах сбора, подготовки и транспорта нефти / **Т.Н. Бормотова (Караневская), П.Ю. Сокольчик** // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2015. – №3. – С. 7-20.