

На правах рукописи



Абрамкин Сергей Евгеньевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
АБСОРБЦИОННОЙ ОСУШКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА
КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина)» на кафедре автоматики и процессов управления

Научный руководитель: Душин Сергей Евгеньевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Осипов Леонид Андроникович
доктор технических наук, профессор, заслуженный работник Высшей школы РФ, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра информационно-сетевых технологий, зав. кафедрой

Рапопорт Эдгар Яковлевич
доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, Самарский государственный технический университет, кафедра автоматики и управления в технических системах, профессор кафедры

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «__» _____ 2014 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д212.238.07 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)» по адресу 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)».

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.07
к.т.н., доцент

Цехановский Владислав
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современное развитие российской газовой отрасли характеризуется не только быстрым ростом объемов производства, обусловленным потребностью в природном газе внутреннего и внешнего рынка, но и реконструкцией действующих газовых промыслов. Автоматизация газодобывающих установок как низших звеньев в иерархии управления Единой системой газоснабжения России является мощным фактором повышения качества продукции и надежного газоснабжения потребителей.

При модернизации и внедрении нового газопромыслового оборудования и вводе в эксплуатацию разведанных месторождений осуществляется оснащение производства комплексными автоматизированными системами управления (АСУ). Проведение реконструкции технологических аппаратов и внедрение АСУ технологическими процессами (ТП) на газовых промыслах определяется высокими требованиями к качеству подготовки природного газа для его транспортировки и повышенной надежностью технологического оборудования в связи с непрерывным характером производства, а также стремлением к оптимизации режимов работы скважин и установок комплексной подготовки газа (УКПГ). Осушка природного газа имеет наиважнейшее значение для успешной работы газотранспортной системы. Природный газ, добываемый из подземных источников, насыщен капельной влагой, тяжёлыми углеводородами и механическими примесями, что может создать аварийные ситуации при транспортировке газа по магистральным газопроводам. Также возможно образование гидратов, приводящее к снижению пропускной способности трубопроводов и повреждению технологического оборудования.

На сегодняшний день при разработке комплексных АСУ ТП для объектов газовой промышленности недостаточно применяются возможности математического моделирования. Для эффективного использования комплексных систем автоматизации необходимо проведение глубокого физико-математического исследования газопромысловых ТП и вычислительных экспериментов.

В настоящее время при исследовании ТП абсорбции и десорбции основное внимание уделяется статическим и динамическим моделям отдельных устройств, а не всего комплекса в целом. Статические модели, по существу, определяют основные потоки субстанций при нормальной эксплуатации промышленных установок. Динамические модели, как правило, формируются в результате линеаризации при малых отклонениях от равновесных режимов и находят применение для разработки локальных контуров регулирования. Фундаментальные исследования абсорбции природного газа представлены в трудах российских и иностранных ученых: В.М. Рамма, Б.Ф. Тараненко, В.В. Кафарова, П.Ф. Водяника, А.М. Кулиева, Г.З. Алекперова, В.Г. Тагиева, Р.Я. Исаковича, И.А. Александрова, С.А. Багатурова, И.В. Анисимова, А.Ю. Закгейма, W.L. Luyben, D.E. Seborg, D.A. Mellichamp, S.M. Walas, A.H. Younger, J.M. Campbell и др.

Технологические процессы, происходящие на УКПГ, носят квазиустановившийся характер. Однако действие возмущающих факторов (изменения технологического режима, влагосодержания и давления газа и т.п.) приводят к значитель-

ным отклонениям ТП от установившихся режимов и вызывают необходимость разработки адекватных динамических математических моделей (ММ) управляемых процессов абсорбции и десорбции, учитывающих разнородность потоков, протяженность в пространстве и нелинейную взаимосвязь физических величин. Другими словами, ТП следует рассматривать как объекты с распределенными параметрами. Вопросы моделирования и управления объектами с распределенными параметрами широко рассматривались в научных трудах А.Г. Бутковского, Э.Я. Рапопорта, В.С. Балакирева, И.М. Першина, Л.М. Пустыльников, Г.Л. Дегтярева, В.А. Ковалю, Т.К. Сиразетдинова, А.И. Егорова, А.А. Шевякова, Н.Д. Демиденко, W. Harmon Ray, В. А. Ogunnaike и многих других.

Цель диссертационной работы заключается в разработке и исследовании динамических математических моделей управляемых массо- и теплообменных процессов комплекса технологических систем «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ».

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**.

1. Разработка концептуальной модели взаимосвязанных физических процессов комплекса технологических систем «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ».

2. Разработка и исследование динамических математических моделей массо- и теплообменных процессов в подсистемах «Абсорбция газа», «Выпаривание» и «Воздушное охлаждение» комплекса технологических систем «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ».

3. Разработка и исследование нелинейной динамической математической модели взаимосвязанных массо- и теплообменных процессов в подсистеме «Ректификация» системы «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента».

4. Разработка и исследование динамической математической модели управляемых взаимосвязанных массообменных процессов комплекса технологических систем «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ» замкнутого цикла по жидкой фазе.

5. Разработка компьютерных моделей технологических процессов осушки природного газа.

Объектом исследования в работе являются массо- и теплообменные процессы комплекса технологических систем «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ».

Предмет исследования составляет разработка и исследование динамических математических моделей неуправляемых и управляемых массо- и теплообменных процессов комплекса технологических систем «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ».

Методы исследования. При получении теоретических результатов применялись методы математической физики, теории автоматического управления, численные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных, методы математического моделирования. Компьютерное моделирование проводилось с использованием программного средства MATLAB/Simulink.

Обоснованность научных положений и достоверность результатов исследований подтверждается корректным использованием математического аппарата, обоснованностью используемых ограничений и допущений, сравнением результатов анализа и моделирования с данными натурных экспериментов на реальном производственном объекте – газовом промысле, апробацией полученных материалов диссертационной работы в виде докладов на научно-технических конференциях и публикациями в периодической печати.

Основные научные результаты, полученные в диссертационной работе:

- концептуальная модель взаимосвязанных физических процессов комплекса технологических систем «АБСОРБЦИЯ – ДЕСОРБЦИЯ»;
- динамические математические модели массо- и теплообменных процессов подсистем «Абсорбция газа», «Выпаривание» и «Воздушное охлаждение» комплекса технологических систем «АБСОРБЦИЯ-ДЕСОРБЦИЯ»;
- нелинейная динамическая математическая модель взаимосвязанных массо- и теплообменных процессов подсистемы «Ректификация»;
- замкнутая по жидкой фазе динамическая математическая модель управляемых взаимосвязанных массообменных процессов комплекса технологических систем «АБСОРБЦИЯ-ДЕСОРБЦИЯ»;
- компьютерные модели технологических процессов абсорбционной осушки природного газа.

Степень новизны научных результатов.

1. Концептуальная модель комплекса технологических систем «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ» отличается взаимосвязью разнородных физических процессов, структурой и обоснованным выбором входных, внутренних, измеряемых и управляемых величин, что позволяет на ее основе разрабатывать математические модели управляемых процессов.

2. Динамические математические модели массо- и теплообменных процессов подсистем «Абсорбция газа», «Выпаривание» и «Воздушное охлаждение» комплекса технологических систем «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ» отличаются обоснованным принятием допущений, учетом распределения величин в технологическом пространстве аппарата и функциональной зависимостью скорости газообразной фазы от внешних (давления и температуры газа в пласте) и внутренних (температура пара в аппаратах) возмущающих факторов, что позволяет адекватно управлять процессами в условиях изменения этих факторов.

3. Динамическая математическая модель подсистемы «Ректификация» отличается нелинейной зависимостью тепловых и массовых потоков абсорбента и пара и позволяет исследовать их взаимное влияние в процессе массотеплообмена.

4. Динамическая математическая модель управляемых массообменных процессов комплекса технологических систем «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ» отличается учетом замкнутого контура по жидкой фазе и применением многорежимного регулирования.

5. Компьютерные модели позволяют исследовать динамику технологических процессов абсорбционной осушки природного газа на установках комплексной подготовки газа, использующих колонны насадочного типа.

Положения диссертационной работы, выносимые на защиту.

1. Динамические математические модели массо- и теплообменных процессов подсистем «Абсорбция газа», «Выпаривание» и «Воздушное охлаждение» комплекса технологических систем «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ».

2. Нелинейная динамическая математическая модель взаимосвязанных массо- и теплообменных процессов подсистемы «Ректификация».

3. Замкнутая по жидкой фазе динамическая математическая модель управляемых взаимосвязанных массообменных процессов комплекса технологических систем «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ».

Практическая ценность. Практическая ценность полученных результатов заключается в разработанных математических моделях массо- и теплообменных процессов абсорбционной осушки природного газа, позволяющих объяснять и прогнозировать поведение технологического комплекса при различных внешних факторах, определяющих режимы функционирования.

Полученные дискретно-непрерывные (компьютерные) математические модели массо- и теплообменных процессов комплекса технологических систем «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ» направлены на повышение эффективности проектирования систем автоматического управления ТП абсорбционной осушки природного газа.

Применение разработанного в диссертации многорежимного регулирования обеспечивает в системе поддержание заданного качества газа в широком интервале изменения давления, температуры и расхода.

Реализация результатов. Полученные научные и прикладные результаты нашли применение в бюджетной НИР «Разработка методов анализа нелинейных динамических систем и интеллектуальной обработки информации для моделирования и поддержки задач управления», проводимой на кафедре автоматики и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ» по заданию Министерства образования и науки Российской Федерации в 2011 году.

Результаты работы использованы Уренгойским газопромысловым управлением при разработке технического задания на изменение комплексных алгоритмов управления технологическим процессом абсорбционной подготовки природного газа на газовом промысле №16.

Результаты работы используются в учебном процессе кафедры автоматики и процессов управления при проведении практических занятий и курсового проектирования по дисциплинам «Моделирование систем» и «Математическое моделирование объектов и систем управления», а также при выполнении выпускных квалификационных работ в рамках направления «Управление в технических системах» подготовки бакалавров и магистров.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на Всероссийской 6-й научной конференции «Управление и информационные технологии» в 2010 г., Всероссийской научно-практической интернет-конференции «Проблемы автоматизации технологических процессов добычи, транспорта и переработки нефти и газа» в 2013 г., Международных научных конференциях «Системный синтез и прикладная синергетика» в 2009, 2011 и 2013 гг., III Международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации (АТМ-2013)» в 2013 г., Международных научно-технических конференциях «Проблемы автоматизации и управления в технических системах» в 2011 и 2013 гг., X Международной Четаевской конференции «Аналитическая механика, устойчивость и управление» в 2012 г., а также на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 2007–2013 годах.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в двадцати печатных работах, в том числе в 2-х монографиях, семи журнальных статьях (шесть из них из перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов), одной работе депонированной в ВИНТИ РАН, одном научно-техническом сборнике и девяти статьях в сборниках материалов международных и всероссийских научных и научно-технических конференций.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами и заключения, списка литературы, включающего 205 наименований, 16 приложений. Основная часть работы изложена на 158 страницах машинописного текста. Работа содержит 56 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** диссертации обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, выделены объект и предмет исследования, приведены методы исследования, научная новизна, практическая ценность работы и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлено краткое описание технологии абсорбционной подготовки природного газа и основных физических процессов комплекса технологических систем (КТС) «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ».

Анализ технологической, структурно-потокоской, укрупненной функциональной схем и физики процессов позволил получить концептуальную модель взаимосвязанных массотеплообменных процессов КТС, структурная схема которой приведена на рисунке 1.

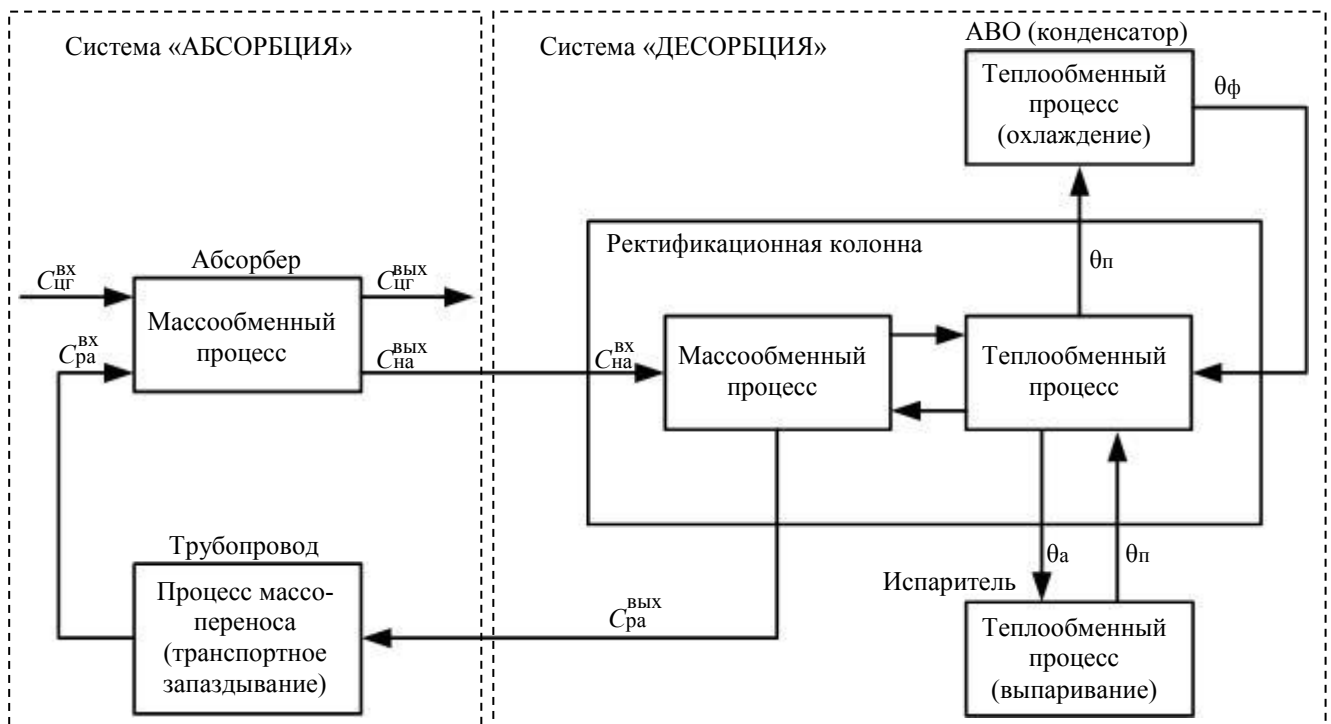


Рисунок 1. Структурная схема концептуальной модели массотеплообменных процессов КТС

С помощью концептуальной модели были выявлены особенности ТП: пространственное распределение величин, взаимосвязь массо- и теплообменных процессов в РК, замкнутость потока по жидкой фазе в КТС.

Представлен аналитический обзор методов моделирования и состояния проблемы управления абсорбционными процессами. В результате анализа сформулированы цели и задачи проводимого научного исследования.

Во **второй главе** представлен анализ процессов, происходящих в подсистеме «Абсорбция газа». В результате изучения физики процессов абсорбции, учета конструктивно-технологических особенностей аппарата и его режимов работы были сформулированы основные допущения и ограничения, положенные в основу построения ММ.

С учетом принятых допущений и ограничений была разработана ММ процесса абсорбции природного газа для технологического аппарата насадочного типа, представленная системой дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) с начальными и граничными условиями:

$$\begin{aligned} \partial C_{\text{цг}} / \partial t &= -v_{z\text{г}}(\theta_{\text{г}}, P_{\text{г}}) (\partial C_{\text{цг}} / \partial z) - R_{\text{г}} [C_{\text{цг}} - C_{\text{цг}}^{\text{р}}(C_{\text{цж}})]; \\ \partial C_{\text{цж}} / \partial t &= v_{z\text{ж}} (\partial C_{\text{цж}} / \partial z) + R_{\text{ж}} [C_{\text{цг}} - C_{\text{цг}}^{\text{р}}(C_{\text{цж}})], \end{aligned} \quad (1)$$

где $C_{\text{цг}}, C_{\text{цж}}$ – концентрации целевого компонента (ЦК) в газе и жидкости; $C_{\text{цг}}^{\text{р}}(C_{\text{цж}})$ – равновесное содержание ЦК в газе в зависимости от содержания ЦК в жидкости; $v_{z\text{г}}, v_{z\text{ж}}$ – скорости газа и жидкости вдоль оси z ; $\theta_{\text{г}}$ – рабочая температура газа, °С; $P_{\text{г}}$ – рабочее давление газа, МПа; $R_{\text{г}}, R_{\text{ж}}$ – физико-технологические коэффициенты, зависящие от физических свойств газовой и жидкой фаз, а также конструктивных особенностей аппарата. Скорость газа зависит от давления $P_{\text{г}}$ и температуры $\theta_{\text{г}}$ и определяется выражением:

$$v_{\text{г}}(\theta_{\text{г}}, P_{\text{г}}) = (V_m \bar{G}_{\text{г}} (\theta_0 + \theta_{\text{г}}) P_0 / (0,785 \theta_0 P_{\text{г}} D^2)),$$

где $V_m = 22,4$ – объем моля идеального газа при нормальных условиях, м³/кмоль; $\bar{G}_{\text{г}}$ – расход газа, кмоль/с; $\theta_0 = 273$ – нормальная температура, К; $\theta_{\text{г}}$ – рабочая температура газа, °С; $P_0 = 0,1$ – нормальное давление, МПа; $P_{\text{г}}$ – рабочее давление газа, МПа; D – диаметр колонны, м.

$$\text{Граничные условия: } C_{\text{цг}}(z, t) \Big|_{z=0} = C_{\text{цг}}^{\text{вх}}(t); \quad C_{\text{цж}}(z, t) \Big|_{z=l_a} = C_{\text{цж}}^{\text{вх}}(t),$$

где l_a – высота абсорбера.

$$\text{Начальные условия: } C_{\text{цг}}(z, t) \Big|_{t=0} = C_{\text{цг}}(z); \quad C_{\text{цж}}(z, t) \Big|_{t=0} = C_{\text{цж}}(z).$$

Предложена методика расчета физико-технологических коэффициентов абсорбции для номинального установившегося режима, используемых в ММ абсорбционной осушки природного газа. Получаемые коэффициенты следует рассматривать как начальные приближения при моделировании. В процессе исследования они могут уточняться.

Для проведения вычислительного эксперимента на основе непрерывной ММ (1) разработаны дискретно-непрерывная и компьютерная модели подсистемы

«Абсорбция газа». Результаты компьютерного моделирования при изменении скорости газа от номинального до минимального значения представлены на рисунке 2.

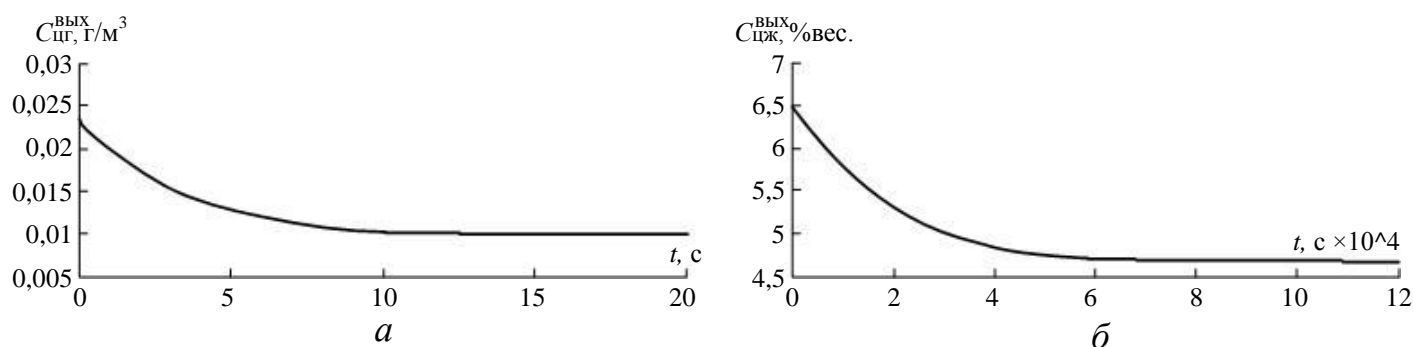


Рисунок 2. Графики переходных процессов по концентрации целевого компонента в газе (а) и жидкости (б) при ступенчатом возмущающем воздействии

Графики переходных процессов при изменении скорости газа указывают на то, что процессы носят монотонный затухающий характер. По газовой фазе они протекают быстро и устанавливаются в течение 10-12 с, а по жидкой фазе процессы медленные и устанавливаются приблизительно через 20 ч. Результаты моделирования динамики подтверждаются экспериментальными данными.

Так же была разработана ММ и проведен анализ массообменного процесса в режиме продольного перемешивания фаз. В результате анализа выявлено, что продольное перемешивание не оказывает существенного влияния на абсорбцию.

В третьей главе представлен анализ процессов в системе «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента». В соответствии с концептуальной моделью были определены подсистемы, оказывающие доминирующее влияние на процесс десорбции: подсистема «Ректификация», подсистема «Выпаривание» и подсистема «Воздушное охлаждение». Сформулированы основные допущения и ограничения, которые легли в основу построения ММ подсистем. С целью отражения изменения условий массо-теплообмена для подсистем «Ректификация» и «Воздушное охлаждение» в описании введена зависимость скорости пара v_{Π} от температуры пара $v_{\Pi}(\theta_{\Pi})$.

Принятые допущения и ограничения позволили разработать динамическую нелинейную ММ взаимосвязанных по температуре пара θ_{Π} массо- и теплообменных процессов подсистемы «Ректификация», представляемую системой ДУЧП:

$$\begin{aligned} \partial C_{цп} / \partial t &= v_{\Pi}(\theta_{\Pi}) (\partial C_{цп} / \partial z) + R_{\Pi} (C_{цп} - C_{цп}^p(C_{цж})); \\ \partial C_{цж} / \partial t &= -v_{ж} (\partial C_{цж} / \partial z) - R_{ж} (C_{цп} - C_{цп}^p(C_{цж})); \\ \partial \theta_{\Pi} / \partial t &= -v_{\Pi}(\theta_{\Pi}) (\partial \theta_{\Pi} / \partial z) - R_{\theta_{\Pi}} (\theta_{\Pi} - \theta_{ж}); \\ \partial \theta_{ж} / \partial t &= v_{ж} (\partial \theta_{ж} / \partial z) + R_{\theta_{ж}} (\theta_{\Pi} - \theta_{ж}), \end{aligned} \quad (2)$$

где $C_{цж}$, $C_{цп}$ – концентрации ЦК в жидкости (абсорбент, флегма) и в паре; $C_{цп}^p$ – равновесная концентрация ЦК в паре; $v_{ж}$ – скорость жидкости; θ_{Π} , $\theta_{ж}$ – температуры пара и жидкости; $R_{ж}$, R_{Π} , $R_{\theta_{\Pi}}$, $R_{\theta_{ж}}$ – физико-технологические коэффициенты, зависящие от физических свойств фаз и геометрических особенностей аппарата.

Граничные условия:

$$C_{\text{цп}}(z,t)|_{z=0} = C_{\text{цп}}^{\text{ВХ}}(t), C_{\text{цп}}(z,t)|_{z=l_k} = C_{\text{цп}}^{\text{ВЫХ}}(t);$$

$$C_{\text{цж}}(z,t)|_{z=l_k} = C_{\text{цж}}^{\text{ВХ}}(t), C_{\text{цж}}(z,t)|_{z=0} = C_{\text{цж}}^{\text{ВЫХ}}(t);$$

$$\theta_{\text{п}}(z,t)|_{z=0} = \theta_{\text{п}}^{\text{ВХ}}(z), \theta_{\text{ж}}(z,t)|_{z=l} = \theta_{\text{ж}}^{\text{ВХ}}(z);$$

$$\theta_{\text{п}}(z,t)|_{z=l} = \theta_{\text{п}}^{\text{ВЫХ}}(z), \theta_{\text{ж}}(z,t)|_{z=0} = \theta_{\text{ж}}^{\text{ВЫХ}}(z).$$

Начальные условия:

$$C_{\text{цп}}(z,t)|_{t=0} = C_{\text{цп}}^0(z), C_{\text{цж}}(z,t)|_{t=0} = C_{\text{цж}}^0(z);$$

$$\theta_{\text{п}}(z,t)|_{t=0} = \theta_{\text{п}}^{\text{ВХ}}(z), \theta_{\text{ж}}(z,t)|_{t=0} = \theta_{\text{ж}}^{\text{ВХ}}(z).$$

На основе ММ (2) для проведения вычислительного эксперимента разработаны дискретно-непрерывные и компьютерные модели взаимосвязанных тепло- и массообменных процессов. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1

Величина	Значения возмущений			
	$C_{\text{цж}}^{\text{ВХ}} = 6,83$ %вес.	$C_{\text{цж}}^{\text{ВХ}} = 6,18$ %вес.	$\theta_{\text{ж}}^{\text{ВХ}} = 100$ °С	$\theta_{\text{пп}}^{\text{ВХ}} = 164$ °С
	Моделируемые значения			
$C_{\text{цп}}^{\text{ВЫХ}}$, %вес.	97,06	97,06	97,96	96,56
$C_{\text{цж}}^{\text{ВЫХ}}$, %вес.	1,25	0,6	0,89	0,95
$\theta_{\text{пп}}^{\text{ВЫХ}}$, °С	150,59	150,59	145,65	153,75
$\theta_{\text{ж}}^{\text{ВЫХ}}$, °С	133,04	133,04	119,16	134,35

По результатам вычислительного эксперимента сделаны следующие выводы:

– изменение концентрации ЦК в абсорбенте в подсистеме «Ректификация» не оказывает влияния ни на концентрацию ЦК в паре, ни на температуры абсорбента и пара.

– изменение температуры паровой или жидкой фазы в подсистеме «Ректификация» влечет за собой изменение температурного и концентрационного профилей в РК по абсорбенту и пару.

Проведенное исследование взаимосвязанных тепломассообменных процессов подсистемы «Ректификация» подтверждает два положения: теплообменные процессы являются доминирующими для процесса ректификации и концентрация ЦК в абсорбенте и паре зависит от температуры при постоянном давлении.

В третьей главе так же разработаны ММ подсистем «Выпаривание» и «Воздушное охлаждение».

Для подсистемы «Выпаривание» была составлена модель в виде системы ДУЧП, описывающая нестационарный теплообмен в испарителе с учетом стенки жаровой трубы, разделяющей теплоносители:

$$\begin{aligned}
\partial\theta_{\text{дг}}/\partial t &= -v_{\text{дг}}(\partial\theta_{\text{дг}}/\partial x) - R_{\text{дг}}(\theta_{\text{дг}} - \theta_{\text{ст}}); \\
\partial\theta_{\text{ж}}/\partial t &= v_{\text{ж}}(\partial\theta_{\text{ж}}/\partial x) + R_{\text{ж}}(\theta_{\text{ст}} - \theta_{\text{ж}}); \\
d\theta_{\text{ст}}/dt &= R_{\text{дгст}}(\theta_{\text{дг}} - \theta_{\text{ст}}) - R_{\text{жст}}(\theta_{\text{ст}} - \theta_{\text{ж}}),
\end{aligned}
\tag{3}$$

где $\theta_{\text{дг}}, \theta_{\text{ж}}, \theta_{\text{ст}}$ – температуры дымовых газов, жидкой фазы и стенки; $v_{\text{дг}}, v_{\text{ж}}$ – скорости дымовых газов и абсорбента; $R_{\text{дг}}, R_{\text{ж}}, R_{\text{дгст}}, R_{\text{жст}}$ – физико-технологические коэффициенты, зависящие от физических свойств дымовых газов, жидкости и материала стенки жаровой трубы.

$$\text{Граничные условия: } \theta_{\text{дг}}(x)|_{x=l} = \theta_{\text{дг}}^{\text{ВХ}}(t), \quad \theta_{\text{ж}}(x)|_{x=0} = \theta_{\text{ж}}^{\text{ВХ}}(t).$$

$$\text{Начальные условия: } \theta_{\text{дг}0}(x) = \theta_{\text{дг}}(x, t)|_{t=0}, \quad \theta_{\text{ж}0}(x) = \theta_{\text{ж}}(x, t)|_{t=0}.$$

Для подсистемы «Воздушное охлаждение» получена динамическая ММ теплообменного процесса в конденсационных секциях АВО:

$$\begin{aligned}
\partial\theta_{\text{нп}}(x, t)/\partial t &= -v_{\text{нп}}(\theta_{\text{нп}})(\partial\theta_{\text{нп}}(x, t)/\partial x) - R_{\text{нп}}[\theta_{\text{нп}}(x, t) - \theta_{\text{ст}}(x, t)], \\
d\theta_{\text{ст}}/dt &= R_{\text{с}2}(\theta_{\text{нп}} - \theta_{\text{ст}}) - nR_{\text{с}1}(\theta_{\text{ст}} - \theta_{\text{ср}}),
\end{aligned}
\tag{4}$$

где $\theta_{\text{нп}}, \theta_{\text{ст}}, \theta_{\text{ср}}$ – температуры насыщенного пара, стенки теплообменных секций АВО и окружающей среды; $R_{\text{нп}}, R_{\text{с}1}, R_{\text{с}2}$ – физико-технологические коэффициенты, зависящие от физических свойств насыщенного пара и материала стенки теплообменных секций АВО; n – количество трубопроводов в АВО.

$$\text{Граничные условия: } \theta_{\text{нп}}(x)|_{x=0} = \theta_{\text{нп}}^{\text{ВХ}}(t); \quad \theta_{\text{нп}}(x)|_{x=l_{\text{аво}}} = \theta_{\text{нп}}^{\text{ВЫХ}}(t),$$

где $l_{\text{аво}}$ – длина трубы теплообменника.

$$\text{Начальные условия: } \theta_{\text{нп}}(x)|_{t=0} = \theta_{\text{нп}}^{\text{ВХ}}(x); \quad \theta_{\text{ст}}(x)|_{t=0} = \theta_{\text{ст}}^{\text{ВХ}}(x).$$

Результаты моделирования подсистем «Выпаривание» и «Воздушное охлаждение» представлены на рисунке 3.

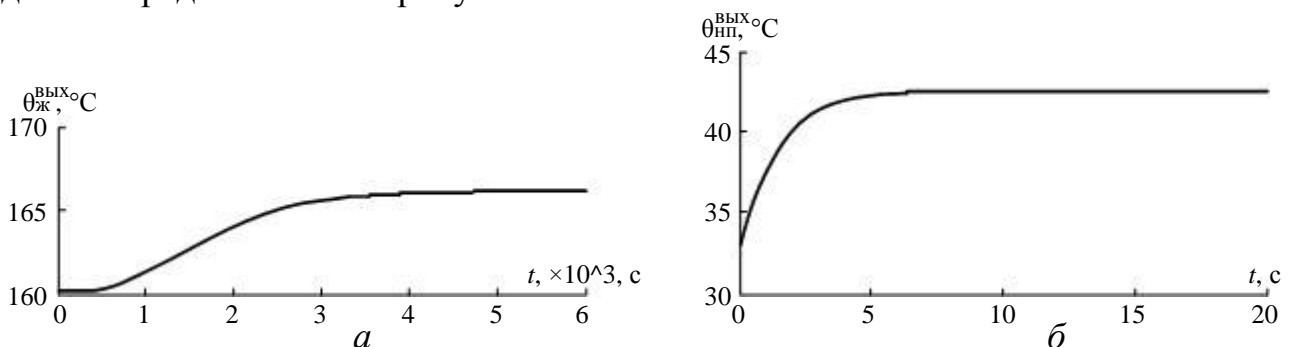


Рисунок 3. Графики переходных процессов в испарителе (а) и АВО (б)

На рисунке 3, а приведен график переходного процесса в испарителе при повышении температуры жидкой фазы на входе в испаритель, на рисунке 3, б – график переходного процесса в АВО при повышении температуры охлаждающего воздуха. Время установления нового равновесного состояния составляет около 1,5 ч и 20 с соответственно.

Исследование моделей подсистем «Выпаривание» и «Воздушное охлаждение» позволило сделать заключение, что установившиеся значения, полученные при проведении моделирования, либо не достигают заданного уровня, либо превышают его. Эти результаты подтверждают необходимость применения систем автоматического регулирования тепловых процессов для подсистем «Выпаривание» и «Воздушное охлаждение», которые в свою очередь оказывают влияние на течение тепломассообменных процессов в подсистеме «Ректификация».

В четвертой главе сформулированы и решены задачи управления массо- и теплообменными процессами при абсорбционной осушке природного газа. Исходя из сформулированных задач были разработаны ММ управляемых массо- и теплообменных процессов в подсистемах «Абсорбция газа», «Выпаривание» и «Воздушное охлаждение».

Для получения управляемой модели подсистемы «Абсорбция газа» (2) во второе уравнение введена управляющая функция $f(u) = v_{зж}$. Управление процессом абсорбции осуществляется изменением подачи жидкой фазы в абсорбер. Для этих целей предложено использовать многорежимное регулирование соотношения расходов «газ-абсорбент». Многорежимный нелинейный П-регулятор реализован в программной среде MATLAB/Simulink.

Эффективная работа абсорбера осуществляется при изменении расхода газа от 250000 м³/ч до 500000 м³/ч. При этом скорость газа может варьироваться в пределах от 0,29 м/с до 0,57 м/с. Результаты моделирования в системе с многорежимным регулятором при подаче возмущающих воздействий различного типа по скорости газа на входе абсорбера представлены на рисунке 4. Графики переходных процессов соответствуют минимальному уровню возмущающих воздействий.

По результатам вычислительных экспериментов можно сделать вывод, что система автоматического регулирования, реализованная в виде многорежимного нелинейного П-регулятора, приводит объект в заданное состояние.

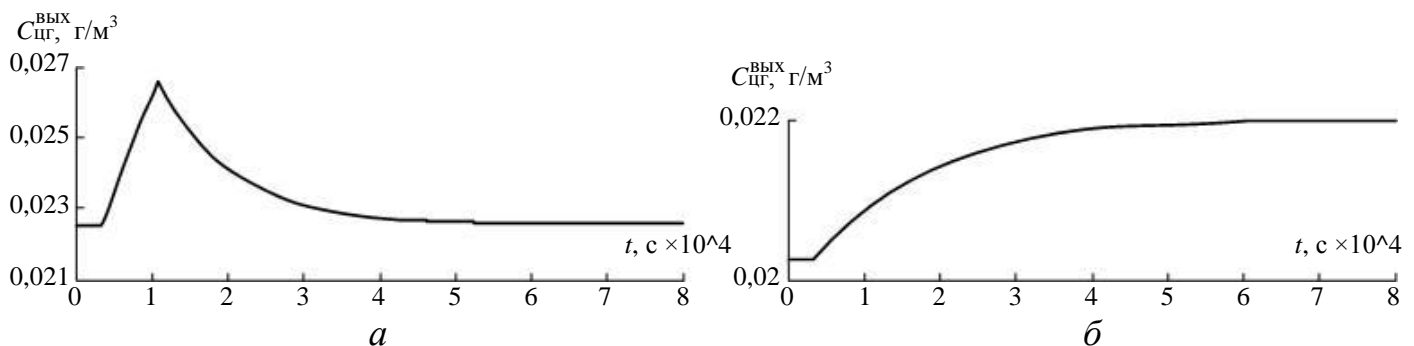


Рисунок 4. Графики переходных процессов по концентрации целевого компонента в газе при прямоугольном импульсном (а) и ступенчатом (б) возмущениях

Анализ концептуальной модели КТС показывает, что влиять на массотеплообменные процессы в ректификационной колонне возможно посредством управления тепловыми процессами в испарителе и АВО.

Регулирование теплообменных процессов в подсистеме «Выпаривание» осуществляется за счет изменения расхода топливного газа или газозвоздушной сме-

си, подаваемых в горелку с целью обеспечения требуемой температуры абсорбента на выходе испарителя. Регулирование реализовано введением в первое уравнение ММ подсистемы «Выпаривание» (3) функции управления $f(u) = v_{дг}(G_{тг})$. Система регулирования предусматривает коррекцию по температуре дымовых газов. В качестве исполнительного устройства выбирался клапан-регулятор с мембранным исполнительным механизмом и позиционером. Для регулирования процессов применялся ПИ-закон. Требуемая величина температуры абсорбента на выходе испарителя составляет 160°C . Вычислительные эксперименты показали, что система регулирования температуры абсорбента в испарителе позволяет поддерживать заданную температуру.

Основной задачей системы регулирования теплообменных процессов в подсистеме «Воздушное охлаждение» является поддержание заданной температуры жидкой фазы на выходе из аппарата. Регулирование обеспечивается введением во второе уравнение ММ подсистемы «Воздушное охлаждение» (4) функции управления $f(u) = \theta_{ср}(G_{в})$. Процесс регулирования температуры флегмы на выходе АВО производится изменением расхода охлаждающего воздуха, обдувающего конденсационные секции аппарата. В качестве исполнительного устройства выбирался частотно-регулируемый электропривод. Регулирование производилось по ПИ-закону. Требуемая величина температуры флегмы на выходе АВО составляет 34°C . Результаты вычислительных экспериментов показали, что система регулирования обеспечивает требуемую величину температуры.

Как следует из анализа концептуальной модели КТС «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ», его главной особенностью является замкнутость технологической схемы циркуляции раствора абсорбента (замкнутый цикл по жидкой фазе). В связи с этим возникает задача исследование процессов в замкнутом контуре. «Замыкание» ММ двух подсистем «Абсорбция газа» и «Ректификация» производилось по величине концентрации ЦК в жидкой фазе.

Дискретно-непрерывная управляемая модель КТС «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ» записывается в виде следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} dC_{цгi+1}/dt &= -((v_{г}/h) + R_{г}(v_{г}))C_{цгi+1} + R_{г}(v_{г})E_{р}C_{цжn-i} + (v_{г}/h)C_{цгi}; \\ dC_{цжi+1}/dt &= -((f(u)/h) + R_{ж}E_{р})C_{цжi+1} + R_{ж}C_{цгn-i} + (f(u)/h)C_{цжi}; \\ dC_{цпi+1}/dt &= -((v_{п}/h) - R_{п})C_{цпi+1} + (v_{г}/h)C_{цпi} - R_{п}EC_{цжn-i}; \\ dC_{цжi+1}/dt &= -((v_{ж}/h) - R'_{ж}(v_{ж})E)C_{цжi+1} + (v_{ж}/h)C_{цжi} - R'_{ж}(v_{ж})C_{цпn-i}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $i = 0, \dots, n-1$, $v_{г}, v_{п}, v_{ж}$ – скорости газовой, паровой и жидкой фаз; $C_{цг}, C_{цп}, C_{цж}$ – концентрации ЦК в газовой, паровой и жидкой фазах; $E_{р}, E$ – коэффициенты фазового равновесия; $f(u)$ – управляющее воздействие по скорости абсорбента в абсорбере; $R_{г}(v_{г}), R'_{ж}(v_{ж}), R_{п}, R_{ж}$ – физико-технологические коэффициенты по газообразной и жидкой фазам, h – шаг дискретизации.

Для регулирования взаимосвязанных массообменных процессов КТС «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ» так же применяется многорежимное регулирование.

На рисунке 5 представлена КМ управляемых массообменных процессов КТС «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ». Вычислительные эксперименты с КМ проводились в условиях приложения ступенчатых и последовательности прямоугольных импульсных возмущающих воздействий по скорости газа на входе абсорбера.

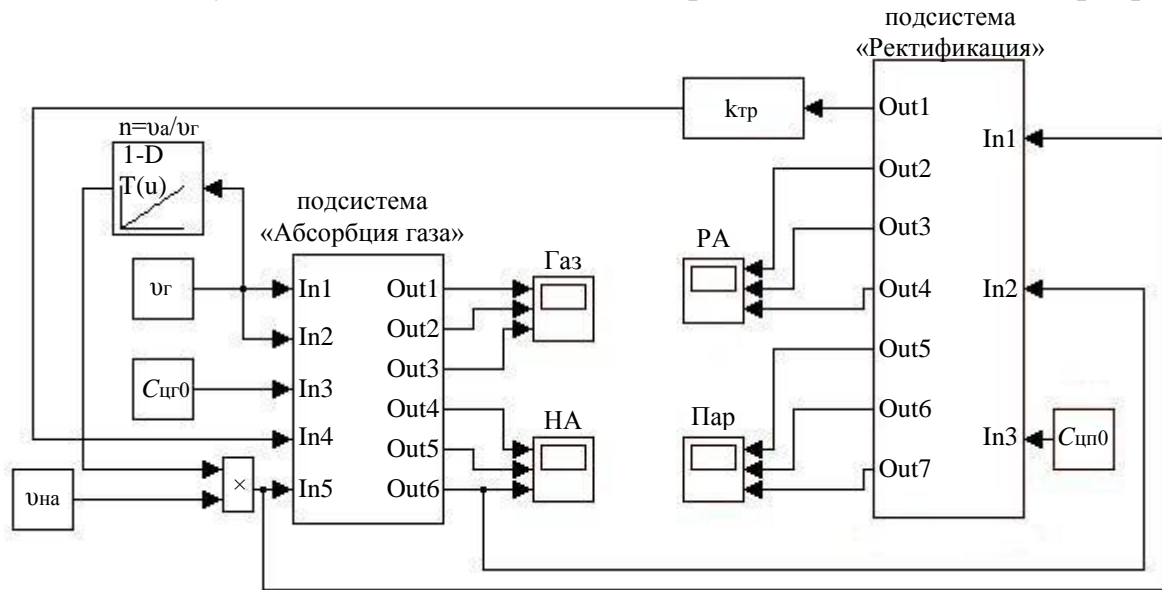


Рисунок 5. Компьютерная модель управляемых массообменных процессов КТС «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ»

На рисунке 6 представлены результаты компьютерного моделирования управляемых массообменных процессов КТС «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ» в случае подачи ступенчатого возмущения по скорости газа на входе абсорбера. При изменении скорости газа от номинальной до минимальной наблюдается плавное отклонение выходных величин от первоначальных значений и постепенный переход к заданным значениям по ЦК в газовой фазе на выходе аппарата.

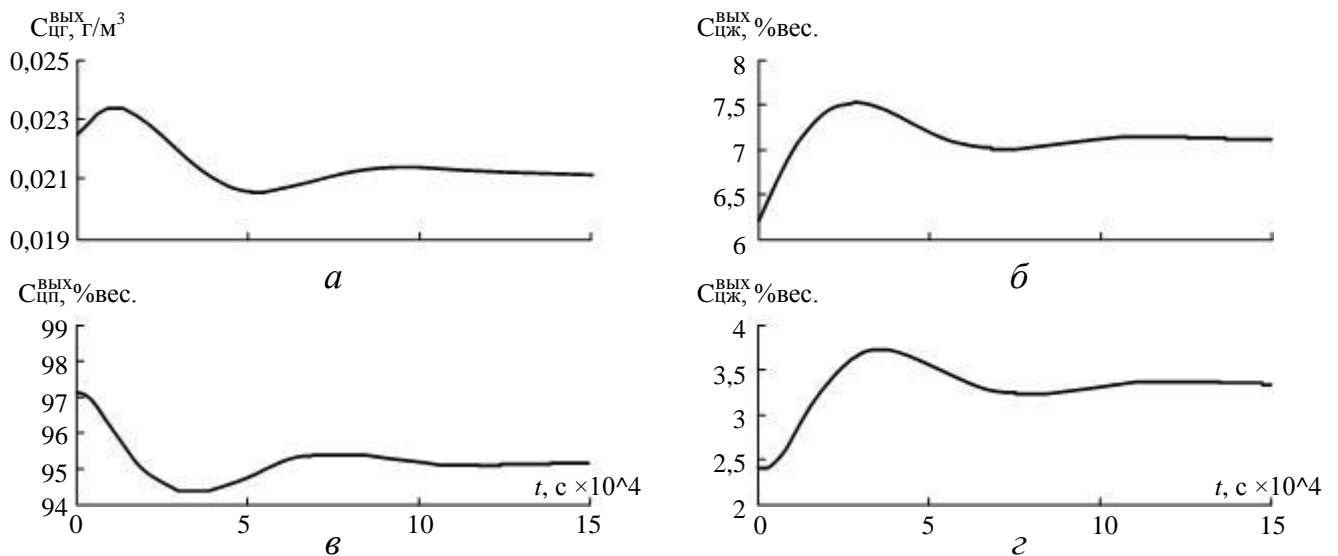


Рисунок 6. Графики переходных процессов в абсорбере и РК по газовой/паровой (а, в) и жидкой (б, г) фазам при ступенчатом снижении скорости газа

Следует отметить, что значения, полученные при вычислительном эксперименте, для содержания ЦК в жидкой фазе лежат в области значений, выявленных при наблюдении за ТП на реальном производственном объекте. Для регенерированного диэтиленгликоля эти значения лежат в области $[0,71 \div 4,1]$ %вес, для насыщенного диэтиленгликоля – $[2,45 \div 9,9]$ %вес. В случае ступенчатого снижения скорости газа содержание ЦК в регенерированном диэтиленгликоле установилось в новом значении 3,3 %вес., а в насыщенном – 7,1 %вес. В случае подачи возмущения в виде прямоугольных импульсов содержание ЦК в регенерированном диэтиленгликоле устанавливалось в значении 1,2 %вес., а в насыщенном – 4,9 %вес.

Сравнительный анализ результатов вычислительного и натурального экспериментов позволяет сделать выводы что, применение многорежимного регулирования обеспечивает поддержание параметров массообменных процессов КТС «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ» в требуемом интервале. Разработанная математическая модель КТС «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ» адекватна реальному технологическому процессу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты диссертационного исследования состоят в следующем.

1. На основании анализа технологической, структурно-поточковой, укрупненной функциональной схем и физики процессов разработана концептуальная модель взаимосвязанных массотеплообменных процессов комплекса технологических систем «АБСОРБЦИЯ – ДЕСОРБЦИЯ». Установлены процессы в аппаратах комплекса, которые оказывают доминирующее влияние на абсорбционную осушку природного газа, что определило направления разработки и исследования математических моделей комплекса технологических систем «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ».

2. В результате анализа состояния проблемы управления объектами с распределенными параметрами были определены нерешенные задачи управления пространственными массо- и теплообменными процессами абсорбционной осушки газа.

3. На основе анализа технологических процессов, происходящих в абсорбере, ректификационной колонне, испарителе и аппарате воздушного охлаждения, определены допущения и ограничения, составляющие базу для разрабатываемых математических моделей.

4. С учетом допущений и ограничений разработаны динамические математические модели подсистем «Абсорбция газа», «Ректификация», «Выпаривание», «Воздушное охлаждение», представленные системами дифференциальных уравнений в частных производных с начальными и граничными условиями.

5. На основе непрерывных моделей для исследования поведения подсистем численными методами были получены дискретно-непрерывные модели.

6. Для проведения компьютерного моделирования в программной среде MATLAB/Simulink были разработаны:

– методика расчета физико-технологических коэффициентов абсорбции для номинального установившегося режима, используемых в математической модели подсистемы «Абсорбция газа»;

– программные модули, предназначенные для расчета параметров моделей.

7. Проведен анализ массообменного процесса в режиме продольного перемешивания фаз, в результате которого было выявлено, что продольное перемешивание не оказывает существенного влияния на процесс абсорбции.

8. Получена динамическая математическая модель взаимосвязанных тепло- и массообменных процессов подсистемы «Ректификация». На основе компьютерной модели проведено исследование, по результатам которого сделаны выводы:

– изменение концентрации целевого компонента в абсорбенте не оказывает влияния ни на концентрацию целевого компонента в паре, ни на температуры абсорбента и пара;

– изменение температуры паровой или жидкой фазы влечет за собой изменение температурного и концентрационного профилей в ректификационной колонне по абсорбенту и пару.

Проведенное исследование взаимосвязанных массотеплообменных процессов подсистемы «Ректификация» подтверждает два положения: теплообменные процессы являются существенными для процесса ректификации и концентрация целевого компонента в абсорбенте и паре зависит от их температуры при постоянном давлении.

9. Результаты компьютерного моделирования массо- и теплообменных процессов подсистем «Абсорбция газа», «Ректификация», «Выпаривание», «Воздушное охлаждение» согласуются с расчетными и экспериментальными данными. Полученные результаты подтвердили необходимость применения систем автоматического регулирования в комплексе технологических систем «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ».

10. На основе математических моделей объектов разработаны динамические математические модели управляемых массо- и теплообменных процессов подсистем «Абсорбция газа», «Выпаривание», «Воздушное охлаждение».

Для регулирования массообменного процесса в подсистеме «Абсорбция газа» применялось многорежимное регулирование. При компьютерном моделировании выявлено, что система регулирования при подаче ступенчатого и прямоугольного импульсного возмущений поддерживает требуемые значения величин в широком интервале.

Для регулирования теплообменных процессов в испарителе и конденсационных секциях АВО использовался ПИ-регулятор. По результатам компьютерного моделирования можно сделать вывод, что работа системы регулирования обеспечивает на выходе аппаратов поддержание требуемых величин.

11. Разработана динамическая математическая модель управляемых взаимосвязанных массообменных процессов КТС «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ», характеризующаяся замкнутым циклом по жидкой фазе. При исследовании процессов с использованием компьютерной модели подавались ступенчатое возмущение и последовательность прямоугольных импульсных возмущающих воздействий. Применение многорежимного регулирования обеспечивает требуемое поддержание величин массообменных процессов КТС «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ» в широком интервале изменения.

12. Проведенное исследование позволяет судить об адекватности полученных математических моделей и возможности управления технологическими процессами абсорбционной осушки природного газа.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Абрамкин, С.Е. Разработка математической модели технологического комплекса «Абсорбция–Десорбция» [Текст] / С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. Вып. 1. С. 29–33.
2. Абрамкин, С.Е. Система регулирования теплообменного процесса в аппарате воздушного охлаждения [Текст] / С.Е. Абрамкин, Е.К. Грудяева, С.Е. Душин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. Вып. 6. С. 35-40.
3. Абрамкин, С.Е. Математическая модель управляемого теплообменного процесса в испарителе [Текст] / С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин, К.А. Поляшова // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. Вып. 9. С. 32-36.
4. Абрамкин, С.Е. Математические модели управляемых массо- и теплообменных процессов в комплексе технологических систем «АБСОРБЦИЯ–ДЕСОРБЦИЯ» [Текст] / С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин, Н.Н. Кузьмин // Известия ЮФУ. Технические науки, 2011. Вып.6. С. 255-264.
5. Абрамкин, С.Е. Исследование математической модели массообменного процесса в ректификационной колонне [Текст] / С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин, А.В. Наседкин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. Вып.6. С. 30-36.
6. Абрамкин, С.Е. Особенности управления комплексом технологических систем «АБСОРБЦИЯ-ДЕСОРБЦИЯ» [Текст] / С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. Вып.4. С. 41-47.

Публикации в других изданиях

7. Абрамкин, С.Е. Анализ технологических схем процесса абсорбционной осушки газа и разработка обобщенной функциональной схемы [Текст] / С.Е. Абрамкин; СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб, 2007. – 15 с. – Деп. в ВИНТИ РАН, г. Москва, №11, 2007, б/о 60.
8. Абрамкин, С.Е. Анализ технологического процесса абсорбционной осушки газа как объекта управления [Текст] / С.Е. Абрамкин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», серия «Информатика, управление и компьютерные технологии», 2007. Вып. 3.С. 24-31.
9. Абрамкин, С.Е. Разработка динамической математической модели процесса абсорбции в системе «газ-жидкость» [Текст] / С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин // Системный синтез и прикладная синергетика / Междунар. науч. конф. 29.09 – 02.10.2009. Сб. докладов. Пятигорск: РИА на КМВ, 2009. – С. 208-212.
10. Абрамкин, С.Е. Математическая модель массотеплообменных процессов технологического комплекса абсорбционной осушки газа [Текст] / С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин // Материалы 6-й науч. конф. «Управление и информационные технологии». СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. С. 220-224.
11. Абрамкин, С.Е. Динамическая модель подсистемы «РЕКТИФИКАЦИЯ» в системе «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента» [Текст] / С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: труды Междунар. науч.-техн. конф. (г.Пенза, 19-22 апреля 2011 г.): в 2 т. / под ред. д.т.н., проф.

М.А. Щербакова. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2011. – 2 т. – С. 174-177.

12. Абрамкин, С.Е. Повышение эффективности работы аппаратов воздушного охлаждения в системе «ДЕСОРБЦИЯ абсорбента» [Текст] / С.Е. Абрамкин, Е.К. Грудяева, С.Е. Душин // Четвертая Междунар. науч. конф. «ССПС-2011». Сб. докладов. Раздел V. Методы управления техническими системами. Пятигорск: РИА на КМВ, 2011. С.288-295.

13. Абрамкин, С.Е., Душин, С.Е. Моделирование управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа замкнутого цикла [Текст] / С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин // Управление и информационные технологии / Н.Н. Кузьмин, А.Ю. Дорогов, С.Е. Душин и др. – СПб, 2011. – Глава 4. – С. 63-69.

14. Абрамкин, С.Е. Моделирование управляемых массо- и теплообменных процессов в системе подготовки природного газа к транспортировке [Текст] / С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин, Н.Н. Кузьмин // Аналитическая механика, устойчивость и управление: Труды X Междунар. Четаевской конф. Т.1. Секция 1. Аналитическая механика. Казань, 12-16 июня 2012 г. - Казань: Изд-во КГТУ, 2012. С.3-10.

15. Абрамкин, С.Е. Динамические модели управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа [Текст] / С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин // Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений: науч.-техн. сб. – М.: ООО «Газпром экспо», 2012. №2. С.53-61.

16. Абрамкин, С.Е. Математическая модель системы управления технологическим процессом абсорбционной осушки природного газа [Текст] / С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: сб.ст. Междунар. науч.-техн. конф. (г.Пенза, 23-25 апреля 2013 г.) / Под ред. д.т.н., проф. М.А. Щербакова. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2013. – С.414-417.

17. Абрамкин, С.Е. Особенности управления технологическим процессом десорбции абсорбента [Текст] / С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин, Н.Н. Кузьмин // Проблемы автоматизации технологических процессов добычи, транспорта и переработки нефти и газа: материалы Всероссийской науч.-практич. интернет-конф. / ред. кол.: А.П. Веревкин, Н.А. Ишинбаев – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013. С.66-69.

18. Абрамкин, С.Е., Душин, С.Е. Динамические модели управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа [Текст] / С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин // Приоритетные направления развития Уренгойского комплекса : Сб. науч. тр. / Коллектив авторов, ООО «Газпром добыча Уренгой». – М.: Недра, 2013. С.242-253.

19. Абрамкин, С.Е. Исследование теплообменных процессов в отгонной ректификационной колонне [Текст] / С.Е. Абрамкин // Проблемы управления, обработки и передачи информации (АТМ-2013): сб. тр. III Междунар. науч. конф.: в 2 т. / Под ред. А.А. Львова и М.С. Светлова. Саратов: Издательский дом «Райт-Экспо», 2013. – Т.2. С.77-84.

20. Абрамкин, С.Е. Динамические модели тепломассообменных процессов в ректификационной колонне [Текст] / С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин // Материалы V Междунар. науч. конф. «Системный синтез и прикладная синергетика» / Под ред. Т.А. Шебзуховой, И.М. Першина, А.М. Макарова – Пятигорск. ФГАОУ ВПО «СКФУ» (филиал) в г. Пятигорске 2013. – Т. III. С.7-17.