

На правах рукописи



МУЩИНИН АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ РАЗДЕЛЕНИЯ
УГЛЕВОДОРОДОВ**

Специальность 05.13.06

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
(в машиностроении и приборостроении)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Научный руководитель: **Елизаров Виталий Викторович**,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Шумихин Александр Георгиевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», заведующий кафедрой
«Автоматизация технологических процессов»

Симонова Лариса Анатольевна,
доктор технических наук, профессор,
Набережночелнинский институт – филиал
ФГАОУ ВО «Казанский федеральный университет», заместитель директора по научной деятельности, заведующая кафедрой
«Автоматизация и управление»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»,
г. Иваново

Защита состоится «15» марта 2018 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.065.06 в Ижевском государственном техническом университете имени М.Т. Калашникова по адресу: 426033, г. Ижевск, ул. 30 лет Победы, д. 2, 5 корпус ИЖГТУ имени М.Т.Калашникова.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», <http://www.istu.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 201_ г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7, ИЖГТУ имени М.Т.Калашникова.

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



Сяктерев Виктор Никонович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Технологические установки разделения углеводородов составляют значительную часть технологического оборудования в нефтехимии, нефтепереработке, пищевой и других отраслях промышленности. Применяемая в промышленности система управления (СУ) такими установками предназначена, в основном, для стабилизации технологических параметров с помощью локальных систем с П, ПИ, ПИД законами регулирования температуры, давления, уровня и расхода, настройки которых определяют на основе переходных функций, полученных в результате эксперимента или обработки статистических данных с действующих аппаратов в узком диапазоне изменения параметров, по не всегда обоснованным каналам регулирования и поступающим возмущений. Остается малоизученной проблема автоматизации процесса пуска и останова технологических установок разделения углеводородов. Время пуска технологических установок после проведения ремонтных работ достигает нескольких суток. Материальные и энергетические затраты в процессах пуска/останова составляют непроизводственную часть расходов, которые повышают себестоимость продукции.

Пуск технологических установок обычно проводится в режиме ручного управления с помощью регуляторов, а также путем включения/отключения потоков аппаратчиками. В зависимости от профессиональных качеств производственного персонала определяются время пуска, возможные нарушения технологического режима и создание аварийных ситуаций, ущерб от которых составляет сотни миллионов рублей. По оценкам экспертов из-за ошибок операторов возникает около 22% аварий. В этой связи актуальной является задача повышения качества управления путем автоматизации динамических режимов работы технологических установок и обучения производственного персонала на тренажерных комплексах, что позволяет снизить аварийность и сократить время пуска на 15-35%. Несмотря на интенсивное развитие тренажеростроения и наличие большого количества предложений не существует типовых решений по автоматизации динамических режимов работы технологических установок ректификации в силу отсутствия в настоящее время достоверных математических моделей технологических процессов, методов и алгоритмов управления.

Степень научной разработанности темы исследования. Автоматизация энерготехнологических установок осуществляется с помощью средств автоматики и вычислительных систем на основе распределенных систем управления (РСУ) и систем противоаварийной защиты (СПАЗ). Анализ работ отечественных ученых Дозорцева В.М., Веревкина А.П., Кирюшина О.В., Ельцова И.Д., а также зарубежных авторов F. Hayes-Roth, N. Jacobstein, P. Harmon, V. Moore по совершенствованию СУ показывает, что большие резервы повышения экономической эффективности производств связаны с разработкой систем «продвинутого» и усовершенствованного управления (СУУ) APC (Advanced process control), многопараметрических СУ. Для всех таких систем главным классификационным признаком, объединяющим их в один большой класс, согласно исследованиям Веревкина А.П. является использование моделей различного назначения: модели динамики объектов управления, показателей качества и технико-экономической эффективности; диагностики исправности технических средств системы и обеспечения безопасности; управляющих частей системы и оптимизации.

Для сложных технологических систем, включающих несколько взаимосвязанных аппаратов, образующих многосвязную СУ, методы анализа одномерных систем непригодны. Анализ таких систем Веревкин А.П., Кирюшин О.В., Ельцов И.Д. рекомендуют проводить по имитационным моделям путем сбора и обработки исходных данных с итерационным подбором параметров модели или методом ситуационного

моделирования, путем выбора модели из базы аппроксимационных моделей стандартного типа и идентификации ее по текущей ситуации. Принципы построения математического обеспечения, алгоритмов и программ управления автоматизированных СУ в химической технологии широко представлены в работах школы академика Кафарова В.В., в работах Шумихина А.Г., Лабутина А.Н. и других отечественных и зарубежных ученых.

Для отработки технических решений при разработке СУ и повышения профессионального уровня (обучения) специалистов операторов актуальной стала задача разработки тренажеров различного назначения. В области компьютерного тренажеростроения в последние годы достигнуты значительные результаты компаниями Honeywell, Yokogawa, Invensys, Круг и др. Однако, динамическое моделирование, принципы построения моделей и алгоритмов управления в разработках большинства компаний остаются закрытыми. В работах Хоменко А.А., Колмогорова А.Г., Шумихина А.Г. разработаны приближенные модели технологической установки разделения углеводородов: для адекватного взаимодействия подсистем различного уровня сложности при расчете динамики процесса предложен метод сквозной синхронизации; проведен синтез имитационной тренажерной модели ректификационной колонны: предложена квазидинамическая модель технологической установки АВТ с перспективой разработки компьютерного тренажерного комплекса. На основании проведенного анализа можно считать, что основными проблемами разработки СУ являются проблемы моделирования и синтеза управляющих устройств.

Диссертационная работа выполнена в рамках государственных программ: Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы №14.В37.21.0591 по теме: «Распределенные тренажерные системы взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств»; Грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МД-5663.2014.8 по теме: «Проектирование высокоэффективных многоступенчатых массообменных аппаратов разделения веществ»; Стипендия президента РФ молодым ученым и аспирантам на 2012-2014 годы СП-1427.2012.5 по теме «Информационные тренажерные комплексы взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств». С проектом «Разработка тренажерного комплекса для приобретения практических навыков безопасного ведения работ сотрудниками предприятий химического, нефтехимического и нефтеперерабатывающего комплексов» стал победителем конкурса «Пятьдесят лучших инновационных идей для Республики Татарстан».

Целью диссертационного исследования является разработка модели автоматизированного управления технологическими установками разделения углеводородов для использования в компьютерных тренажерах и РСУ.

Для достижения цели исследования необходимо решить **следующие задачи**:

1. Разработать математические динамические модели технологических процессов установки разделения углеводородов.
2. Провести экспериментальные исследования пуска установки разделения и показать достоверность полученных динамических моделей.
3. Разработать модель сложной автоматизированной технологической установки разделения углеводородов, оптимальную при построении программного кода СУ.
4. На основе разработанной модели и технологического регламента разработать метод построения компьютерных тренажеров по обучению промышленного персонала процессам управления технологической установкой.

5. На основе полученных динамических моделей аппаратов разработать алгоритм автоматизированного управления технологической установкой в РСУ.

Область исследования. Диссертационная работа выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами». При этом работа соответствует следующим пунктам специальности: п. 3. Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т. д.; п. 4. Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация; п. 6. Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и систем управления ими; п. 10. Методы синтеза специального математического обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП.

Объектом исследования является технологическая установка разделения углеводов. **Предметом исследования** является модель автоматизированного управления установками разделения углеводов.

Методология и методы исследования. В работе для решения поставленных задач использовались методы системного анализа, математического и физического моделирования динамических режимов работы технологической установки, методы управления процессами разделения углеводов.

Научная новизна результатов исследования:

1. Разработаны математические модели динамических режимов работы технологических аппаратов установки в виде нестационарных уравнений термодинамики, материального и теплового балансов. Сравнение результатов динамического моделирования технологических параметров с экспериментальными данными, полученными при пуске установки дебутанизации показало их удовлетворительное согласование.

2. На языке программирования CFC, оптимальном при написании программного кода, разработана модель автоматизированной технологической установки разделения углеводов в виде НФС, построенной из связанных между собой отдельных функциональных блоков, их математических моделей и алгоритмов управления технологическими аппаратами.

3. На основе полученной модели автоматизированной установки разработан метод построения компьютерного тренажера и сценарий обучения промышленного персонала по ведению технологического процесса в соответствии с установленным технологическим регламентом.

4. В соответствии с разработанной моделью автоматизированной установки получены модели и алгоритмы управления программных регуляторов в составе предложенной распределенной системы управления.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Получены достоверные модели динамических режимов и управления теплообменными аппаратами и давлением в колонне в процессах ректификации.

2. Построена модель автоматизированной технологической установки разделения различных вариантов жидких смесей.

3. Предложен метод построения компьютерных тренажеров для обучения промышленного персонала предприятий нефтехимии и нефтепереработки.

4. На основе модели автоматизированной установки разработаны и внедрены компьютерные тренажеры по обучению промышленного персонала в цехах заводов ПАО

«Нижекамскнефтехим». Программное обеспечение зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели технологических аппаратов в виде нестационарных дифференциальных уравнений тепломассообмена, термодинамики и материального баланса, метод их решения и расчета технологических параметров установки разделения. *(соответствует п. 4 и п. 6 паспорта специальности).*

2. Результаты экспериментальных исследований процесса пуска установки дебутанизации углеводородов, подтверждающие достоверность предложенных математических моделей технологических аппаратов и установки. *(соответствует п. 6 паспорта специальности).*

3. Предложенная математическая модель автоматизированной технологической установки разделения углеводородов в виде непрерывной функциональной схемы (НФС), составленная из связанных между собой технологическими и информационными потоками функциональных блоков, позволяет разработать эффективные алгоритмы и программный код системы управления процессом разделения. *(соответствует п. 3 и п. 4 паспорта специальности).*

4. Структура и компоненты компьютерных тренажеров: графический интерфейс, подсистемы математического моделирования, разработки сценариев, учебно-методическое обеспечение, система тестирования, сценарий обучения промышленного персонала процессам управления, программное обеспечение. *(соответствует п. 4 и п. 10 паспорта специальности).*

5. Алгоритмы управления программных регуляторов распределенной системы управления, обеспечивающие перевод технологического процесса из предпускового состояния в режим нормального функционирования за заданное время при допустимом отклонении технологических параметров процесса и производительности от заданных программных значений. *(соответствует п. 3 и п. 10 паспорта специальности).*

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных выводов подтверждается результатами экспериментальных исследований с применением современных аттестованных приборов, поверенных и надежных средств измерений и регистрации, применением законов сохранения массы и энергии, хорошим согласованием результатов расчета и проведенных в работе экспериментов, внедрением в производственный процесс тренажерных комплексов.

Основные результаты работы обсуждались на международных конференциях: «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ XXIII (2010 г., Саратов), ММТТ XXIV (2011 г., Пенза), ММТТ XXV (2012 г., Волгоград), ММТТ XXVI (2013 г., Нижний Новгород), ММТТ XXVII (2014 г., Тамбов); на Всероссийской научно-практической конференции (2012 г., Нижнекамск), на научных сессиях КНИТУ (2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 гг., Казань), на 5-й Российской мультikonференции по проблемам управления УТЭОСС-2012 (2012 г., Санкт-Петербург), на XII Всероссийском совещании по проблемам управления ВСПУ-2014 (2014 г., Москва).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 печатных работ. Среди них 10 статей в журналах из перечня ВАК, 9 в материалах конференций, 6 свидетельств о регистрации программного продукта.

Личный вклад автора состоит в постановке целей и задач исследования, разработке методов моделирования и алгоритмов управления процессом пуска технологической установкой, разработке и внедрении компьютерных тренажеров на заводах ПАО «Нижекамскнефтехим», программного обеспечения тренажеров, тестировании алгоритмов управления в РСУ. Выбор приоритетов, направлений, методов

исследования, формирование структуры и содержания работы выполнено автором при активном участии научного руководителя д.т.н., доцента Елизарова В.В.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Основной текст работы изложен на 209 страницах машинописного текста, содержит 73 рисунка, 24 таблицы, приложение содержит 34 страницы. Список использованных источников включает 179 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, изложена научная новизна, научная и практическая значимость и краткое содержание диссертации.

В первой главе проводится анализ методов моделирования и управления сложными технологическими установками, создания компьютерных тренажеров и СУУ.

В качестве объекта исследования выбрана установка дебутанизации углеводородов, предназначенная для разделения широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ), поступающей со склада, на пропан-бутановую фракцию (C3-C4) и нестабильную бензиновую фракцию методом ректификации в колонне тарельчатого типа поз. E-DA-105 (рис. 1). Проводится анализ СУ и методов управления установкой, результатов экспериментальных исследований динамических режимов работы

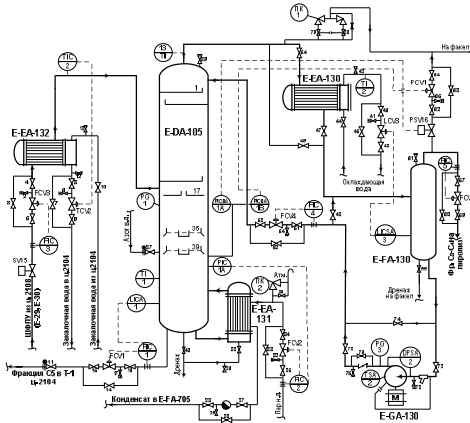


Рис. 1. Технологическая схема установки дебутанизации углеводородов.

технологической установки дебутанизации (рис. 3-6).

Во второй главе разрабатывается модель автоматизированной технологической установки на языке непрерывных функциональных схем (НФС). Для моделирования

процессов разделения углеводородов на языке Delphi разработана программа – конструктор, в которой реализован язык НФС. НФС состоит из взаимосвязанных функциональных блоков (ФБ), каждый из которых представляет собой математическую модель элемента химико-технологической системы. По предложенной методике разработана математическая модель установки разделения

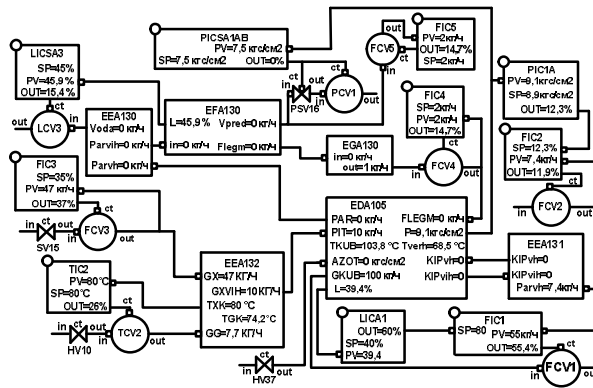


Рис. 2. Математическая модель автоматизированной установки дебутанизации углеводородов на языке НФС.

углеводородов, которая включает:

1. Технологическое оборудование: EDA105 – ректификационная колонна; EEA130 – дефлегматор; EEA131 – кипятильник; EEA132 – подогреватель; EFA130 – флегмовая емкость; EGA130 – насос.

2. Регуляторы: FIC1, FIC2, FIC3, FIC4, FIC5, LICA1, LICSA3, TIC2, PIC1A, PICA1 – регуляторы расходов кубовой жидкости, пара, питания, флегмы, фракции C₃-C₄; уровня в кубе, в флегмовой емкости, температуры питания, давления в колонне.

3. Регулирующие клапаны: FCV1, FCV2, FCV4, FCV5, PCV1, TCV2, LCV3; ручные арматуры: HV10, HV37; отсекающие клапаны: SV15, PSV16.

Согласно технологическому регламенту задаются входные и выходные параметры ФБ. При этом выходные параметры одних блоков являются входными для других и передаются по соединительным линиям. Внутри ФБ на языке структурированного текста записывается его модель и алгоритм управления. Математические модели технологических аппаратов (ФБ) в динамическом режиме записываются в виде нестационарных уравнений термодинамики, материального и теплового балансов.

Математическая модель подогревателя исходной смеси (ФБ EEA132).

Пренебрегая термическим сопротивлением стенок труб теплообменника, уравнения теплообмена в трубном и межтрубном пространствах при перемешивании теплоносителей принимают вид: $\rho_1 c_1 V_1 dT_1 / dt = G_1 c_1 T_1 - G_1 c_1 T_{вх} + kF(T_2 - T_1)$ (1)

$$\rho_2 c_2 V_2 dT_2 / dt = G_2 c_2 T_0 - G_2 c_2 T_2 - kF(T_2 - T_1) \quad (2)$$

где ρ_1, ρ_2, c_1, c_2 - плотность и теплоемкость теплоносителей при средней температуре; V_1, V_2 - объемы трубного и межтрубного пространств; T_1, T_2 - температура исходной смеси в трубном и горячей воды в межтрубном пространствах, соответственно; $T_{вх}, T_0$ - температура исходной смеси и горячей воды на входе в трубное и межтрубное пространство, соответственно; k, F - коэффициент и поверхность теплопередачи; G_1, G_2 - расход исходной смеси и горячего теплоносителя.

Начальные условия для уравнений (1), (2) имеют вид: $T_1 = T_{10}, T_2 = T_{20}$ при $t = 0$, где t - время. Разрешая уравнения (1), (2) относительно производных, получим: $dT_1 / dt = a_1 T_1 + b_1 T_2 - e_1$, (3) $dT_2 / dt = b_2 T_1 - a_2 T_2 + e_2$. (4)

Дифференцируя по t уравнение (3), подставляя в него после дифференцирования значение производной dT_2 / dt из уравнения (4) и значение T_2 из уравнения (3), получим дифференциальное уравнение второго порядка $d^2 T_1 / dt^2 - A_1 dT_1 / dt - B_1 T_1 + C_1 = 0$ (5), решение которого дает значение температуры исходной смеси на выходе подогревателя:

$$T_1(t) = T_{10} e^{k_1 t} + 1/(k_2 - k_1) \left[C_1 / (k_1 k_2) (e^{k_1 t} - 1) + k_1 (1 - e^{k_2 t}) + (T_{20} b_1 - (k_1 - e_2) T_{10} - e_1) (e^{k_2 t} - e^{k_1 t}) \right] \quad (6)$$

Из уравнения (3), с учетом решения (6), находится $T_2(t)$. Здесь k_1, k_2 - корни уравнения, $a_1 = 1/\rho_1 V_1 (G_1 - kF/e_1)$, $b_1 = kF/\rho_1 c_1 V_1$, $e_1 = G_1/\rho_1 V_1 T_{вх}$; A_1, B_1, C_1 - коэффициенты, составленные из параметров: $a_1, b_1, a_2, b_2, e_1, e_2, G_1, G_2$ - управляющие параметры, задавая значения которых находится температура $T_1(t)$. Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи, а также их зависимости от расходов G_1, G_2 определяются по критериальным уравнениям в каждый момент времени t .

Математическая модель определения давления в колонне (ФБ EDA105).

Давление паровой смеси на выходе подогревателя E-EA-132 и в колонне определяется как сумма парциального давления компонентов. Парциальное давление компонентов над жидкостью состава x_i согласно закону Рауля равно: $P_i = P_i^* x_i$, где P_i

- парциальное давление паров i -го компонента, P_i^* - давление насыщенного пара i -го компонента, x_i - концентрация компонента в жидкой фазе. Общее давление паров P

согласно закону Дальтона: $P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n P_i^* x_i$. (7) Давление насыщенного пара i -го компонента зависит только от температуры и может быть аппроксимировано уравнением Риделя-Планка-Миллера в виде: $P_i^* = P_{ic} \exp\left\{-G/T_{ir} \left[1 - T_{ir}^2 + k(3 + T_{ir})(1 - T_{ir})^3\right]\right\}$

Здесь $G = 0.4835 + 0.4065h^*$; $h^* = T_{ir}^b \ln P_{ic} / (1 - T_{ir}^b)$; $T_{ir} = T / T_{ic}$; $k = (h^* / G - (1 - T_{ir}^b)) / ((3 + T_{ir}^b)(1 - T_{ir}^b)^2)$; $T_{ir}^b = T_{ib} / T_{ic}$; T - температура, К; T_{ir} - приведенная температура; T_{ir}^b - приведенная температура кипения; T_{ib} - нормальная температура кипения; T_{ic} , P_{ic} - критические температура и давление компонента; i - номер компонента. Концентрацию компонентов жидкого питания x_i , поступающего со склада, считаем постоянной. Продифференцируем уравнение (7) по времени:

$$\frac{dP}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{dP_i^*}{dt} x_i, \text{ где } \frac{dP_i^*}{dt} = \frac{P_{ic} G}{T_{ic} T_{ir}^2} e^{\{\}} \left\{ [\circ] + T_{ir} \left[2T_{ir} + k(1 - T_{ir})^3 + 3k(3 + T_{ir})(1 - T_{ir})^2 \right] \right\} \frac{dT}{dt}. \quad (8)$$

Здесь $\{\} = -G / T_{ir} \left[1 - T_{ir}^2 + k(3 + T_{ir})(1 - T_{ir})^3 \right]$, $[\circ] = 1 - T_{ir}^2 + k(3 + T_{ir})(1 - T_{ir})^3$, $i = 1, 2, \dots, n$.

Подставляя значения производной $dT/dt = dT_1/dt$ и температуры $T_1(t)$ из уравнения (6) в уравнение (8), получим изменение давления паров на выходе из подогревателя и в колонне на первом этапе пуска ($t \leq 184$).

$$\frac{dP}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{ic} G x_i}{T_{ic} T_{ir}^2} e^{\{\}} \left\{ [\circ] + T_{ir} \left[2T_{ir} + k(1 - T_{ir})^3 + 3k(3 + T_{ir})(1 - T_{ir})^2 \right] \right\} \frac{dT_1}{dt}, T_{ir}^b = T_1 / T_{ic}. \quad (9)$$

Интегрирование уравнения дает изменение давления в колонне $P(t)$.

По окончании первого этапа пуска в кипятильник колонны подается греющий пар и флегма на орошение, продолжается подача питания. Управление давлением в колонне производится подачей греющего пара в кипятильник колонны в зависимости от расхода питания $G_F = G_1$. Из уравнения теплового баланса определяется паровой поток в колонне V : $V r_{CM} = G_{ГП} r_{ГП}$, $\Rightarrow V = G_{ГП} r_{ГП} / r_{CM}$, где r_{CM} , $r_{ГП}$ - теплота парообразования смеси и теплота конденсации греющего пара; $G_{ГП}$ - расход греющего пара. Уравнение для расчета температуры в кубе колонны в зависимости от расходов греющего пара, питания и флегмы запишется в виде:

$$V_0 \rho c_p dT_k / dt = (G_F (1 - \varepsilon) + L) c_F T_1 - V r_{CM} - W c_w T, \quad W = 0 \vee V_0 \leq 0,45 V_k, \quad (10)$$

где T_k - температура в нижней части колонны; V_k - объем куба колонны, V_0 - объем жидкости в кубе, W - отбор кубового остатка, $G_F (1 - \varepsilon)$ - расход высококипящих компонентов в куб колонны; L - расход флегмы; ρ, c_F, r_{CM} - теплофизические параметры жидкости и пара. Объем жидкости в кубе колонны опишется уравнением:

$$dV_0 / dt = G_F (1 - \varepsilon) - G_{ГП} r_{ГП} / r_{CM} - W, \quad V_0 = V_n \text{ при } t = 0, \quad W = 0 \vee V_0 \leq 0,45 V_k.$$

Отсюда $V_0(t) = (G_F (1 - \varepsilon) - G_{ГП} r_{ГП} / r_{CM} - W)t + V_n$, (11) здесь $V_0(t) = S H_K(t)$. S - сечение куба колонны, H_K - уровень жидкости в кубе. Интегрируя уравнение (10) при начальном условии $T_k = T_{k0}$ при $t = t_0$ с учетом распределения температуры исходной смеси $T_1(t)$ из уравнения (6) и объема жидкости (11), получим значение температуры в кубе колонны $T_k(t)$. Подставляя в уравнение (8) распределение температуры $T_k(t)$ и производной $dT/dt = dT_k/dt$ из уравнения (10), найдем давление в колонне. Давление пара в колонне теперь определяется по температуре в зависимости от

задаваемых расходов питания, флегмы и греющего пара в кипятильник колонны.

Математическая модель флегмовой емкости (функциональный блок расчета уровня жидкости в емкости). С начала пуска установки отбора продуктов из емкости нет. Уравнение материального баланса записывается в виде: $SdH_L/dt = G_{F\varepsilon}$, $H_L(t) = H_L + (G_{F\varepsilon}/S)t$, где S - сечение емкости; H_L - уровень жидкости в флегмовой емкости; $G_{F\varepsilon} = V$ - расход конденсата парового потока из дефлегматора. При достижении уровня $H_L = 0.35H_{L0}$ включаются насос отбора жидкости из флегмовой емкости и регуляторы расхода флегмы и отбора фракции С3-С4.

Математические модели управляющих органов (функциональные блоки регулирующих клапанов (РК)). Статические характеристики РК имеют линейный характер, поэтому расход протекающей жидкости или пара G пропорционален степени открытия РК x : $G = kx$, где k - коэффициент пропорциональности (расхода).

На рисунках 3-6 приведены экспериментальные данные и результаты расчетных значений параметров в процессе пуска установки.

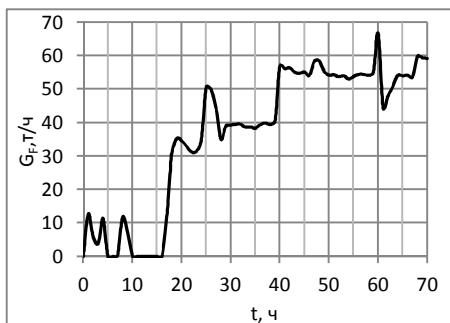


Рис. 3. Зависимость расхода питания в колонну E-DA-105 от времени в период пуска.

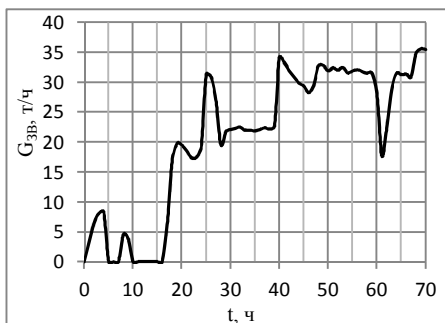


Рис. 4. Зависимость расхода закалочной воды в подогреватель E-EA-132 от времени в период пуска.

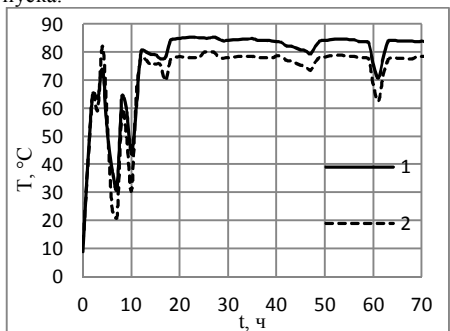


Рис. 5. Зависимость температуры ШФЛУ на выходе из подогревателя от времени в период пуска. 1 - экспериментальные значения, 2 - расчетные значения по уравнению (6).

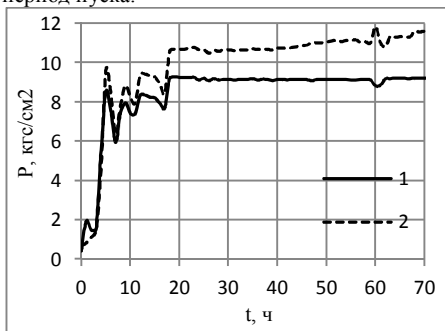


Рис. 6. Зависимость давления в колонне E-DA-105 от времени в период пуска. 1 - экспериментальные значения; 2 - расчетные значения по уравнению (9).

В третьей главе предложен метод разработки компьютерных тренажеров, в котором реализованы рассмотренные математические модели для управления технологическим процессом при обучении промышленного персонала нефтехимических

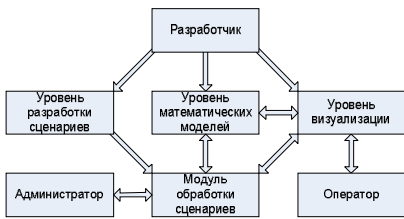


Рис. 7. Структурная схема компьютерного тренажерного комплекса.

производств на примере установки разделения углеводородов завода «Этилен-600» ПАО «Нижнекамскнефтехим». На структурной схеме тренажерного комплекса представлены основные компоненты системы и их связь между собой (рис. 7). Комплекс состоит из трех подсистем/уровней, на которых осуществляется разработка: уровень визуализации технологических схем, уровень разработки математических моделей и уровень разработки сценариев.

На уровне визуализации происходит создание графической оболочки, которая в SCADA-системах называется мнемосхемой. Мнемосхема создается на основании технологической схемы узла из имеющегося набора визуальных элементов, а также окон контроля и управления. Имеется возможность воссоздать графический интерфейс любой системы управления для обучения персонала в условиях, идентичных реальным.

На рисунке 8 представлено окно общего вида, которое делится на несколько участков: 1 – рабочая область, в которой происходит управление технологической схемой; 2 – область просмотра всей схемы для визуального обзора (миникарта); 3 – рамка текущей рабочей области; 4 – кнопки действий – «Старт», «Стоп», (запуск и останов теста) «Далее» (пропуск действия), «Найти» (поиск визуального элемента), «Панель» (скрытие/отображение миникарты), «Помощь» (доступ к электронно-справочной системе, в которую входят «Руководство пользователя» и «Упражнения»), «Выход»; 5 – окно сообщений, в котором отражается правильность/неправильность каждого выполненного пользователем действия, а также выполнение действия по ожиданию.

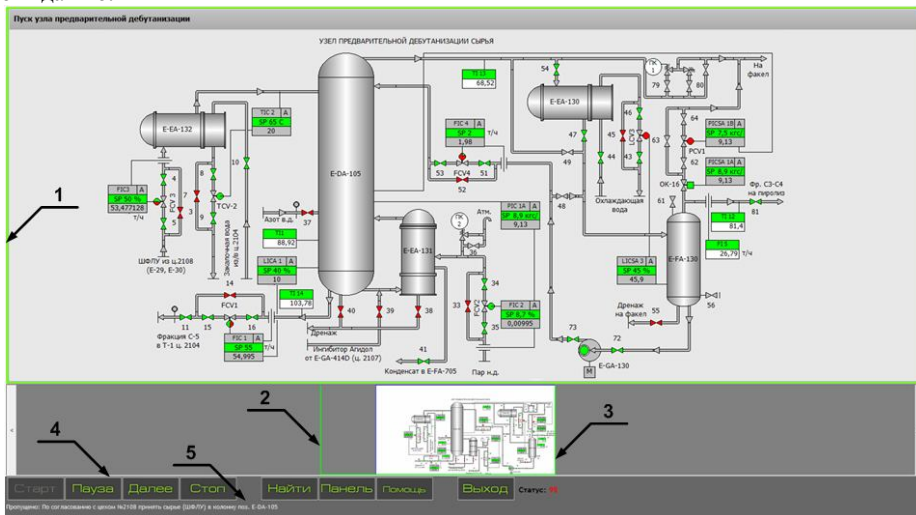


Рисунок 8. Окно общего вида

В ходе обучения пользователь выполняет действия трех типов: текстовые (позвонить, предупредить, сообщить и т.д.); по ожиданию заполнения/опорожнения емкости, набору/сбросу давления и т.д.; активные (открытие/закрытие регулирующих и

отсечных клапанов, ручных арматур, электродвигателей, пуск/останов насосов и т.д.).

На уровне математических моделей происходит разработка математической модели установки на языке НФС (рис. 2). Уровни визуализации и математических моделей имеют двустороннюю связь. С уровня математических моделей на уровень визуализации выводятся моделируемые технологические параметры. С уровня визуализации на уровень математических моделей поступают управляющие воздействия от оператора (открытие/закрытие арматур, изменение степени открытия регулирующего органа, изменение состояния регулятора, включение/выключение насоса и т.д.). Таким образом, оператор воздействует на математическую модель, изменяя режим ее работы, а по изменению технологических параметров определяет реакцию системы на свои действия.

Уровень разработки сценариев. Концепция тренажерного комплекса такова, что пользователю в ходе обучения необходимо освоить перечень действий, определенных технологическим регламентом, который по своей сути является сценарием, программой обучения. Для каждого блока/узла разрабатывается набор сценариев/тестов: подготовка к пуску, пуск, останов, нормальное ведение процесса, набор упражнений по ПЛА. Разработанные сценарии определяют жесткую структуру выполнения теста.

Пуск технологической установки дебутанизации углеводородов в компьютерном тренажере.

Основными этапами пуска установки являются: прием теплоносителей в теплообменники; набор давления в колонне; прием питания; заполнение куба флегмой; подача пара в кипятильник; отбор дистиллята и кубового остатка. На основании этапов пуска в компьютерном тренажере формируется сценарий, состоящий из 55 действий.

Для приема теплоносителей в теплообменники последовательно открывается перечень ручных арматур. Первым является действие: «Открыть ручную арматуру № 37». Для выполнения этого действия пользователь находит на схеме данную арматуру и открывает ее нажатием кнопки «Открыть». Модуль обработки сценариев сравнивает действие, выполненное пользователем, с действием, прописанным в сценарии. При совпадении этих действий выполненное действие передается в подсистему математического моделирования, в ФБ HV37 изменяется значение параметра ст с 0 на 1, что отражается на мнемосхеме: арматура меняет цвет с красного на зеленый.

Второе действие является текстовым. В появившемся окне выбора текстовых действий пользователь выбирает действие «Произвести продувку узла дебутанизации углеводородов». Далее выполняется ряд действий по открытию ручных арматур.

Набор давления в колонне осуществляется подачей питания в колонну и закалочной воды в подогреватель, для чего пользователь открывает регулирующие клапаны FCV3 и TCV2. После этого в функциональных блоках по аналитическим зависимостям начинается изменение давления в колонне и температуры питания на выходе подогревателя. Таким образом, ведется управление процессом пуска в режиме ручного управления на компьютерном тренажере. При прохождении теста пользователю необходимо выполнить все действия, записанные в сценарии. В случае выполнения пользователем неверного действия выдается сообщение об ошибке. Каждое выполненное действие отражается в окне сообщений и заносится в отчет о прохождении теста, который формируется после завершения тестирования.

Использование адекватных математических моделей технологической установки и системы управления позволяет обеспечить качество процесса обучения персонала.

В тренажере реализовано 3 режима обучения: учебно-тренировочный режим обучения, режим экзамена, демонстрационный режим программного управления. В учебно-тренировочном режиме не ограничивается время на выполнение действий, а

результаты обучения не записываются в БД. В режиме экзамена имеются временные ограничения на выполнение действий, а отчет сохраняется в БД. В демонстрационном режиме работы компьютерного тренажера реализовано управление установкой программными регуляторами, алгоритмы которых рассмотрены далее.

В четвертой главе рассмотрено моделирование и управление процессом разделения на основе модели автоматизированного управления, разработано программное управление процессом пуска и нормального функционирования установки разделения углеводов.

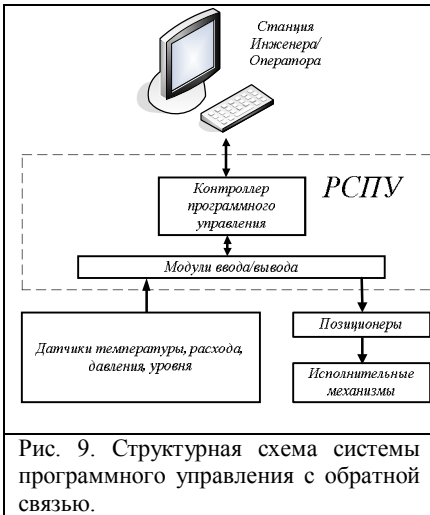


Рис. 9. Структурная схема системы программного управления с обратной связью.

Для управления установкой дебутанизации углеводов необходимо найти такие управляющие параметры (расходы питания – G_F , греющего пара – $G_{ГП}$, охлаждающей воды – G_X , флегмы – L , закалочной воды – $G_{ЗВ}$), которые переводят установку из заданного начального состояния, в состояние нормального функционирования за заданное или минимальное время по заданной технологическим регламентом траектории пуска. Траектория пуска $[P(t), G_F(t), G_{C_3-C_4}(t), T_1(t)]$ может быть задана табличными данными в соответствии с требованиями регламента, определена из экспериментальных данных или получена с помощью математических модели установки.

Путем обработки экспериментальных данных, полученных в процессе пуска установки с помощью экспериментально-статистических методов моделирования получены уравнения регрессии: зависимости расхода питания G_F (т/ч) (12), расхода флегмы L (т/ч) (13), температуры питания колонны T_1 (°C) (14), расхода фракции C_3-C_4 на пиролиз $G_{C_3-C_4}$ (т/ч) (15), уровня жидкости в флегмовой емкости H_L (%) (16), давления в колонне P (кгс/см²) (17), уровня жидкости в кубе колонны H_K (%) (18), в процессе пуска от времени t . Эти зависимости принимаем в виде программы управления установкой.

$$G_F = 1.85t - 0.015t^2 \quad (12); \quad L = 22.159 - 87.979/t \quad (13); \quad T_1 = 35.445 + 12.527 \ln(t + 0.15) \quad (14)$$

$$G_{C_3-C_4} = 2.41 - 7274610^3 t + 6204610^3 t^2 - 0.82310^3 t^3, \quad (15); \quad H_L = 19.315 + 7.886 \ln(t + 0.3) \quad (16)$$

$$P = -0.099 + 0.471t + 0.902G_F - 6.95G_{ГП} + 0.099L - 0.793G_{C_3-C_4} - 0.01t \cdot G_F + \\ + 0.548t \cdot G_{ГП} - 0.021t \cdot L - 0.077t \cdot G_{C_3-C_4} - 0.069G_F \cdot G_{ГП} - 0.00556G_F \cdot L + \\ + 0.038G_F \cdot G_{C_3-C_4} + 0.061G_{ГП} \cdot L - 0.077G_{ГП} \cdot G_{C_3-C_4} + 0.03L \cdot G_{C_3-C_4}, \quad (17)$$

$$H_K = 8.57 - 0.424t + 1.12G_F - 27.617G_{ГП} + 0.0434t \cdot G_F - 0.045t \cdot G_{ГП} + 0.602G_F \cdot G_{ГП}. \quad (18)$$

Для учета влияния возмущающих факторов на управляющие воздействия рассматривается задача синтеза программного управления с обратной связью, с коррекцией управляющих воздействий по измеренным значениям технологических параметров процесса в распределенной системе программного управления (рис. 9). Для реализации сформулированной задачи синтеза разработаны алгоритмы программного

управления технологическими параметрами в период пуска и нормального функционирования установки.

Программное управление расходом питания в колонну представим в виде алгоритма. В алгоритме подачи питания в колонну реализована система программного управления с обратной связью. Изменение расхода во времени подчиняется программе (12) и корректируется в зависимости от возможных возмущений по величине измеренного значения расхода G_F . Входными параметрами алгоритма являются: τ - время управления; Δt - период опроса расходомера FIC3; n – количество итераций; x_{F0} – начальное положение регулирующего органа на трубопроводе подачи питания FIC3; t_0 – начало отсчета времени; G_{Fi} – измеренное значение расхода в i -й момент времени; G_{Fi}^p – программное значение расхода в i -й момент времени, полученное по уравнению (12); x_{Fi} – значение степени открытия регулирующего органа в i -й момент времени.

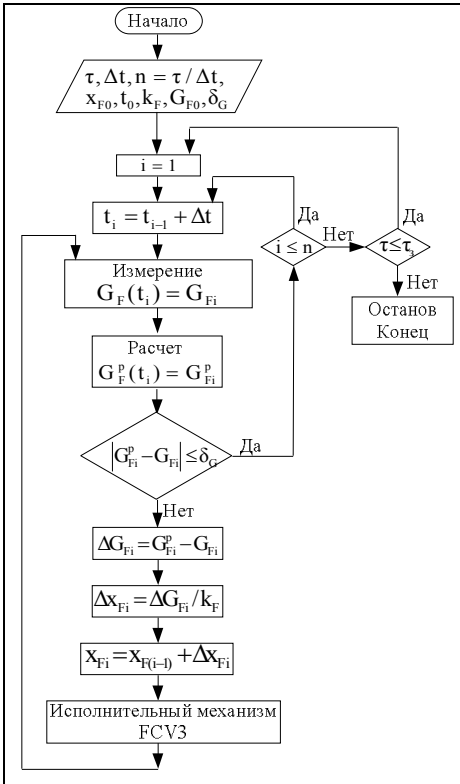


Рис. 10. Алгоритм управления программного регулятора расхода питания FIC3.

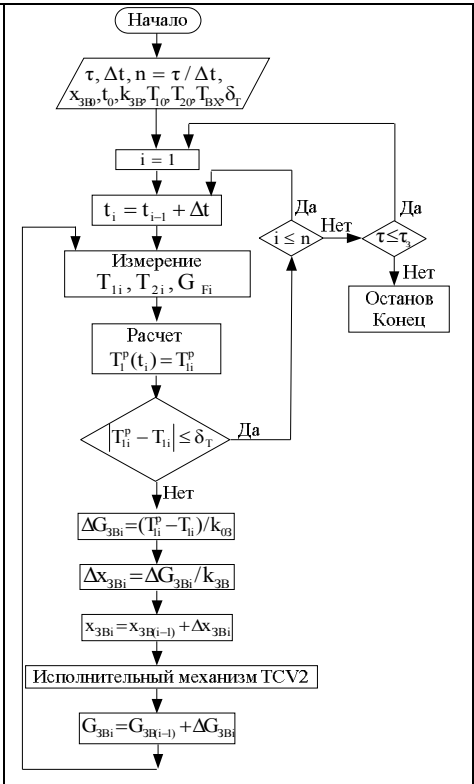
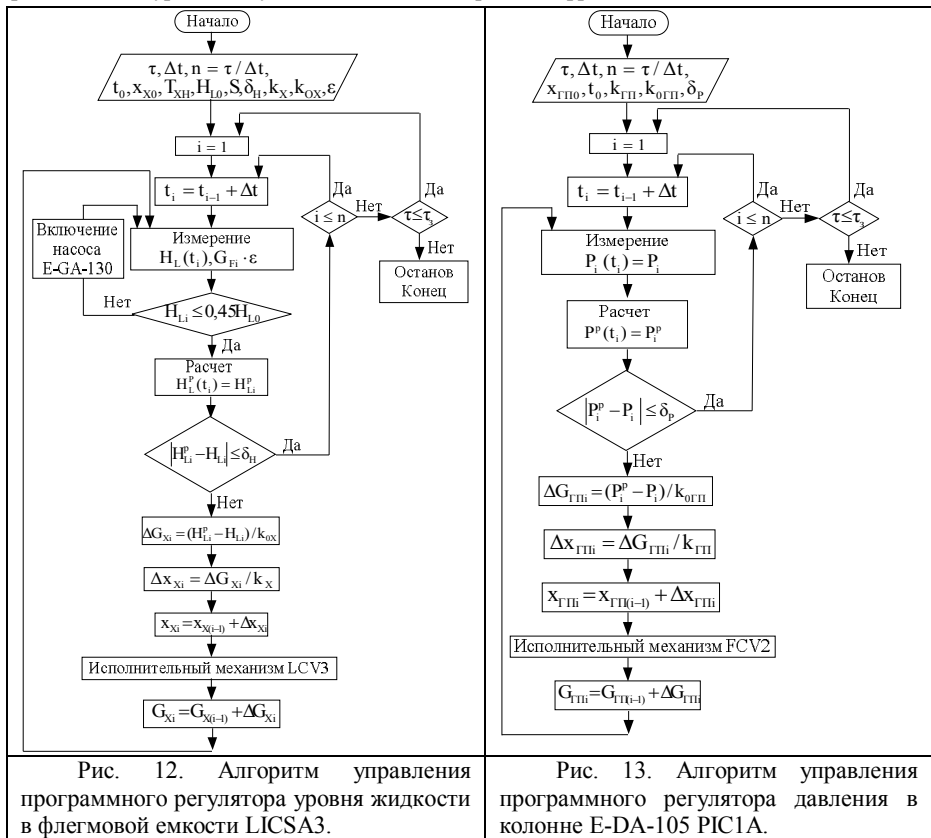


Рис. 11. Алгоритм управления программного регулятора температуры питания колонны TIC2.

В момент времени t_i измеренное значение расхода G_{Fi} сравнивается с программным значением G_{Fi}^p . Если отклонение измеренного значения G_{Fi} и программного G_{Fi}^p не превышает допустимую погрешность δ_F , то в следующий момент

времени $t_i + \Delta t$ снова измеряется G_{Fi} и рассчитывается G_{Fi}^p и т.д. до выполнения условия по δ_F . Если отклонение стало больше δ_F , то в зависимости от отклонения ΔG_{Fi} определяется изменение степени открытия регулирующего органа Δx_{Fi} и его новое положение $x_{Fi} = x_{Fi(i-1)} + \Delta x_{Fi}$. Электрический сигнал о изменении степени открытия РО через модуль вывода передается на позиционер исполнительного механизма, который изменяет степень открытия РО. До окончания времени управления ($i \leq n$) повторяется расчет и вывод управляющего воздействия на исполнительный механизм FCV3, после чего программный регулятор поддерживает величину расхода на заданном программой значении G_F^3 .

Аналогичным образом реализованы алгоритмы управления программных регуляторов температуры питания колонны TIC2 (рис. 11), уровня жидкости в флегмовой емкости LICSA3 (рис. 12), давления в колонне PIC1A (рис. 13), расхода флегмы FIC4, уровня в кубе колонны LICA1, расхода фракции C3-C4 FIC5.



На рис. (14)-(17) приведены результаты расчета управляющих и выходных параметров установки во времени. Их сравнение с программными и экспериментальными значениями показывает удовлетворительное согласование.

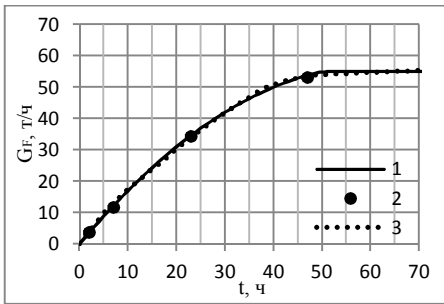


Рис. 14. Зависимость расхода питания в колонну от времени в период пуска. 1 – программное управление (12); 2 – экспериментальные значения; 3 – расчетные данные при возмущении $\Delta G_F(t) = \pm 0,015 G_{Fном}$.

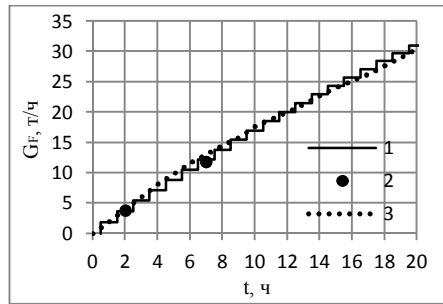


Рис. 15. Фрагмент зависимости расхода питания в колонну от времени в период пуска на отрезке от 0 до 20 ч.. 1 – программное управление (12); 2 – экспериментальные значения; 3 – расчетные данные при возмущении $\Delta G_F(t) = \pm 0,015 G_{Fном}$.

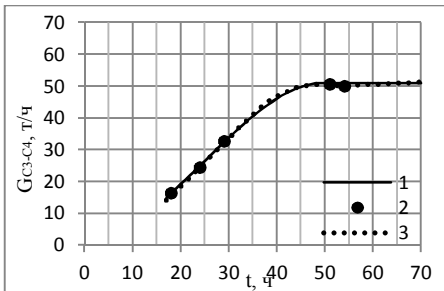


Рис. 16. Зависимость расхода фракции C₃-C₄ на пиролиз от времени в период пуска. 1 – программное управление (16); 2 – экспериментальные значения; 3 – расчетные данные при возмущении $\Delta G_{C3-C4}(t) = \pm 0,015 G_{C3-C4ном}$.

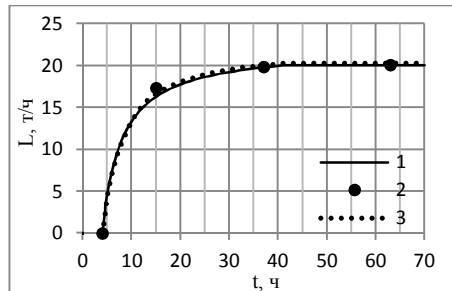


Рис. 17. Зависимость расхода флегмы от времени в период пуска. 1 – программное управление (13); 2 – экспериментальные значения; 3 – расчетные данные при возмущении. $\Delta L(t) = \pm 0,015 L_{ном}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны математические модели технологических процессов установки разделения углеводородов в виде нестационарных уравнений термодинамики, материального и теплового балансов. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными в процессе пуска показало их удовлетворительное согласование.

2. По аналогии с технологией конфигурирования контроллеров в АСУТП, обычно на языке функциональных блоков (FBD), разработана модель автоматизированной технологической установки разделения углеводородов на языке непрерывных функциональных схем (НФС). Связанные между собой функциональные блоки – математические модели динамических режимов работы технологических аппаратов, вспомогательного оборудования и управляющих органов технологической установки.

3. На основе модели автоматизированной установки предложен метод разработки компьютерных тренажеров для обучения промышленного персонала нефтехимических

производств. Основными этапами разработки являются: создание графической оболочки в виде мнемосхемы, аналогичной таковой в SCADA-системе; разработка математической модели установки на языке НФС; разработка тестов и сценариев обучения, интерфейсов оператора и инструктора. Сценарий или программа обучения представлена в виде технологического регламента пуска, останова, нормальной эксплуатации, плана ликвидации аварий.

4. На основе предложенных методов разработаны и введены в эксплуатацию компьютерные тренажеры для обучения промышленного персонала действиям по нормальной эксплуатации технологического процесса, пуску, плановой и аварийной остановке в типовых и специфических нештатных и аварийных ситуациях в цехах заводов ДБиУВС, Этилена, ИМ, СК ПАО «Нижекамскнефтехим». Программное обеспечение зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ. Разработанные компьютерные тренажеры соответствуют «Общим правилам взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утвержденным приказом Ростехнадзора № 96 от 11.03.2013.

5. Получены математические модели и алгоритмы программного управления с обратной связью, разработан алгоритм программного управления установкой разделения углеводородов, обеспечивающий перевод технологического процесса из предпускового состояния в режим нормального функционирования за заданное время при допустимом отклонении технологических параметров процесса и производительности от заданных программных значений.

6. Перспективы дальнейшей разработки темы исследования связаны с созданием компьютерных тренажеров по обучению студентов и промышленного персонала для широкого класса технологических установок в нефтехимии и нефтепереработке, внедрением разработанной модели автоматизированной технологической установки в рабочие алгоритмы АСУТП в виде предложенных моделей и алгоритмов управления программными регуляторами, использованием предложенных моделей и алгоритмов управления для решения задач оптимизации.

Основные результаты диссертационной работы представлены в публикациях.

В изданиях из перечня ВАК:

1. Мушнин, А.В. Разработка компьютерных тренажеров по ликвидации аварийных ситуаций в химической промышленности / А.В. Мушнин, Д.В. Елизаров, В.В. Елизаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 8. – С. 348–351.

2. Мушнин, А.В. Моделирование процессов пуска и останова химико-технологических систем в компьютерном тренажере / А.В. Мушнин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – № 1 (64). Выпуск 2. – С. 230–234.

3. Мушнин, А.В. Математическое моделирование системы регулирования уровня и расхода в резервуаре с жидкостью в компьютерном тренажере / А.В. Мушнин, А.В. Долганов, Д.В. Елизаров, В.В. Елизаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 12. – С. 269–272.

4. Мушнин, А.В. Имитационная модель для компьютерного тренажера управления технологическим процессом ректификации узлом предварительной очистки бутадиена-сырца / А.В. Мушнин, А.В. Долганов, И.М. Валеев, Н.Г. Смолин // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 12. – С. 273–277.

5. Елизаров, В.И. Состав и структура распределенного компьютерного тренажера / В.И. Елизаров, Э.Р. Галеев, А.В. Мушнин, Н.Г. Смолин, И.М. Валеев // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 20. – С. 288–290.

6.Елизаров, В.В. Моделирование процесса дебутанизации углеводородов с помощью функциональных блоков / В.В. Елизаров, Д.В. Елизаров, А.В. Мушчинин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. – № 4. – С. 30–34.

Elizarov, V.V. Modeling of Hydrocarbon Debutanization Based on Functional Blocks / V.V. Elizarov, D.V. Elizarov, A.V. Mushchinin // Chemical and Petroleum Engineering. – 2014. – V. 50. – N 3. – P. 255–261.

7.Кабанов, В.В. Математическое моделирование параметров пуска установки предварительной дебутанизации сырья / В.В. Кабанов, А.В. Мушчинин, В.В. Елизаров, В.И. Елизаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 9. – С. 292–294.

8.Замалетдинов, Р.А. Математическое моделирование пуска и остановки печей пиролиза Е-ВА-121, Е-ВА-122 / Р.А. Замалетдинов, А.В. Мушчинин, В.В. Елизаров, В.И. Елизаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 9. – С. 285–288.

9.Мушчинин, А.В. Конфигурирование химико-технологических систем на языке непрерывных функциональных схем / А.В. Мушчинин, В.В. Елизаров, В.И. Елизаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 21. – С. 285–288.

10. Мушчинин, А.В. Программное управление расходом питания в колонну при пуске установки дебутанизации углеводородов / А.В. Мушчинин, В.В. Елизаров, В.И. Елизаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 9. – С. 219–221.

Прочие публикации:

11. Мушчинин, А.В. Моделирование аварийных ситуаций в нефтеперерабатывающей отрасли для обучения персонала / А.В. Мушчинин, Д.В. Елизаров, В.В. Елизаров // Актуальные инженерные проблемы химических и нефтехимических производств и пути их решения. Сб. трудов Всероссийской научно-практической конференции; под общ. ред. В.И. Елизарова. – Нижнекамск: Нижн. хим.-техн. инст-т, 2012. – С. 47–50.

12. Елизаров, Д.В. Разработка программного комплекса для моделирования технологических установок и систем управления / Д.В. Елизаров, А.В. Мушчинин, В.В. Елизаров // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-25. Сб. трудов XXV Международной научной конференции: в 10 т. Т. 9; под общ. ред. А.А. Большакова. – Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, 2012. – С. 31–33.

13. Мушчинин, А.В. Компьютерный тренажерный комплекс по обучению операторов цеха углеводородного сырья / А.В. Мушчинин, Д.В. Елизаров // Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах – УТЭОСС - 2012. Материалы 5-й российской мультиконференции по проблемам управления. Спб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012. – С. 586–590.

14. Мушчинин, А.В. Алгоритм разработки математической модели емкости с регулятором уровня в компьютерном тренажере / А.В. Мушчинин, Д.В. Елизаров, В.В. Елизаров // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-26. Сб. трудов XXVI Международной научной конференции: в 10 т. Т. 1; под общ. ред. А.А. Большакова. – Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 2013. – С. 84–86.

15. Мушчинин, А.В. Структура распределенного компьютерного тренажера / А.В. Мушчинин // Перспективные разработки науки и техники – 2013. Материалы IX Международной научно-практической конференции. Т. 40. Технические науки. – Пржемысль: Наука и студия, 2013. – С. 9–12.

16. Мушчинин, А.В. Программная среда для разработки распределенного компьютерного тренажера / А.В. Мушчинин // Технические и математические науки:

актуальные проблемы и перспективы развития – 2013. Сборник материалов II Международной научно - практической конференции. – Киев: 2013. – С. 40–47.

17. Мушнин, А.В. Математическое моделирование системы регулирования температуры продукта на выходе из теплообменника в конструкторе распределенного компьютерного тренажера / А.В. Мушнин // Достижения высшей школы – 2013. Материалы IX Международной научно-практической конференции. Т. 40. Математика. Физика. – София: Бял ГРАД-БГ, 2013. – С. 36–39.

18. Мушнин, А.В. Имитационное моделирование системы теплообмена на языке непрерывных функциональных схем / А.В. Мушнин, Д.В. Елизаров, В.В. Елизаров // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27. Сб. трудов XXVII Международной научной конференции: в 12 т. Т. 2; под общ. ред. А.А. Большакова. – Тамбов: Тамбовск. гос. техн. ун-т, 2014. – С. 22–24.

19. Мушнин, А.В. Имитационная модель управления узлом предварительной дебутизации углеводородов / А.В. Мушнин, В.В. Елизаров // XII Всероссийское совещание по проблемам управления – ВСПУ-2014. Труды. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 9126–9130.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

20. Компьютерный тренажерный комплекс по обучению операторов цеха углеводородного сырья / В.В. Елизаров, А.В. Мушнин и др., зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 16.10.2012, 2012619374.

21. Конструктор для моделирования пуска, останова и аварийных ситуаций на предприятиях химии и нефтехимии / В.В. Елизаров, А.В. Мушнин и др., зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 16.10.2012, 2012619375.

22. Программный комплекс автоматизированного проектирования массообменных и реакционных аппаратов, инвариантных к внешним сырьевым источникам / В.В. Елизаров, А.В. Мушнин и др., зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 25.10.2012, 2012619651.

23. Программная среда для разработки распределенных компьютерных тренажеров взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств / В.В. Елизаров, А.В. Мушнин и др., зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 10.09.2013, 2013618497.

24. Распределенный компьютерный тренажерный комплекс цеха выделения бугадиена из пиролизной фракции углеводородов С4 завода Этилен / В.В. Елизаров, А.В. Мушнин и др., зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 10.09.2013, 2013618498.

25. Распределенный компьютерный тренажерный комплекс цеха углеводородного сырья производств дивинила и бутилкаучука / В.В. Елизаров, А.В. Мушнин и др., зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 10.09.2013, 2013618499.