

КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

МУЩИНИН АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

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

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
доцент, Елизаров В.В.

Казань – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ (ХТС)	15
1.1. Состав ХТС	15
1.1.1. Существующие подходы к математическому моделированию ХТС	16
1.2. Моделирование систем управления	18
1.3. Математическое моделирование функциональных блоков ХТС	21
1.3.1. Экспериментально-статистические методы моделирования ХТС ..	21
1.3.2. Регрессионный и корреляционный анализ уравнений	24
1.3.3. Общий вид уравнений материально-тепловых балансов ХТС	26
1.4. Особенности управления технологическими установками разделения углеводородов	29
1.4.1. Управление процессом пуска и останова в ручном режиме. Достоинства и недостатки	32
1.4.2. Технологический регламент установки дебутанизации углеводородов	34
1.4.3. Основные этапы пуска установки дебутанизации углеводородов ..	37
1.4.4. Экспериментальное исследование процесса пуска установки дебутанизации углеводородов.....	38
1.5. Моделирование системы программного управления в АСУТП и тренажерных комплексах	44
1.5.1. Текущее состояние отрасли тренажеростроения и существующие подходы к разработке тренажерных комплексов.....	44
1.5.2. Построение компьютерных тренажеров по обучению промышленного персонала работе в системах управления.....	50
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ РАЗДЕЛЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ЯЗЫКЕ НЕПРЕРЫВНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ.....	52

2.1. Моделирование установки на языке НФС	52
2.1.1. Условные обозначения параметров функциональных блоков.....	54
2.1.2. Условные обозначения параметров функциональных блоков в программном коде.....	59
2.1.3. Алгоритмы сопряжения функциональных блоков	60
2.2. Конфигурирование типовых ХТС	62
2.2.1. Конфигурирование контура регулирования расхода	62
2.2.2. Конфигурирование ХТС, состоящей из емкости, контуров регулирования уровня и расхода продукта.....	64
2.2.3. Конфигурирование ХТС теплообмена с контуром каскадного регулирования	67
2.3. Конфигурирование ХТС дебутанизации углеводородов	70
2.4. Математические модели функциональных блоков НФС дебутанизации углеводородов.....	80
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ	101
3.1. Метод разработки компьютерных тренажеров для обучения персонала. Этапы разработки.....	101
3.1.1. Уровень визуализации технологических схем.....	102
3.1.2. Уровень математических моделей.....	103
3.1.3. Уровень разработки сценариев	106
3.1.4. Модуль обработки сценариев	110
3.2. Разработка интерактивного пользовательского интерфейса тренажера	111
3.2.1. Описание интерфейса оператора.....	111
3.2.2. Описание интерфейса администратора.....	119
3.3. Сценарий пуска узла дебутанизации углеводородов в компьютерном тренажере.....	120
3.4. Разработка и внедрение компьютерных тренажеров для обучения промышленного персонала нефтехимических производств ПАО «Нижнекамскнефтехим».....	134

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ДЕБУТАНИЗАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭТИЛЕНА....	139
4.1. Распределенная система программного управления.....	139
4.1.1. Построение программы управления процессом пуска установки дебутанизации углеводородов.....	141
4.1.2. Программа управления расходом питания в колонну от времени пуска.....	142
4.1.3. Программа управления расходом пара в кипятильник колонны от времени пуска.....	145
4.1.4. Программа управления расходом фракции C ₃ -C ₄ на печи пиролиза от времени пуска.....	148
4.1.5. Программа управления температурой питания колонны от времени пуска.....	152
4.1.6. Программа управления уровнем жидкости в флегмовой емкости от времени пуска.....	154
4.1.7. Программа управления давлением в колонне от времени и параметров пуска.....	156
4.1.8. Программа управления уровнем в кубе колонны от времени и параметров пуска.....	161
4.2. Алгоритмы программного управления установкой разделения углеводородов.....	165
4.2.1. Программное управление расходом питания в колонну.....	165
4.2.3. Программное управление расходом флегмы.....	169
4.2.4. Программное управление расходом фракции C ₃ -C ₄	171
4.2.5. Программное управление давлением в колонне.....	172
4.2.6. Программное управление уровнем жидкости в флегмовой емкости.....	174
4.2.7. Программное управление уровнем жидкости в кубе колонны.....	178
4.3. Алгоритм программного управления пуском установки дебутанизации углеводородов.....	181
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	187

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	189
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	210
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	213
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	221

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

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 возмущениям. 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 непроизводительную 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 (PCY) 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, B. Moore по совершенствованию систем управления показывает, что большие резервы повышения экономической эффективности производств связаны с разработкой систем «продвинутого» [1,2,3] и усовершенствованного управления APC (Advanced process control), многопараметрических систем управления [4,5,6]. Для всех таких систем главным классификационным признаком, объединяющим их в один большой класс, согласно исследованиям Веревкина А.П. [7] 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 систему управления, методы анализа одномерных систем непригодны [8,9]. Анализ таких систем Веревкин А.П., Кирюшин О.В., Ельцов И.Д. [10,11] 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. [12,13,14] 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 реализации цели исследования в диссертации поставлены и решены 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 углеводородов.

Предметом исследования является модель автоматизированного управления установками разделения углеводородов.

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 углеводородов.

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 углеводородов 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 «Нижнекамскнефтехим». 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 мультиконференции 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. При активном участии научного руководителя д.т.н., доцента Елизарова В.В. осуществлялся выбор направлений, методов и приоритетов исследования, формирование содержания и структуры работы выполнено автором.

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.

В первой главе проводится анализ существующих подходов к моделированию процессов пуска и останова химико-технологических систем (ХТС), применимость данных подходов для разработки математической модели тренажерного комплекса. Рассматривается текущее состояние отрасли тренажеростроения, существующие методы обучения. Формулируется подход к решению задач обучения операторов и программного управления процессом пуска технологических установок.

Во второй главе рассматриваются основы моделирования ХТС на языке непрерывных функциональных схем (НФС): условные обозначения функциональных блоков и параметров функциональных блоков; условия обозначения параметров функциональных блоков в программном коде; алгоритмы сопряжения функциональных блоков. Представлено

конфигурирование типовых схем ХТС на языке НФС. По предложенной методике разработана математическая модель установки разделения углеводородов.

В третьей главе предложен метод разработки компьютерных тренажеров, предназначенных для приобретения практических навыков безопасного ведения работ, отработки действий промышленным персоналом нефтехимических производств ПАО «Нижнекамскнефтехим» на примере установки разделения углеводородов завода «Этилен-600». Приведены этапы разработки компьютерного тренажера на уровнях визуализации, функциональных блоков, разработки сценариев, а также алгоритм работы всего комплекса под управлением модуля обработки сценариев. Описан пользовательский интерфейс разработанного программного комплекса. Рассмотрен подробный перечень действий по пуску узла разделения углеводородов.

В четвертой главе разработано программное управление процессом пуска и нормального функционирования установки разделения углеводородов. На основе экспериментальных данных процесса пуска установки дебутанизации получены уравнения регрессии, описывающие изменение технологических параметров от времени пуска, которые служат программой в задаче программного управления процессом. Сформулирована задача математического моделирования программного управления технологическими параметрами с обратной связью. Получены математические модели и алгоритмы программного управления технологическими параметрами пуска установки дебутанизации углеводородов.

В приложении к диссертации приведены: режимные параметры в период пуска; основные этапы разработки тренажерного комплекса; акты внедрения в образовательный процесс, акты ввода в эксплуатацию и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ (ХТС)

В данной главе проводится анализ существующих подходов к моделированию химико-технологических систем (ХТС), применимость данных подходов для разработки математической модели тренажерного комплекса. Рассмотрено текущее состояние отрасли тренажеростроения, существующие методы обучения. Формулируется подход к решению задач программного управления технологическими установками и построению тренажерных комплексов.

1.1. Состав ХТС

Химико-технологической системой (ХТС) называется совокупность процессов и аппаратов химической технологии, объединенных для проведения требуемых технологических операций. ХТС состоит из технологических блоков и узлов, которые входят в состав технологических установок и производств[15].

Любая ХТС имеет определенную технологическую структуру и заданные параметры. При этом результаты функционирования ХТС можно охарактеризовать зависимостью выходных переменных (\bar{Y}) от технологической структуры ХТС (G), геометрических характеристик конструкций элементов системы (\bar{K}), физико-химических величин, характеризующих внутренние свойства системы (\bar{D}), входных переменных (\bar{X}) (рис. 1.1): $\bar{Y} = \bar{F}(\bar{X}, G, \bar{K}, \bar{D}, \tau)$.



Рис. 1.1. Структура ХТС

Количественную информацию о состоянии ХТС и ее свойствах можно получить экспериментально в условиях эксплуатации системы или расчетным способом, используя определенную математическую модель (ММ) системы. Математическое моделирование ХТС – это метод изучения свойств ХТС путем

проведения вычислительных экспериментов с математическими моделями этих ХТС.

1.1.1. Существующие подходы к математическому моделированию ХТС

Большая сложность технологической структуры современных проектируемых и действующих ХТС, многомерность ХТС как по числу составляющих элементов, так и по числу выполняемых ими функций, высокая степень параметрического взаимовлияния элементов обуславливает возникновение при решении задачи анализа, оптимизации [16-19] и синтеза ХТС [20-29] ряда принципиальных трудностей методологического и вычислительного характера. Для их исследования используют модели, в которых упрощенно отображены наиболее существенные процессы функционирования системы.

Математические модели подразделяются на операторно-символические и структурно-топологические. Операторно-символические модели ХТС представляют собой совокупность различных математических отношений общего вида, которые определяют значения переменных состояния ХТС как векторную функцию технологической топологии системы, конструкционных и технологических параметров элементов ХТС, а также входных переменных ХТС.

Структурно-топологические модели ХТС представляют собой специальные графические отображения и делятся на два класса: блок-схемы ХТС и топологические модели (графы ХТС). Графы находят широкое применение при моделировании ХТС [30-33].

Теория графов основана на абстрактной теоретико-множественной или наглядно-графической интерпретации, исходя из которой граф $G(X, \Gamma)$ задан, если задано непустое множество $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и многозначное отображение Γ множества X во множество X . Многозначное отображение Γ – это закон, по которому каждому элементу $x_i \in X$ ставится в соответствие некоторое подмножество $\Gamma x_i \subset X$. Элементы множества X изображаются

точками и называются вершинами графа (V), а отображение Γ -отрезками (иногда направленными), соединяющими элемент x с элементами подмножества Γx и называют ребрами U или дугами \bar{U} графа (рис. 1.2.).

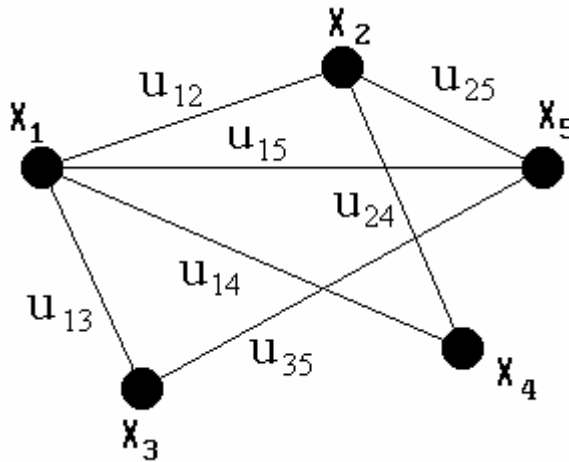


Рис. 1.2. Ненаправленный граф.

Одной из разновидностей графов являются сети Петри [34-40]. Сеть Петри определяется множеством входных и выходных функций I и O и конечным множеством позиций и переходов P и T . Она является двудольным ориентированным графом, в котором переходам соответствуют вершины, изображаемые утолщенными черточками, а позициям соответствуют вершины, изображаемые кружками. Дуги, направленные от позиций к переходам соответствуют функциям I , а от переходов к позициям – функциям O .

В сетях Петри существуют статические и динамические объекты. К первым относятся вершины сети Петри, а ко вторым метки (маркеры) внутри позиций. Событие – переход маркеров по сети. Последовательность событий формирует моделируемый процесс. При совершении события изменяется маркировка, т.е. распределение маркеров по позициям.

Существуют определенные правила срабатывания переходов: переход срабатывает при выполнении условия $N_i \geq K_i$, где N_i — число маркеров в i -й входной позиции, K_i — число дуг, идущих от i -й позиции к переходу; при этом число маркеров в i -й входной позиции уменьшается на K_i , а в j -й выходной позиции увеличивается на M_j , где M_j — число дуг, связывающих переход с j -й позицией. Фрагмент сети Петри с маркировкой $(2,2,3,1)$ приведен на рис.1.3.

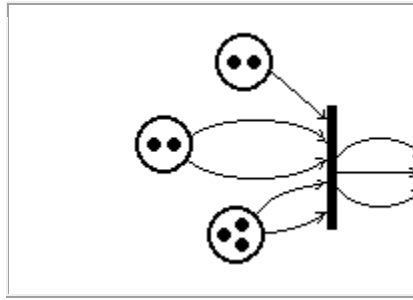


Рис. 1.3. Фрагмент сети Петри.

Теория графов находит широкое применение при разработке систем искусственного интеллекта [41-42]. Недостатком теории графов является плохая наглядность получаемой модели и сложность использования графов при моделировании систем управления.

1.2. Моделирование систем управления

В условиях эксплуатации на ХТС воздействует множество возмущений. При этом возникает необходимость управлять системой, например, поддерживать определенное состояние данной ХТС [43]. Современные технологии позволяют управлять состоянием ХТС в автоматическом и автоматизированном режимах. При этом управление ХТС осуществляется на двух иерархических уровнях: технологическом и организационно-техническом, с использованием автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и АСУ производствами или предприятиями (АСУП), соответственно. Каждая автоматизированная технологическая установка, узел или блок представляет совокупность определенного вида ХТС и АСУ.

Современные АСУ базируются на программируемых логических контроллерах (ПЛК), языки программирования которых описываются третьей частью стандарта МЭК 61131, разработанного Международной Электротехнической Комиссией (МЭК, IEC) [44-48].

Стандарт определяет языки программирования, синтаксис, вид объектов, структуру ПО, объявление переменных, общие элементы этих языков: используемые символы, типы данных и переменные; наборы стандартных функций и функциональных блоков, понятия программ на этих языках.

Стандарт устанавливает шесть языков программирования: графические – SFC, FBD, LD, CFC и текстовые – IL, ST [49-51].

Язык релейно-контактных схем, или релейных диаграмм (LD - Ladder Diagram) – графический язык, основанный на принципах релейно-контактных схем (элементами релейно-контактной логики являются: контакты, обмотки реле, вертикальные и горизонтальные перемычки и др.) с возможностью использования большого количества различных функциональных блоков.

Язык LD не поддерживает подпрограммы, функции, инкапсуляцию и другие средства структурирования программ. Язык эффективно используется для описания процессов, имеющих дискретный характер.

Язык FBD (Functional Block Diagram, Диаграммы Функциональных Блоков) – это графический язык высокого уровня, обеспечивающий управление потоками данных. Программа на языке FBD представляет собой совокупность функциональных блоков (functional blocks, FBs), входы и выходы которых соединены линиями связи (connections), по которым пересылаются данные между блоками. К типовым блокам относятся блок таймера, ПИД-регулятора, триггера, генератора импульсов, фильтра, и т. п. Каждый блок может иметь произвольное количество входов и выходов.

Функциональные блоки представляют собой фрагменты программ, написанных на языках IL, SFC, ST или других языках, которые могут быть многократно использованы в разных частях программы и которым соответствует графическое изображение, принятое при разработке функциональных схем электронных устройств. Язык часто применяется для замкнутых контуров систем управления и для создания и пополнения библиотеки типовых функциональных блоков.

Язык последовательных функциональных схем SFC (Sequential Function Chart) является графическим языком, в котором программа описывается в виде схематической последовательности шагов, объединенных

переходами. На языке SFC хорошо описываются последовательно выполняемые технологические процессы.

Язык ST (Structured Text, Структурированный Текст) является текстовым языком высокого уровня и имеет черты языков Pascal и Basic. Язык широко используется для выполнения сложных математических вычислений, описания сложных функций, функциональных блоков и программ.

Язык служит для создания процедур со сложной логикой и широко используется совместно с SFC, FBD, CFC как в главных программах, так и в теле функции. Текстовая форма представления программ служит сдерживающим фактором при разработке сложных систем, так как не дает наглядного представления ни о структуре программы, ни о происходящих в ней процессах.

Язык IL (Instruction List, Список Инструкций) представляет собой ассемблероподобный язык и является языком низкого (машинного) уровня. В основе языка лежит понятие аккумулятора и переходов по меткам.

IL практически не используется для программирования комплексных алгоритмов автоматизированного управления, но часто применяется для кодирования отдельных функций, функциональных блоков и программ, из которых впоследствии складываются схемы FBD или CFC, а также шагов и переходов в языке SFC.

Язык CFC (Continuous Flow Chart, Непрерывные Функциональные схемы) является дальнейшим развитием языка FBD. Относится к высокоуровневым языкам визуального программирования. Язык создан для проектирования систем управления непрерывными технологическими процессами. Проектирование сводится к выбору из библиотек готовых функциональных блоков, их позиционированию на экране, установке соединений между их входами и выходами, а также настройке параметров выбранных блоков.

В отличие от FBD, функциональные блоки языка CFC выполняют не только простые математические операции, а ориентированы на управление

целыми технологическими единицами. Так в типовой библиотеке CFC блоков находятся комплексные функциональные блоки, реализующие управление клапанами, моторами, насосами; блоки, генерирующие аварийные сигнализации; блоки PID-регулирования и т.д. Вместе с тем доступны и стандартные блоки FBD. Унаследовав от FBD саму концепцию программирования, язык CFC в наибольшей степени ориентирован на сам технологический процесс, позволяя разработчику абстрагироваться от сложного математического аппарата.

CFC прост в освоении, и при этом позволяет разрабатывать сложнейшие алгоритмы автоматизированного управления без каких-либо специфических знаний других языков программирования.

1.3. Математическое моделирование функциональных блоков ХТС

После изучения подходов к представлению ХТС и существующих языков программирования ПЛК требуется рассмотреть существующие методы разработки математических моделей элементов ХТС. При этом можно выделить два подхода: экспериментально-статистические методы построения моделей и нестационарные математические модели (уравнения баланса).

1.3.1. Экспериментально-статистические методы моделирования ХТС

Экспериментально-статистические методы используются в тех случаях, когда информации о рассматриваемом процессе недостаточно или процесс настолько сложен, что невозможно составить его детерминированную модель. Процесс при этом рассматривают как «черный ящик». Рассмотрим основы экспериментально-статистических методов, изложенные в работах [52-55]. В работе [56] пошаговая регрессия используется для оценки динамической составляющей. Математической моделью является функция отклика, связывающая результаты эксперимента с переменными параметрами:
$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_k).$$

Независимые переменные x_1, x_2, \dots, x_k называются факторами, координатное пространство с координатами x_1, x_2, \dots, x_k – факторным

пространством, а геометрическое изображение функции отклика в факторном пространстве – поверхностью отклика.

При использовании статистических методов математическая модель представляется в виде полинома – отрезка ряда Тейлора, в который разлагается

неизвестная зависимость:
$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ u \neq j}}^k \beta_{uj} x_u x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \dots ,$$

где
$$\beta_j = \left. \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right|_{\bar{x}=0}, \quad \beta_{uj} = \left. \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_u \partial x_j} \right|_{\bar{x}=0}, \quad \beta_{jj} = \left. \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_j^2} \right|_{\bar{x}=0} .$$

В связи с тем, что в реальном процессе всегда существуют неуправляемые и неконтролируемые переменные, изменение величины носит случайный характер. Поэтому при обработке экспериментальных данных получают так называемые выборочные коэффициенты регрессии b_0, b_j, b_{uj}, b_{jj} , являющиеся оценками теоретических коэффициентов $\beta_0, \beta_j, \beta_{uj}, \beta_{jj}$.

Уравнение регрессии, полученное на основании опыта, запишется в виде:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{u,j=1}^k b_{uj} x_u x_j + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 + \dots$$

Коэффициент b_0 называют свободным членом уравнения регрессии; коэффициенты b_j – линейными эффектами; коэффициенты b_{jj} – квадратичными эффектами; коэффициенты b_{uj} – эффектами взаимодействия.

Коэффициенты уравнения определяются методом наименьших квадратов из

условия:
$$\Phi = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 = \min .$$

При изучении зависимости от одного переменного параметра, как правило, строится эмпирическая линия регрессии (рис. 1.4), по виду которой можно подобрать уравнение регрессии $\hat{y} = f(x)$.

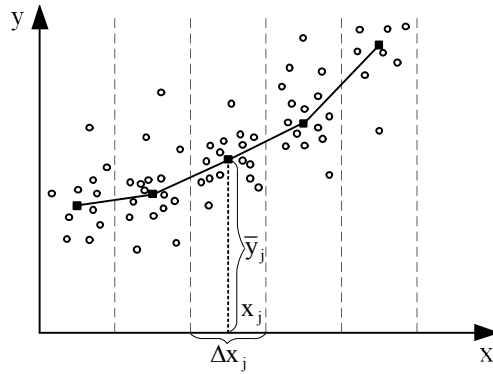


Рис. 1.4. Корреляционное поле.

Задача определения параметров уравнения регрессии (b_0, b_1, b_2, \dots) сводится к определению минимума функции многих переменных. Если $\hat{y} = f(x, b_0, b_1, b_2, \dots)$ есть функция дифференцируемая и требуется выбрать

$$b_0, b_1, b_2, \dots \text{ так, чтобы } \Phi = \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i, b_0, b_1, b_2, \dots))^2 = \min,$$

то необходимым условием минимума $\Phi(b_0, b_1, b_2, \dots)$ является выполнение

равенств $\frac{\partial \Phi}{\partial b_0} = 0, \frac{\partial \Phi}{\partial b_1} = 0, \frac{\partial \Phi}{\partial b_2} = 0 \dots$ или

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^N 2[y_i - f(x_i, b_0, b_1, b_2, \dots)] \frac{\partial f(x_i)}{\partial b_0} &= 0 \\ \sum_{i=1}^N 2[y_i - f(x_i, b_0, b_1, b_2, \dots)] \frac{\partial f(x_i)}{\partial b_1} &= 0 \\ \vdots & \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^N y_i \frac{\partial f(x_i)}{\partial b_0} - \sum_{i=1}^N f(x_i, b_0, b_1, b_2, \dots) \frac{\partial f(x_i)}{\partial b_0} &= 0 \\ \sum_{i=1}^N y_i \frac{\partial f(x_i)}{\partial b_1} - \sum_{i=1}^N f(x_i, b_0, b_1, b_2, \dots) \frac{\partial f(x_i)}{\partial b_1} &= 0 \\ \vdots & \end{aligned} \right\}$$

Величина $\Phi \geq 0$ при любых b_0, b_1, b_2, \dots , следовательно, у нее обязательно должен существовать хотя бы один минимум. Поэтому, если система нормальных уравнений имеет единственное решение, то оно и является минимумом для величины Φ .

После того как уравнение регрессии найдено, необходимо провести статистический анализ результатов. Этот анализ состоит в следующем: проверяется значимость всех коэффициентов регрессии в сравнении с ошибкой воспроизводимости и устанавливается адекватность уравнения. Такое исследование носит название регрессионного анализа.

1.3.2. Регрессионный и корреляционный анализ уравнений

Перед проведением регрессионного анализа проверяется выполнение следующих условий: 1) измерение входного параметра x с пренебрежимо малой ошибкой; 2) результаты наблюдений над выходными величинами Y_1, Y_2, \dots, Y_N являются независимыми нормально распределенными случайными величинами; 3) однородность выборочной дисперсии $S_1^2, S_2^2, \dots, S_N^2$ при проведении эксперимента с объемом выборки N при повторении каждого опыта m раз.

Для определения однородности дисперсий вычисляется среднее из результатов параллельных опытов: $\bar{y}_i = \frac{\sum_{u=1}^m y_{iu}}{m}$, $i = 1, 2, \dots, N$. После этого

определяются выборочные дисперсии: $S_i^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (y_{iu} - \bar{y}_i)^2}{m-1}$, $i = 1, 2, \dots, N$ и

находится их сумма $\sum_{i=1}^N S_i^2$. Далее составляется отношение: $G_{\max} = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}$, где S_{\max}^2

– максимальное значение выборочной дисперсии. Дисперсии однородны в том случае, когда $G_{\max} < G_p(m-1)$, где $G_p(m-1)$ – табулированное значение критерия Кохрена при уровне значимости p . Если выборочные дисперсии

однородны, рассчитывается дисперсия воспроизводимости: $S_{\text{воспр}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N}$.

Далее по критерию Стьюдента проводится оценка значимости

коэффициентов: $t_j = \frac{|b_j|}{S_{b_j}}$, где b_j – j -ый коэффициент уравнения регрессии; S_{b_j} – среднее квадратичное отклонение j -го коэффициента.

Если t_j больше табулированного $t_p(f)$ для выбранного уровня значимости p и числа степеней свободы f , то коэффициент b_j значимо

отличается от нуля: $S_{b_j} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial b_j}{\partial y_i} \right)^2 S_i^2}$.

Если $S_1^2 = S_2^2 = \dots = S_N^2 = S_{\text{воспр}}^2$, получим: $S_{b_j} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial b_j}{\partial y_i} \right)^2 S_{\text{воспр}}^2}$.

Незначимые коэффициенты исключаются из уравнения регрессии. Оставшиеся коэффициенты пересчитываются заново, поскольку коэффициенты коррелированы друг с другом. Адекватность уравнения проверяется по

критерию Фишера: $F = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S_{\text{воспр}}^2}$, где $S_{\text{ост}}^2$ – остаточная дисперсия:

$S_{\text{ост}}^2 = \frac{m \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{N - L}$. Если значение F меньше табличного $F_p(f_1, f_2)$:

$F < F_p(f_1, f_2)$, $f_1 = N - L$, $f_2 = N(m - 1)$, то уравнение адекватно.

При отсутствии параллельных опытов и дисперсии воспроизводимости

остаточная дисперсия определяется следующим образом: $S_{\text{ост}*}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{N - L}$.

Адекватность принятого уравнения оценивается сравнением $S_{\text{ост}*}^2$ и

дисперсии относительно среднего S_y^2 : $S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{N - 1}$. по критерию Фишера

$F = \frac{S_y^2}{S_{\text{ост}*}^2}$. В этом случае критерий Фишера показывает, во сколько раз

уменьшается рассеяние относительно полученного уравнения регрессии по

сравнению с рассеянием относительно среднего. Чем больше значение F превышает табличное: $F > F_p(f_1, f_2)$, $f_1 = N - 1$, $f_2 = N - L$ для выбранного уровня значимости p и чисел степеней свободы, тем эффективнее уравнение регрессии.

1.3.3. Общий вид уравнений материально-тепловых балансов ХТС

Огромный вклад в разработку математических моделей процессов и аппаратов химической технологии вложили такие ученые как Касаткин А.Г. [57], Кафаров В.В. со своей научной школой [58, 59]. Разработке физико-химических основ дистилляции, ректификации, в том числе многокомпонентной посвящены работы [60, 61]. Среди иностранных авторов можно выделить Р. Фрэнкса [62] и П. Томаса [63]. Среди современных авторов, занимающихся в том числе компьютерным моделированием можно выделить работы [64, 65]. Рассмотрим общую концепцию построения математической модели ректификационной установки на примере теоретической ступени.

Система уравнений, описывающая процессы на тарелке, будет записана для частного случая, в соответствии с которым питание в колонну подается только в виде жидкости, а отбор промежуточных продуктов отсутствует. Описание будет представлено для универсальной i -ой тарелки с числом разделяемых компонентов, равным m (где $j \in 1..m$ – номер компонента в смеси).

Общий материальный баланс по жидкой фазе:

$$\frac{dM_{L_i}}{dt} = F_{L_{i+1}} + F_F + F_{P_{i-1}} - G_i - F_{L_i}, \quad (1.1)$$

где M_{L_i} - общая масса жидкости на тарелке; F_{L_i} - расход жидкости на нижнюю тарелку; $F_{L_{i+1}}$ - расход жидкости, стекающей с верхней тарелки; F_F - расход питания; G_i - паровой поток, выкипающий из жидкости на тарелке.

Покомпонентный материальный баланс по жидкой и паровой фазам:

$$\frac{dM_{L_{i,j}}}{dt} = F_{L_{i+1}} \cdot x_{i+1,j} + F_F \cdot x_{Fj} + F_{P_{i-1}} \cdot y_{i-1,j} - G_i \cdot y_{i,j} - F_{L_i} \cdot x_{i,j}; \quad (1.2)$$

$$\frac{dM_{P_{i,j}}}{dt} = G_i \cdot y_{i,j} - F_{V_i} \cdot y_{i,j}, \quad (1.3)$$

где $M_{L_{i,j}}, M_{P_{i,j}}$ – массы i -го компонента на тарелке в жидкой и паровой фазах; $x_{i,j}, x_{i+1,j}, x_{Fj}$ – мольная концентрация j -го компонента в жидкой фазе на соответствующих тарелках и в питании; $y_{i,j}, y_{i-1,j}$ – мольная концентрация j -го компонента в паровой фазе на соответствующих тарелках.

Объемы жидкости V_{L_i} и пара V_{P_i} на тарелке определяются по закону:

$$V_{L_i} = \sum_{j=1}^m \frac{M_{L_{i,j}}}{\rho_{i,j}}; \quad V_{P_i} = V_{O_i} - V_{L_i}, \quad (1.4)$$

где $\rho_{i,j}$ – плотность i -го компонента; V_{O_i} – общий объем тарелки.

Концентрация компонентов в жидкой фазе определяется:

$$x_{i,j} = \frac{M_{L_{i,j}}}{M_{L_i}}. \quad (1.5)$$

Для теоретической тарелки равновесие в парожидкостной смеси подчиняется закону Рауля:

$$P_{i,j} = \gamma_{i,j} \cdot K_j(T_i) \cdot x_{i,j}, \quad (1.6)$$

где $P_{i,j}$ – парциальное давление i -го компонента в паровой фазе на тарелке; $\gamma_{i,j}$ – активность компонента; $K_j(T_i)$ – выражение для кривой равновесия, давления паров чистых веществ, например, уравнение Антуана [66].

Содержание компонентов в паровой фазе подчиняется закону Дальтона:

$$y_{i,j} = \frac{P_{i,j}}{P_i}, \quad (1.7)$$

где P_i – общее давление на тарелке, определяемое из условия:

$$P_i = \sum_{j=1}^m P_{i,j}. \quad (1.8)$$

Тепловой баланс на тарелке определяется выражением:

$$\begin{aligned} \frac{dT_i}{dt} \left[M_{L_{i,j}} \frac{dE_{L_{i,j}}}{dT_i} + M_{P_{i,j}} \frac{dE_{P_{i,j}}}{dT_i} \right] = & \Phi_i + F_{L_{i+1}} \sum_{j=1}^m x_{i+1,j} (H_{L_{i+1,j}} - E_{L_{i,j}}) - \\ & - F_{L_i} \sum_{j=1}^m x_{i,j} (H_{L_{i,j}} - E_{L_{i,j}}) + F_{P_{i-1}} \sum_{j=1}^m y_{i-1,j} (H_{P_{i-1,j}} - E_{L_{i,j}}) - \\ & - F_{P_i} \sum_{j=1}^m y_{i,j} (H_{P_{i,j}} - E_{P_{i,j}}) + F_F \sum_{j=1}^m x_{Fj} (H_{Fj} - E_{L_{i,j}}) - G_i \sum_{j=1}^m y_{i,j} (H_{P_{i,j}} - E_{L_{i,j}}) \end{aligned} \quad (1.9)$$

где T_i - температура на тарелке; $E_{L_{i,j}}, E_{P_{i,j}}$ - удельная внутренняя энергия i -го компонента в жидкости и паре; $H_{L_{i,j}}, H_{P_{i,j}}, H_{Fj}$ - энтальпия j -го компонента в жидкости, паре и питании; Φ_i - поток тепла, подводимый к тарелке извне и/или теплопотери.

Гидродинамика потоков между тарелками описывается выражением:

$$\text{- для жидкости } F_{L_i} = 1.848 \cdot \frac{M_{L_i}}{V_{L_i}} \cdot l_T \cdot \left(h_T - \frac{V_{L_i}}{S_T} \right)^{1.5};$$

$$\text{- для пара } F_{P_i} = C_i \sqrt{P_i - P_{i+1} + \rho_{i,j} \cdot g \cdot \frac{V_{L_i}}{S_T}},$$

где l_T, h_T - длина и высота перелива тарелки; S_T - площадь тарелки; g - ускорение свободного падения; C_i - коэффициент сопротивления.

Величина паровых потоков определяется путем добавления к системе уравнения состояния идеальных газов Менделеева-Клайперона:

$$P_{i,j} = \frac{M_{P_{i,j}} \cdot R \cdot T_i}{V_{P_i}}$$

где R - универсальная газовая постоянная.

Далее находится решение системы уравнений (1.1)-(1.12), составленной для всех теоретических ступеней колонны, которое осложнено ее большой размерностью.

1.4. Особенности управления технологическими установками разделения углеводородов

Управление – это процесс формирования и реализации управляющих воздействий, направленных на достижение некоторой цели. Объект управления – это объект, для достижения результатов функционирования которого необходимы и допустимы специально-организованные воздействия [67]. Вопросам управления ХТП посвящены работы [68-73].

Под объектом управления (ОУ) в химической технологии понимают технологический процесс, осуществляемый в определенном аппаратном оформлении, в котором один или несколько химико-технологических параметров, характеризующих состояние процесса, поддерживаются на заданном уровне или изменяются по определенному закону. Целью управления является достижение желаемых результатов функционирования объекта.

Системой автоматического управления (САУ) называется система, представляющая собой совокупность ОУ и управляющего устройства (УУ), взаимодействие которых между собой обеспечивает процесс управления без участия человека. Различают следующие принципы управления: управление по задающему воздействию, управление по возмущающему воздействию и управление по отклонению.

Управление по отклонению осуществляется на основе информации о состоянии ОУ. Взаимодействие между ОУ и УУ осуществляется как по цепи прямой связи от УУ к ОУ, так и по цепи обратной связи – от ОУ к УУ. Информация при этом передается по замкнутому контуру (контур регулирования), поэтому управление по отклонению называют замкнутым или управлением с обратной связью [74].

Наибольшее применение в ХТ находят именно системы управления с обратной связью. Упрощенная структурная схема такой системы с обозначением основных сигналов приведена на рис. 1.5. Прямоугольниками обозначены элементы системы, стрелками входные и выходные величины (входы и выходы). Выходной величиной объекта и всей системы регулирования

является управляемая (регулируемая) величина $y(\tau)$, зависящая от управляющего воздействия $u(\tau)$ и возмущающего воздействия $d(\tau)$. Возмущающие воздействия, приложенные к системе, вызывают отличия между заданным $y_3(\tau)$ и действительными значениями $y(\tau)$ управляемой величины. Разность между заданным и действительными значениями управляемой (регулируемой) величины называют ошибкой регулирования (погрешностью регулирования): $\varepsilon(\tau) = y_3(\tau) - y(\tau)$.

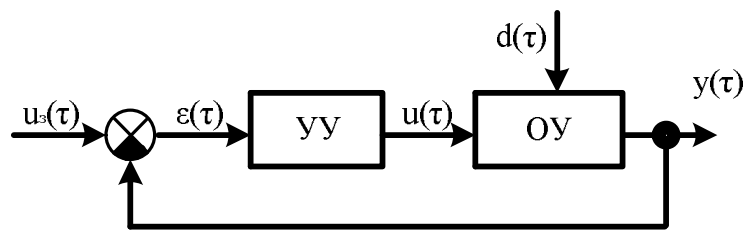


Рис. 1.5. Упрощенная структурная схема системы управления с обратной связью.

Как правило, задача регулирования непрерывных ХТП заключается в определении такого значения управляющей переменной, которая обеспечивает равновесие между всеми переменными, влияющими на регулируемую величину и поддерживает заданное значение последней. В системах с обратной связью управляющее воздействие рассчитывают в зависимости от рассогласования между действительным и заданным значениями управляемой переменной, т.е. входной величиной управляющего устройства является ошибка регулирования [75-79]. Исследование задач регулирования с обратной связью проводится в работах [80-83]. Самым распространенным законом регулирования при использовании обратной связи является ПИД-закон регулирования и его модификации [84-91]. Вопросы оптимального управления рассматриваются в работе [92]. В работе [93] приводится обзор использования в промышленности интеллектуального управления. Вопросы адаптивной стратегии интеллектуального управления процессом атмосферной перегонки сырой нефти рассматриваются в [94]. Задача оптимального управления на основе модифицированного генетического алгоритма решается в работе [95]. Модель

прогнозирования управления приводится в [96].

Процесс ректификации характеризуется рядом независимых и зависимых параметров. Независимые переменные можно разделить на внешние и внутренние. К внутренним независимым переменным относятся: состав дистиллята; состав кубового продукта; отношение количества жидкости, испаряемой в кубе, к расходу исходной смеси; отношение расходов внешнего орошения и дистиллята. Если две переменные принять за независимые, то две другие станут зависимыми. К ним относятся также составы и расходы пара и жидкости в любом сечении колонны, расходы дистиллята и кубового продукта, количества тепла, отбираемого в дефлегматоре.

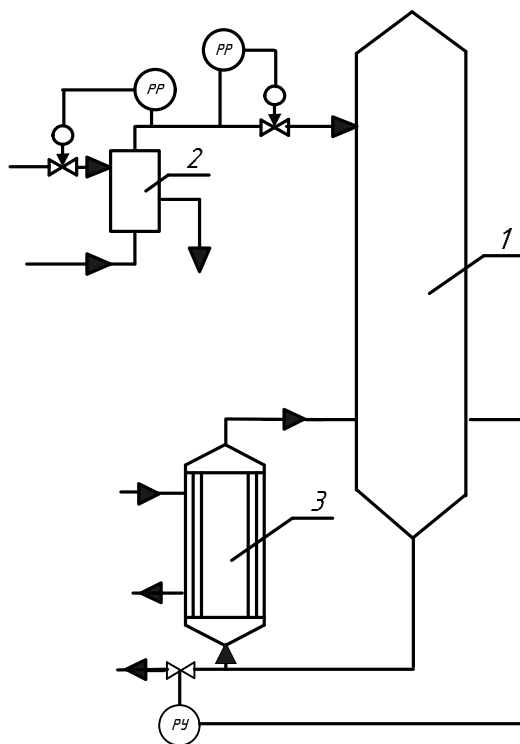


Рис. 1.6. Схема регулирования со стабилизацией питания и уровня кубовой жидкости.

1 – ректификационная колонна; 2- подогреватель исходной смеси; 3- испятильник; PP – регуляторы расхода; РУ – регуляторы уровня.

В подавляющем большинстве случаев требования к системам автоматического регулирования (САР) процесса ректификации ограничиваются стабилизацией параметров, влияющих на процесс разделения. Такие САР целесообразны при небольших возмущениях и колебаниях качества продукта.

При значительных изменениях расхода и состава исходной смеси неизбежны продолжительные отклонения от заданного состава исходных продуктов. Чем больше число стабилизированных независимых переменных, тем проще осуществить устойчивое регулирование ректификационной колонны. Однако стабилизировать все независимые переменные невозможно. Практически трудно стабилизировать состав исходной смеси. Кроме того необходимо стабилизировать температуру питания.

Питание должно поступать в ректификационную колонну с постоянной скоростью. Регулирование расхода питания можно рассматривать как стабилизацию параметров независимо от процессов, протекающих в ректификационной колонне. Одна из возможных схем стабилизации расхода питания представлена на рис. 1.6. [23]

1.4.1. Управление процессом пуска и останова в ручном режиме.

Достоинства и недостатки

Работу ХТС можно разделить на несколько этапов: пусковые операции, нормальная эксплуатация, штатный плановый останов ХТС и нештатный аварийный останов. Современные высокотехнологичные системы управления технологическими процессами очень сильно упрощают процесс управления ХТС, улучшают качество и скорость управления, являются высоконадежными и при необходимости резервируемыми системами. При этом вся работа данных систем управления направлена только на режим нормального функционирования ХТС. Системой противоаварийной защиты реализуются функции слежения и минимизации негативных факторов при возникновении аварийных ситуаций.

Складывается ситуация, когда на самых сложных этапах работы ХТС, к которым относятся операции пуска и останова, выполнение абсолютно всех функций управления и контроля целиком ложится на человека. В данных режимах работы даже система ПАЗ, как правило, отключена.

Рассмотрим сложности, возникающие в процессе пусковых операций, выполняемых технологическим персоналом:

1) В пусковых операциях участвуют специалисты различных областей: технологического профиля: аппаратчики, машинисты, технологи, начальники смен; специалисты по работе с системами контроля и управления: слесари и мастера КИП, сектор АСУТП; механики; электрики; руководство цеха и завода.

Весь персонал должен работать как единый механизм, а учитывая количество занятых людей и совершенно различную специфику работы, добиться этого чрезвычайно сложно.

2) Длительность проведения пусковых операций. На рассматриваемом типовом технологическом узле разделения углеводородов срок вывода объекта на режим составляет 3-4 суток. На более сложных объектах данный период может увеличиваться до 1 недели и более. Стоит оговориться, что данные сроки включают полную нормализацию работы оборудования с достижением всех количественных и качественных показателей. Тогда как достижение количественных показателей без нормализации режима работы может происходить вдвое быстрее.

3) Ручной характер выполнения практически всех пусковых операций. Вполне естественно, что аппаратчикам и машинистам по месту приходится открывать/закрывать ручные арматуры, электрикам собирать электрические схемы и т.д. Ситуация усложняется тем, что все автоматизированные элементы, как правило, работают в ручном режиме. Это касается контуров регулирования, которые переводятся в автоматический режим работы только после вывода отдельного аппарата, участка, узла или цеха на режим.

Таким образом, технологам-операторам приходится постоянно отслеживать, контролировать и регулировать десятки параметров. Отсутствие опыта проведения таких сложных технологических операций, выполняемых один раз в 1-2 года также является негативным фактором существующей системы проведения пусковых операций.

Недостатком существующей схемы пуска является то, что управляющие параметры, к которым относятся степень открытия регулирующих органов,

изменяются ступенчато, скачкообразно в короткие промежутки времени. Это влечет за собой неконтролируемое изменение связанных параметров, которые приходится «ловить» и стабилизировать.

Данные факторы приводят к увеличенным временным интервалам вывода объектов на режим, увеличению нагрузки на технологическое оборудование, получение большого количества некондиционной продукции.

Самым распространенным способом уменьшения влияния негативных факторов является обучение промышленного персонала, в частности с использованием компьютерных тренажерных комплексов.

Для комплексного решения данной проблемы предлагается разработка автоматизированной системы управления пуском технологической установки.

1.4.2. Технологический регламент установки дебутанизации углеводородов

Установка дебутанизации углеводородов является частью производства «Этилен-600» ПАО «Нижнекамскнефтехим» и располагается в цехе по производству этилена, пропилена и соответствующих продуктов из пирогаза, поступающего из цеха пиролиза и фракционирования. В состав цеха входят следующие технологические установки: компрессорная установка; установка низкотемпературного газоразделения; установка высокотемпературного газоразделения.

Таблица 1.1 – Характеристика сырья

Массовая доля компонентов, %	Марка	Критические параметры		
	В	T_B, K	T_C, K	$P_C, атм$
пропан, не более	1.0	231.06	369.85	40.247
изобутан, не более	3.0	261.3	408.1	36
сумма бутиленов, не более	2.0	309.18	475	36.1
нормальный бутан, не менее	89.0	272.7	425.2	37.5
сумма изо- и нормального пентана и выше, не более	5.0	309.2	469.6	33.3

Узел предназначен для разделения широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ), поступающей со склада, на пропан-бутановую фракцию (фракция C_3-C_4) и нестабильную бензиновую фракцию, методом ректификации в колонне тарельчатого типа поз. Е-DA-105. Характеристика сырья представлена в табл. 1.1.

ШФЛУ поступает в узел дебутанизации из емкостей поз. Е-29, Е-30 промсклада СЖГ завода Этилена с давлением 16.0 – 22.0 кгс/см², создаваемого насосами поз. Н-1, 2, 3. Подача сырья на разделение производится через регулирующий клапан поз. FCV3, поддерживающий расход ШФЛУ (диафрагма поз. FIC-3). Расход ШФЛУ корректируется расходом фракции С₃-С₄ (диафрагма поз. FIC-5), поступающей на пиролиз.

Перед поступлением в колонну поз. Е-DA-105, ШФЛУ подогревается до температуры 83 °С и частично испаряется в подогревателе поз. Е-ЕА-132 за счет тепла закалочной воды. Закалочная вода в теплообменник поз. Е-ЕА-132 поступает из секции водной промывки трубопровода нагнетания насоса поз. Е-ГА-105 с температурой порядка 95 °С и возвращается с температурой порядка 75 °С. Температура нагрева углеводородов (поз. TIC-2) поддерживается постоянной регулирующим клапаном поз. TCV2, установленным на выводе закалочной воды из теплообменника поз. Е-ЕА-132.

Из теплообменника поз. Е-ЕА-132 подогретая ШФЛУ поступает в колонну поз. Е-DA-105 на 17 тарелку. Всего в колонне предусмотрено 39 клапанных прямоточных тарелок. Процесс разделения в колонне поз. Е-DA-105 происходит при давлении 8.0...10.0 кгс/см² в кубовой части колонны, температуре верха колонны 82 °С и температуре куба не более 120 °С.

Подвод тепла в колонну осуществляется выносным кипятильником поз. Е-ЕА-131. В качестве теплоносителя в межтрубном пространстве кипятильника используется пар низкого давления. Расход пара (диафрагма поз. FIC-2) регулируется клапаном поз. FCV2, установленным на трубопроводе подачи пара в кипятильник поз. Е-ЕА-131. Подача пара в кипятильник корректируется величиной давления в кубовой части колонны, замеряемого прибором поз. PICA-1. В пусковой период или при резком уменьшении потребления фракции С₃-С₄ печами пиролиза и повышении давления до максимально допустимого, давление в системе регулируется клапаном поз. PCV1, установленным на трубопроводе сброса газообразной фракции С₃-С₄ из флегмовой емкости поз. Е-

FA-130 в систему влажного факела. При этом происходит открытие отсечного клапана поз. PSV16.

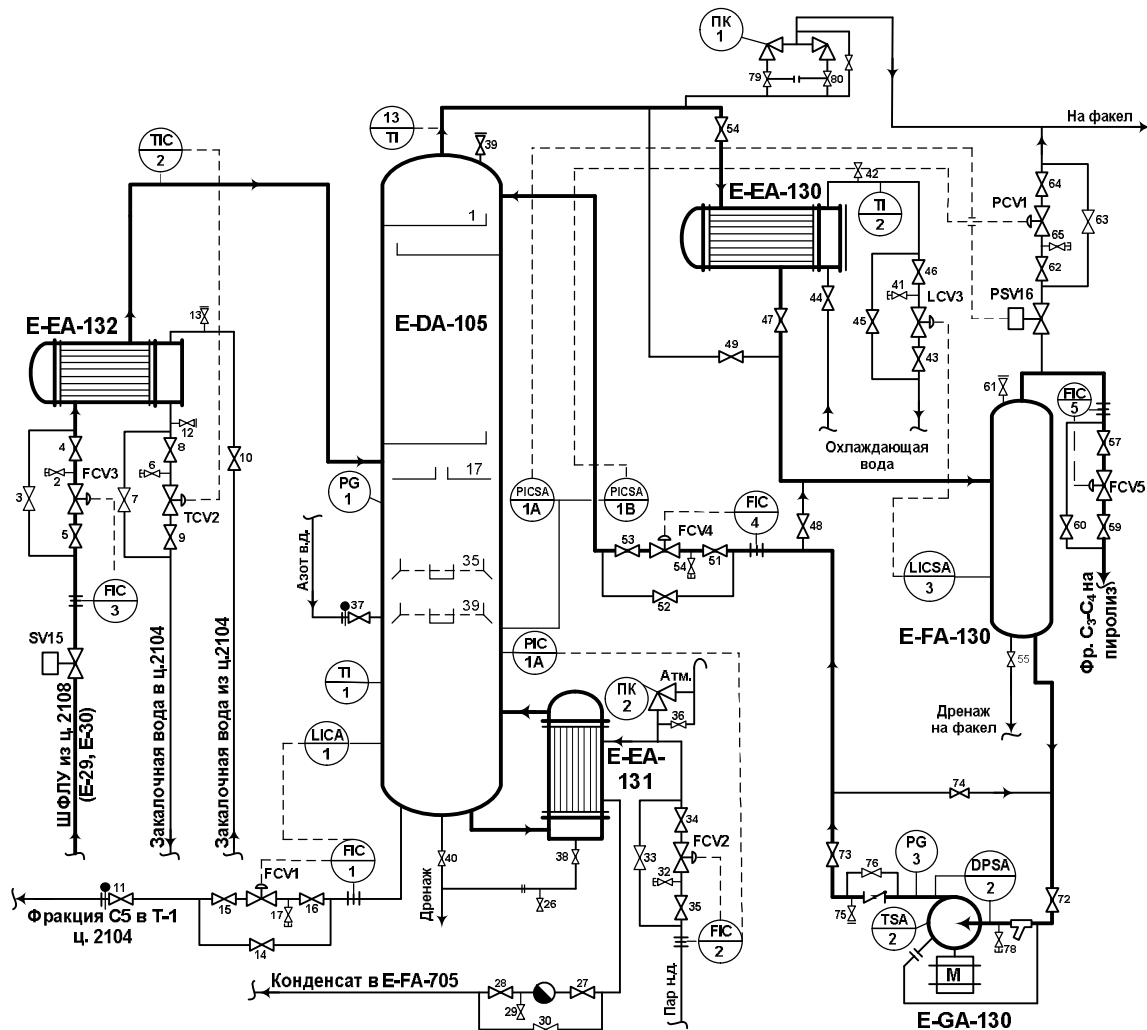


Рис. 1.7. Технологическая схема установки дебутизации углеводородов.

Конденсат водяного пара из кипятильника поз. E-EA-131 через конденсатоотводчики отводится в сборник конденсата поз. E-FA-705. Расход кубового продукта (диафрагма поз. FIC-1) колонны поз. E-DA-105 регулируется клапаном поз. FIC1.

Выходящие сверху колонны поз. E-DA-105 пары фракции C₃-C₄ поступают в водяной конденсатор - холодильник (дефлегматор) поз. E-EA-130, где производится их охлаждение. Часть потока, необходимая для орошения колонны поз. E-DA-105 конденсируется. Далее парожидкостная смесь направляется во флегмовую емкость поз. E-FA-130, где производится ее

разделение на газовую и жидкостную часть. По мере накопления жидкости во флегмовой емкости включается в работу насос поз. E-GA-130.

Жидкость из флегмовой емкости поз. E-FA-130 насосом поз. E-GA-130 подается на орошение в колонну поз. E-DA-105. Расход флегмы на орошение (диафрагма поз. FIC-4) поддерживается регулирующим клапаном поз. FCV4. Уровень в емкости поз. E-FA-130 регулируется подачей охлаждающей воды через холодильник поз. E-EA-130. Регулирующий клапан поз. LCV3 установлен на трубопроводе выхода оборотной воды из дефлегматора поз. E-EA-130. При достижении минимального уровня в емкости поз. E-FA-130 по прибору поз. LICSA-3 насос поз. E-GA-130 останавливается.

Газообразная фракция C_3-C_4 из флегмовой емкости поз. E-FA-130 поступает на газовые печи пиролиза поз. E-BA-110...112. Ее расход (диафрагма поз. FIC-5) регулируется клапаном поз. FCV5.

1.4.3. Основные этапы пуска установки дебутанизации углеводородов

Пуск установки дебутанизации углеводородов согласно технологическому регламенту состоит из перечня действий:

1). Произвести продувку узла дебутанизации азотом от кислорода (до содержания кислорода в отходящем азоте н. б. 0.5 %) .

2). Принять оборотную воду в дефлегматор поз. E-EA-130, стравить воздух через воздушник аппарата.

3). По согласованию с цехом №2104 принять закалочную воду в подогреватель ШФЛУ поз. E-EA-132.

4). По согласованию с цехом №2104 принять пар низкого давления в кипятильник поз. E-EA-131.

5). По согласованию с цехом №2108 принять сырье-ШФЛУ в колонну поз. E-DA-105, по мере набора давления до 8.0 – 9.0 кгс/см³ воздействуя на регулирующий клапан поз. LCV3 начать частичную конденсацию верхнего продукта колонны, излишки фракции C_3-C_4 сбрасывать на факел через регулирующий клапан поз. PCV1.

6). По мере набора уровня в кубовой части колонны по прибору поз. LICSA-1, воздействуя на регулирующий клапан поз. FCV2, подать пар низкого давления в кипятильник поз. E-EA-131 и вести разогрев куба (температура контрольной тарелки в пределах 77 - 87 °С).

7). При появлении уровня во флегмовой емкости поз. E-FA-130 (контроль по прибору поз. LICSA-3) включить в работу насос поз. E-GA-130 и подать флегму на орошение.

8). По согласованию с цехом №2104 подать фракцию C₃-C₄ на газовые печи пиролиза; по мере увеличения расхода ШФЛУ на печи пиролиза клапан поз. PCV1 полностью закрывается.

9). Стабилизировать режим по узлу дебутанизации углеводородов с учетом лабораторных анализов.

На основе практического опыта пуска установки перевод ее в состояние нормального функционирования можно разделить на два этапа.

Первый этап пуска определяется временем набора давления в колонне до 9 кгс/см² за счет подачи питания и оставляет около 18 часов. На данном этапе происходит частичное заполнение куба колонны и флегмовой емкости.

Второй этап пуска определяется временем вывода установки в режим нормального функционирования путем достижения производительности установки в 50 т/ч. На данном этапе начинается подача греющего пара в кипятильник и подача флегмы на орошение. Далее начинается постепенное повышение расхода питания и отбор дистиллята. Этот период времени составляет около 52 часов и начинается по окончании первого этапа.

1.4.4. Экспериментальное исследование процесса пуска установки дебутанизации углеводородов

При пуске узла в ручном режиме регуляторы, установленные на технологических линиях, находятся в ручном режиме управления. Операции пуска осуществляются путем открытия/закрытия) ручных арматур и изменения степеней открытия регулирующих органов с пультов операторов.

Экспериментальные значения параметров через определенные промежутки времени в виде показаний приборов регистрируются в режимных листах (рис. 1.8-1.14), (Приложение 1).

Первым этапом пуска является прием питания в колонну поз. E-DA-105 и набор давления в ней. Для этого в 0 часов регулятором FIC3 в ручном режиме на 10% открывается регулирующий клапан FCV3 на линии подачи ШФЛУ (рис. 1.8). За 15 минут до этого на такую же величину регулятором TIC2 в ручном режиме открывается регулирующий клапан TCV2 на линии подачи закалочной воды в подогреватель. Таким образом, ШФЛУ поступает в уже нагретое трубное пространство подогревателя. При этом начинается рост температуры ШФЛУ на выходе из подогревателя до 75 °С (рис. 1.9) и рост давления в колонне до 2 кгс/см² (рис. 1.10).

В 2 часа регулятором LICSA3 в ручном режиме на 100% открывается регулирующий клапан LCV3, установленный на линии подачи оборотной воды в конденсатор. При этом начинается частичная конденсация паров, выходящих из верха колонны. Уровень во флегмовой емкости поз. E-FA-130 увеличивается до 100% (рис. 1.11). В 3 часа включается насос поз. E-GA-130. При этом регулятором FIC4 в ручном режиме на 30% открывается регулирующий клапан FCV4, установленный на линии подачи флегмы в колонну. Начинается подача флегмы в колонну, уровень во флегмовой емкости снижается (рис. 1.11).

Для сдерживания роста давления в аппарате (рис. 1.10) к 5 часам прекращается прием ШФЛУ. Для этого регулятором FIC3 в ручном режиме закрывается регулирующий клапан FCV3. Температура на выходе ШФЛУ из подогревателя снижается до 30 °С (рис. 1.9). После прекращения подачи пара и ШФЛУ давление снижается до 6 кгс/см² (рис. 1.10).

В 7 часов регулятором FIC3 в ручном режиме на 10% открывается регулирующий клапан FCV3. Прием ШФЛУ продолжается в течение 2 часов. За это время давление в колонне поз. E-DA-105 вырастает до 8 кгс/см² (рис. 1.10). При этом уровень в кубе колонны набирается до 45% (рис. 1.12).

Далее в несколько этапов происходит увеличение приема ШФЛУ, подачи пара низкого давления в кипятильник, отбора фракции C_3-C_4 на пиролиз и отбора кубового остатка.

В 17 часов возобновляется прием ШФЛУ в колонну поз. E-DA-105. За 2 часа расход увеличивается до 30-35 т/ч (рис. 1.8). В кипятильник поз. E-EA-131 подается пар низкого давления (рис. 1.13).

Параллельно с подачей ШФЛУ начинается отбор фракции C_3-C_4 на печи пиролиза в объеме 70% от подаваемой ШФЛУ (рис. 1.14). Остальной продукт заполняет аппараты и отбирается из куба.

Далее к 29 часам прием ШФЛУ увеличивается до 40 т/ч (рис. 1.8). Отбор фракции C_3-C_4 увеличивается до 33 т/ч (рис. 1.14), кубового продукта до 7 т/ч.

К 39 часам подача ШФЛУ увеличивается до 55 т/ч (рис. 1.8), отбор фракции C_3-C_4 увеличивается до 50 т/ч (рис. 1.14), отбор кубового продукта снижается до 5 т/ч.

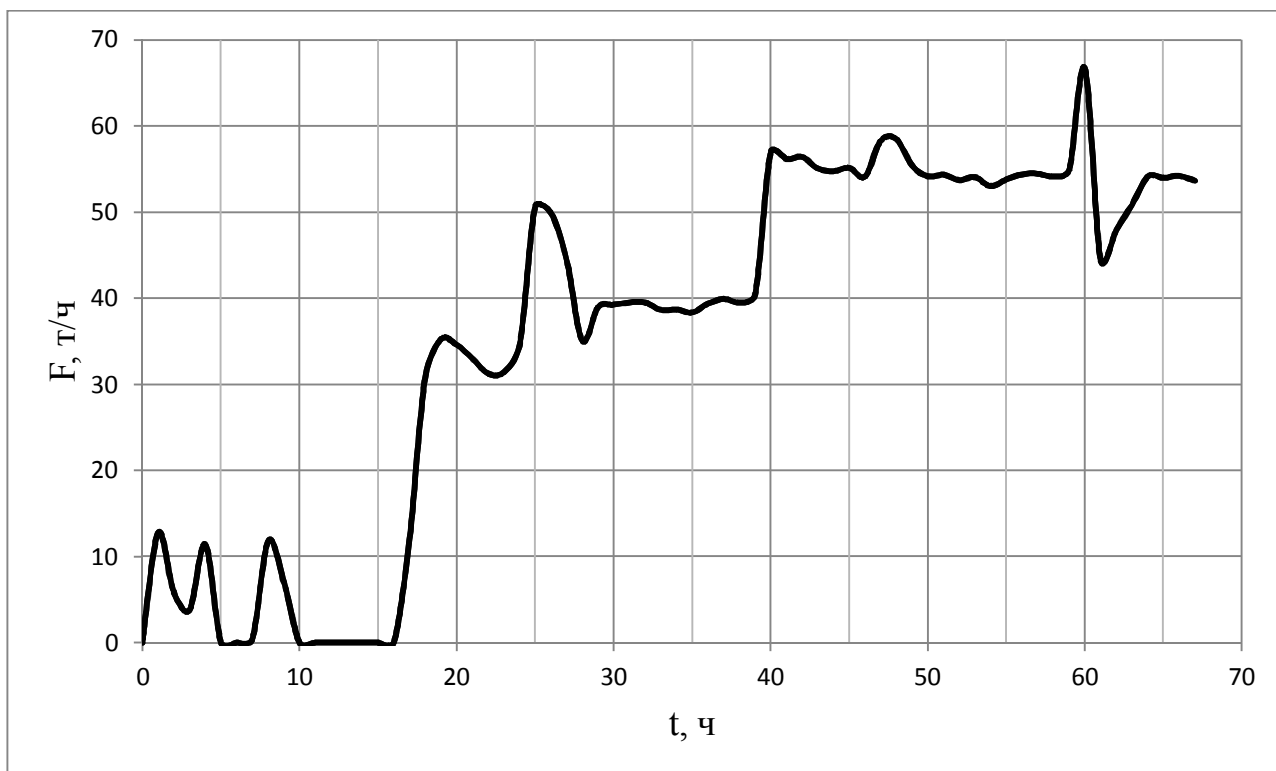


Рис. 1.8. Зависимость расхода питания в колонну E-DA-105 от времени в период пуска.

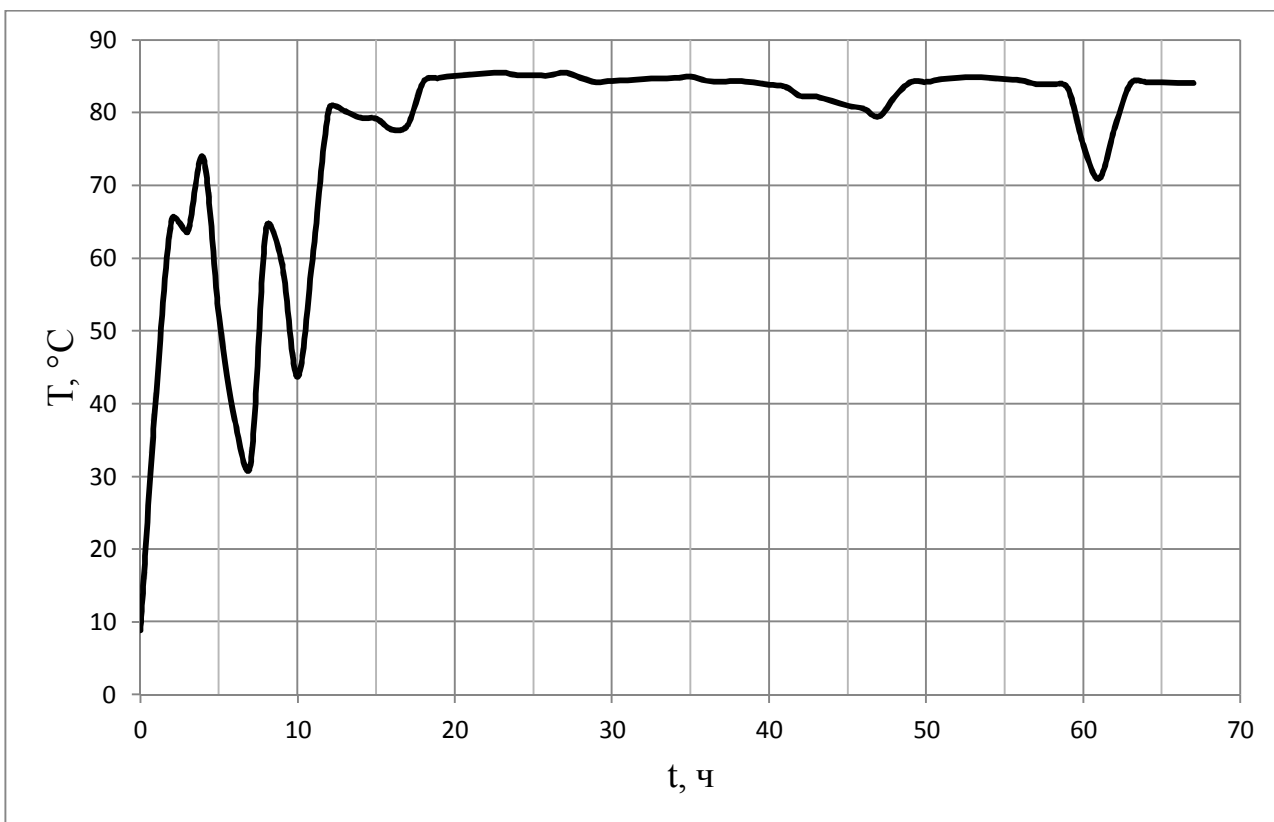


Рис. 1.9. Зависимость температуры питания после теплообменника E-EA-132 от времени в период пуска.

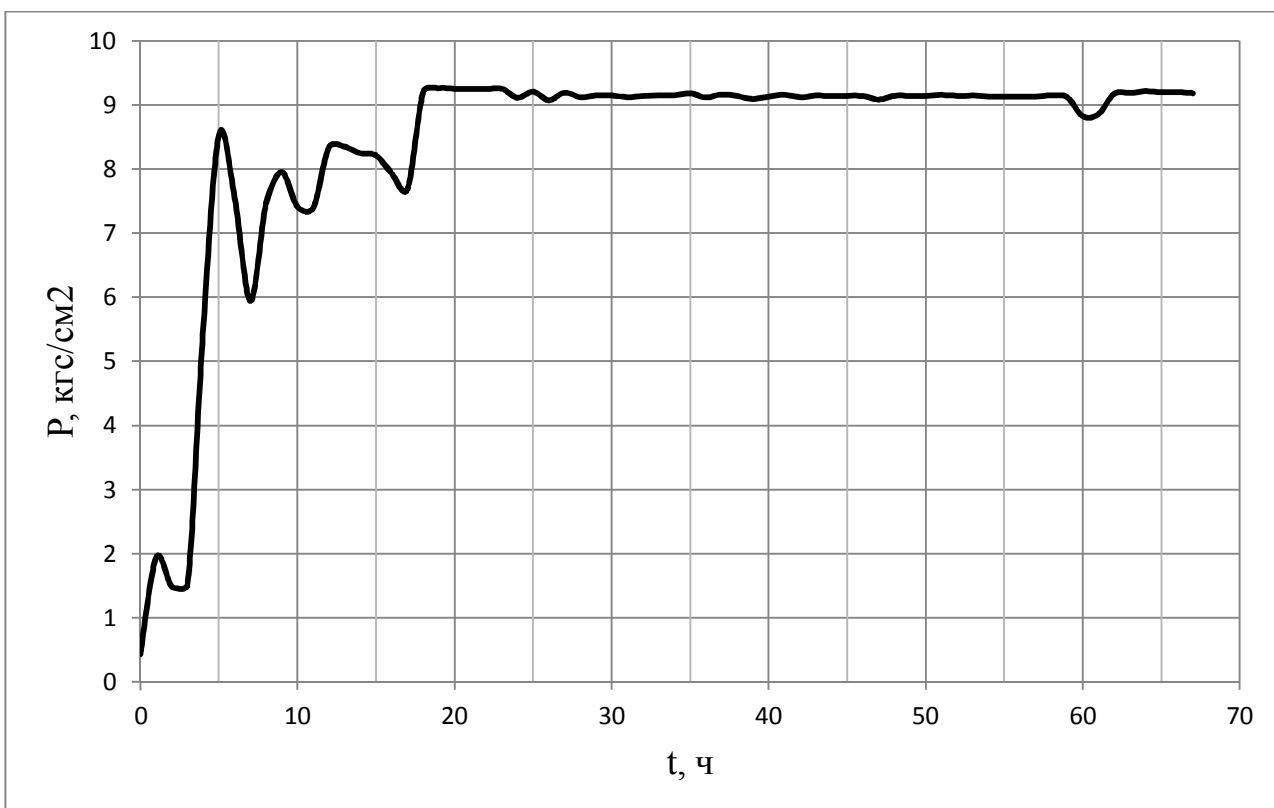


Рис. 1.10. Зависимость давления в колонне E-DA-105 от времени в период пуска.

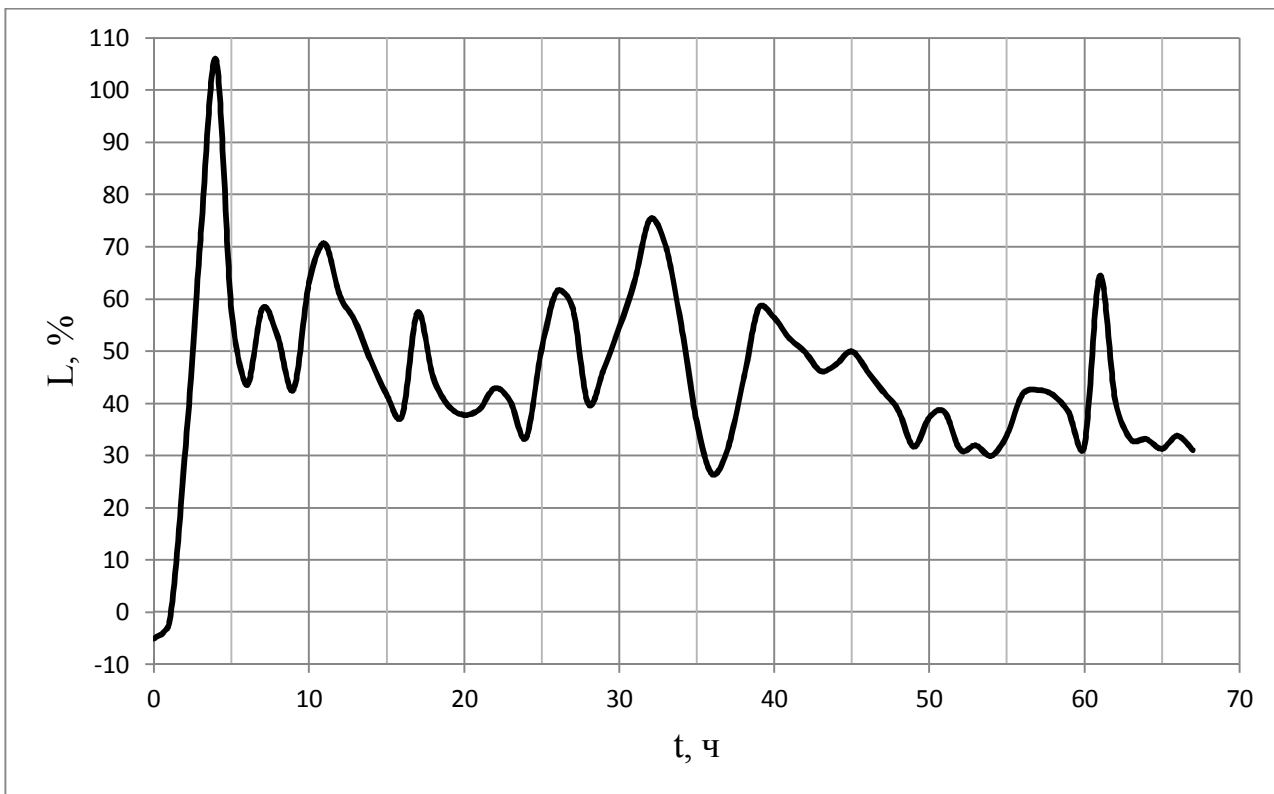


Рис. 1.11. Зависимость уровня во флегмовой ёмкости E-FA-130 от времени в период пуска.

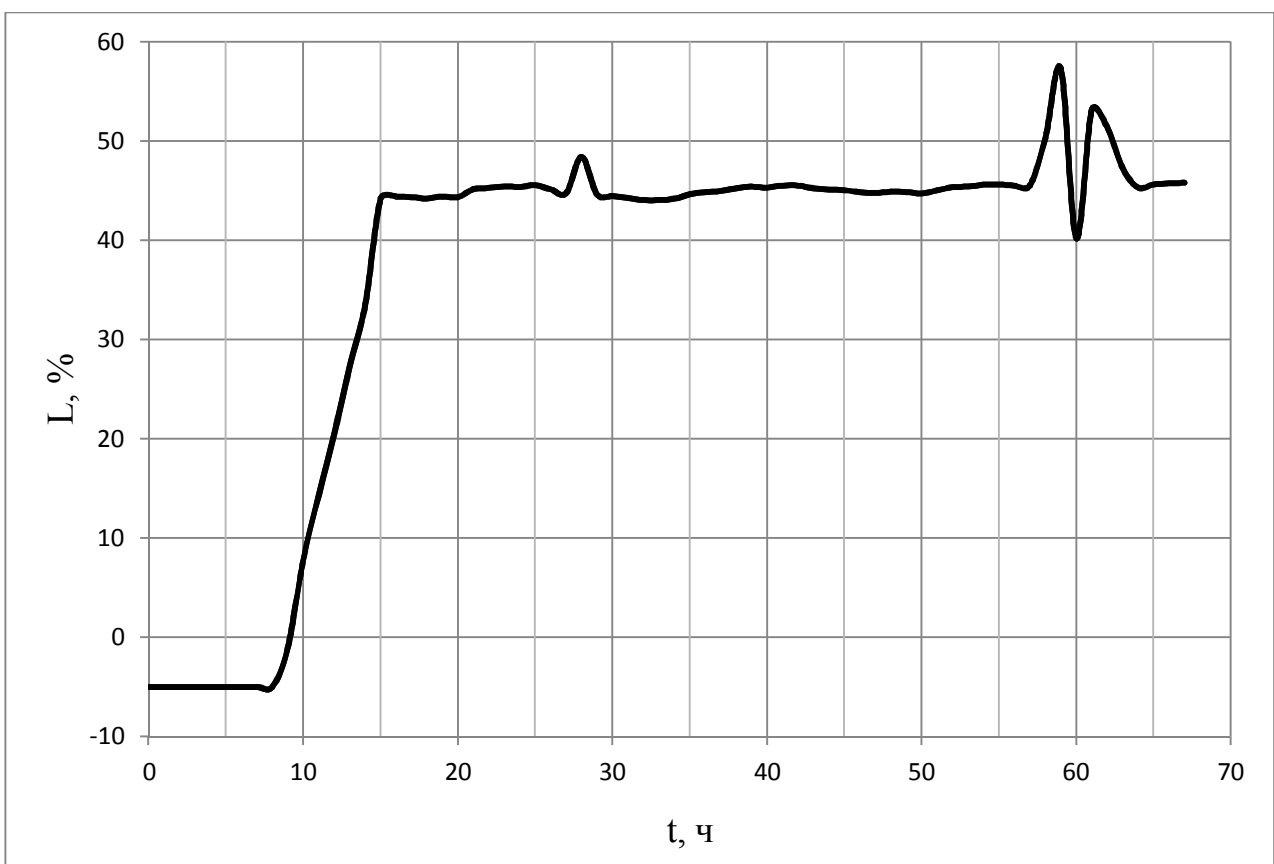


Рис. 1.12. Зависимость уровня куба колонны E-DA-105 от времени в период пуска.

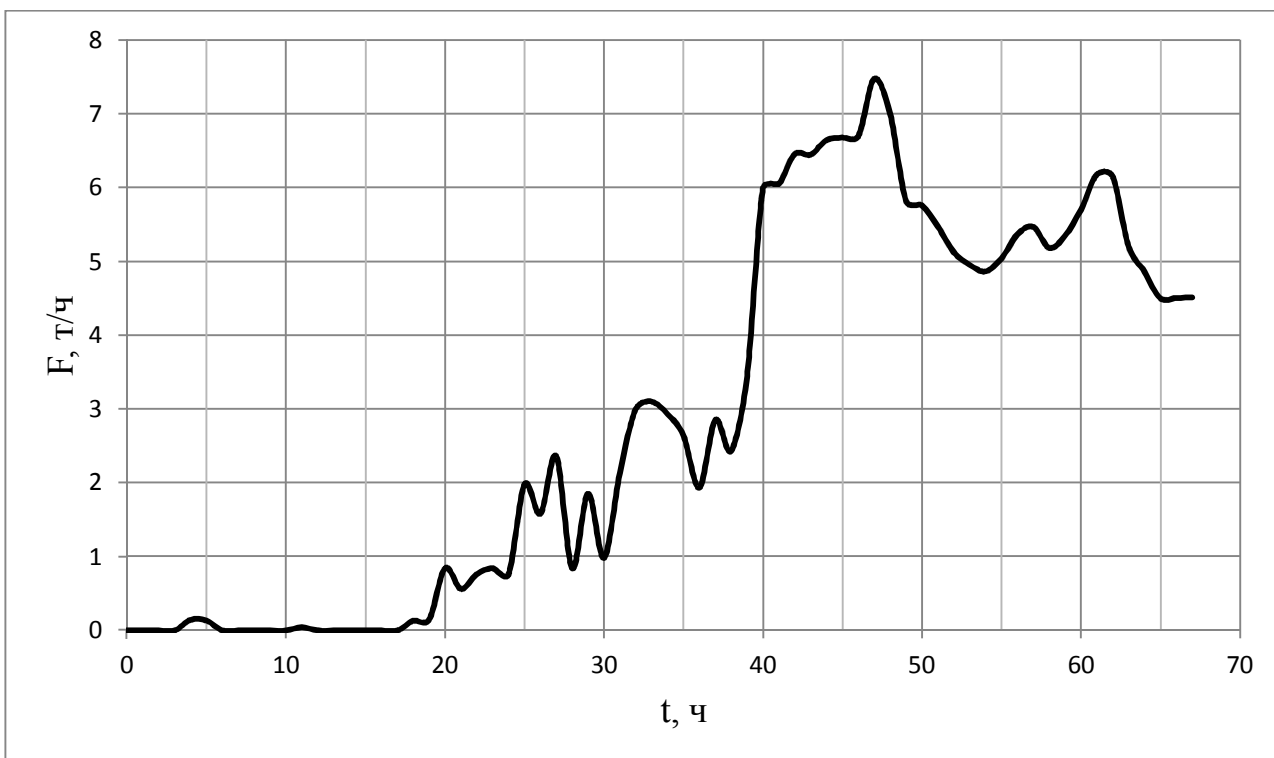


Рис. 1.13. Зависимость расхода греющего пара в кипятильник E-EA-131 от времени в период пуска.

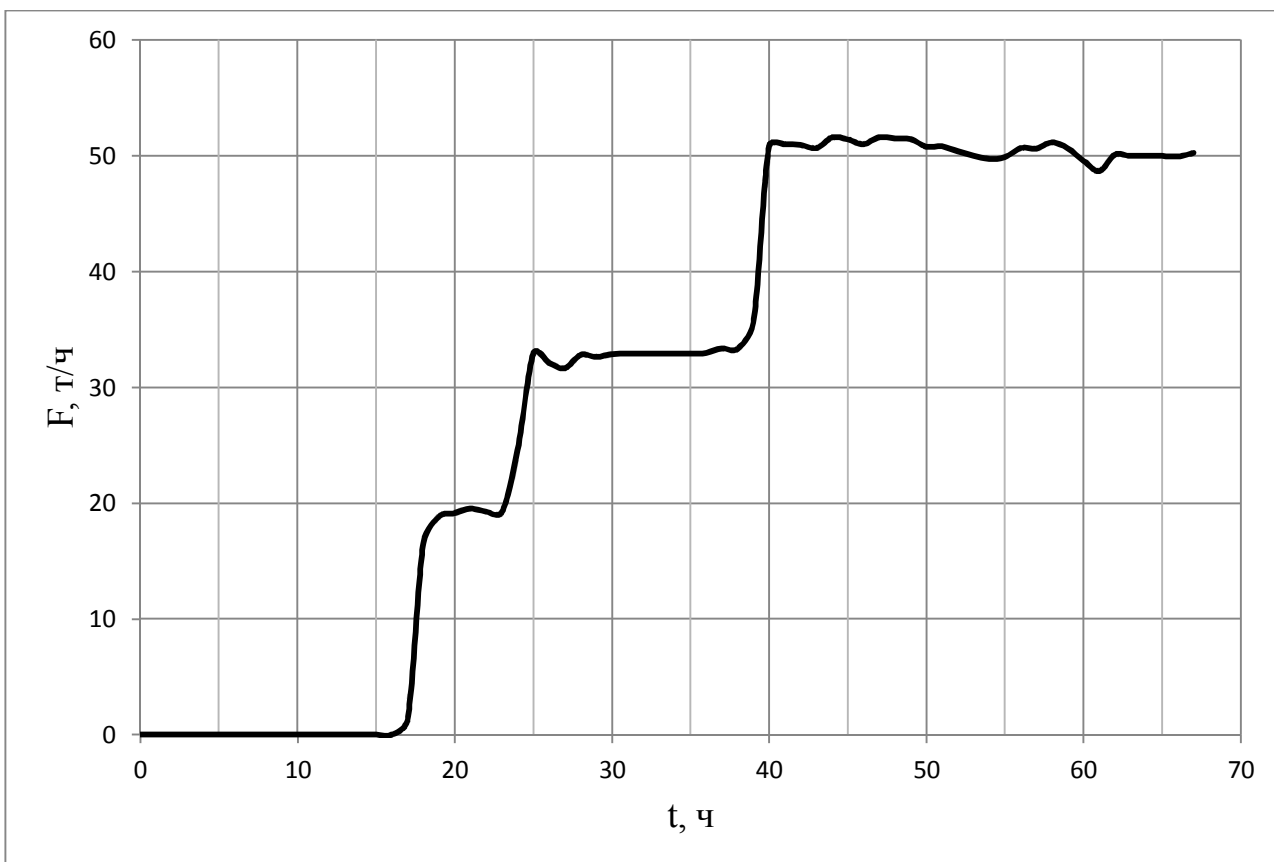


Рис. 1.14. Зависимость расхода фракции C₃-C₄ на печи пиролиза от времени в период пуска.

После вывода объекта на режим все регуляторы переводятся в автоматический режим работы. Таким образом, процесс пуска протекает в течение 67 часов.

Анализ приведенных результатов показывает, что в результате пуска в ручном режиме не удастся обеспечить равномерный, «спокойный» режим пуска, не допуская скачков параметров, что приводит к необоснованным затратам энергии и сырья, а также создает возможность возникновения предаварийных и аварийных ситуаций.

1.5. Моделирование системы программного управления в АСУТП и тренажерных комплексах

1.5.1. Текущее состояние отрасли тренажеростроения и существующие подходы к разработке тренажерных комплексов

Несмотря на активное развитие автоматизированных систем управления и противоаварийной защиты технологических процессов [97], уровень аварийности действующих производственных предприятий остается высоким [98] и обусловлен, прежде всего, наличием «человеческого фактора» [99-102]. При этом доля потерь НПЗ от ошибок оперативного персонала достигает 50-70% [103]. В связи с постоянным наращиванием производственных мощностей повышается риск возникновения аварий, и поэтому актуальным является разработка новейших систем обучения персонала предприятий навыкам безаварийной эксплуатации технологического оборудования. Кроме того, необходимость создания компьютерных тренажеров (КТ) регламентирована «Общими правилами взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств п.2.11», утвержденными приказом Ростехнадзора от 11.03.2013 №96 [104-105].

Согласно п.2.11: «Для приобретения практических навыков безопасного выполнения работ, предупреждения аварий и ликвидации их последствий на технологических объектах с блоками I и II категорий взрывоопасности все рабочие и инженерно-технические работники, непосредственно занятые

ведением технологического процесса и эксплуатацией оборудования на этих объектах, проходят курс подготовки с использованием современных технических средств обучения и отработки навыков (компьютерные тренажеры, учебно-тренировочные полигоны)».

Обучение операторов с помощью КТ оказывает долгосрочный положительный эффект на работу предприятий [106]. КТ находят применение в самых разных областях: обучение специалистов трубопроводного транспорта нефти [107], операторов станций биохимической очистки [108], персонала предприятий по производству стекла [109], персонала энергопредприятий [110], АЭС [111], в химической промышленности [112], металлообработке [113], образовании [114] и других областях [115-116].

Широчайшее применение КТ находят в нефтехимической и нефтеперерабатывающей отраслях [117-120]. При этом большая часть реализуемых тренажерных комплексов базируется на иностранных разработках. Лидерами тренажеростроения являются компании Honeywell с пакетом продуктов UniSim и компания Yokogawa с продуктом Omegaland. Для успешного развития на российском рынке иностранные производители поглощают отечественных разработчиков, включая интеллектуальную собственность и специалистов. Примером служит поглощение фирмы Петроком с интеллектуальной собственностью - платформой для разработки компьютерных тренажеров КТК-М. Вместе с этим в зарубежную корпорацию перешел один основоположников разработки КТ в нашей стране - В.М. Дозорцев. В его работах, в частности, описываются дедуктивные модели процесса, основанные на фундаментальных принципах устройства и функционирования технологических объектов. [121-126]. Аналогичным образом была приобретена интеллектуальная собственность компании Aspen (Hyprotech) – пакет HYSYS, исходный код которого лежит в основе продукта UniSim.

В данной области существует множество отечественных разработчиков. Коллективом в составе Бикмурзина А.Р., Тукманова Д.Г., Хоменко А.А.

получены собственные математические модели ХТС, используемые в тренажерном комплексе. Здесь не обозначены задачи обучения, отсутствуют типовые сценарии, тесты, критерии успешного пуска/останова ХТС, не реализованы функции инструктора обучения.

В работах Колмогорова А.Г. [127-129] рассматриваются вопросы определения места КТ в структуре АСУ, приводится алгоритм синтеза тренажерной модели, математическая модель которого состоит из универсальных преобразователей универсальных потоков (ПИП), с помощью которых моделируются все процессы и аппараты химической технологии. Функционирование ПИП основано на заложенных физико-химических зависимостях. На основе математических моделей, разработанных другими авторами, построена математическая модель процесса ректификации на базе ПИП. Разработан КТ по обучению операторов технологической установки ректификации в производстве этилена. При этом представленные расчеты проводятся в средах Delphi и Matlab, а не в среде разработки КТ, что ставит под сомнение их достоверность. Также отсутствуют методы обучения операторов и функции инструктора обучения.

Ряд авторов использует динамические и имитационные модели, закладываемые в КТ для разработки систем усовершенствованного управления [130-134]. В работе [135] описывается интеллектуальная система обучения персонала, в основу которой положена модифицированная сеть Петри. Создание и проектирование инструмента по разработке КТ является актуальной проблемой, решение которой ищут как крупнейшие научно-исследовательские центры, компании по разработке и производству средств управления и автоматизации, так и множество мелких фирм-разработчиков. Ряд компаний, например НПФ «Круг», специализируется на тренажерах для обучения персонала по ПЛАС.

Компьютерные тренажеры можно классифицировать по нескольким признакам: 1) производитель КТ, 2) класс КТ, 3) типы используемых моделей.

1) На рынке КТ сложилась ситуация, когда часть продуктов производится разработчиками систем управления: OmegaLand от Yokogawa, UniSim от HoneyWell. Такие комплексы имеют максимальную интеграцию к существующим распределенным системам управления (PCU) и SCADA системам. Разработка таких систем является наилучшим решением, представленным среди производителей тренажеров. Они позволяют обучаться работе с системами управления в условиях, полностью идентичных реальным, поскольку в обучении задействованы средства управления и визуализации, алгоритмы управления, контроллеры и программное обеспечение, а также рабочие места, оформленные в точности с таковыми на объекте управления. Кроме этого, в таких системах разработчикам известна работа всех внутренних алгоритмов системы, имеется полный доступ к имеющимся функциям PCU. Все это позволяет решить множество проблем, присущих сторонним разработчикам компьютерных тренажеров.

Данные компьютерные тренажеры являются более универсальными и в определенных случаях их недостатки превращаются в достоинства. Эти комплексы разрабатываются сторонними разработчиками и в большинстве случаев не зависят от существующей системы управления. При желании заказчика в таком комплексе меняется лишь пользовательский интерфейс, что позволяет приблизить среду обучения к существующей системе управления. Логика работы данного комплекса, создаваемые математические модели, принципы обучения также не зависят от существующей системы управления, а лишь имитируют ее работу. В таком случае появляется возможность создания тренажерных систем на производствах, эксплуатирующих системы управления различных производителей. Подобные комплексы являются более универсальными и с успехом используются даже там, где не существует современной системы управления, т.е. используется система управления на релейной логике либо на пневматических устройствах.

2) По следующей классификации различают КТ высокого и низкого уровня, hi-end и lo-end соответственно. КТ данных классов очень сильно

отличаются как по степени проработки, так и по решаемым задачам. Ключевым фактором при выборе класса КТ является стоимость тренажерного комплекса, которая для разных классов может отличаться на порядок.

При этом тренажеры, разрабатываемые производителями систем управления, как правило, относятся к hi-end классу. Также существуют успешные попытки разработки универсальных КТ hi-end класса [136-137].

Разработчики тренажеров lo-end класса находятся на противоположном полюсе. К ним относятся небольшие организации, институты и отделы самих предприятий. Такие разработчики самостоятельно создают инструменты для разработки КТ, что позволяет значительно снизить стоимость продукта [138]. При этом тренажеры данного класса решают более узкие задачи, поставленные заказчиком и позволяют подстроить систему под его требования. Данные комплексы как правило универсальны и дают возможность реализации нескольких проектов на крупном предприятии одним исполнителем.

3) Третий признак касается типа используемых математических моделей [139]: регрессионные зависимости и модели на основе уравнений баланса. При этом модели разрабатываются на основе описания протекающих в аппаратах физико-химических процессов уравнениями переноса массы, тепла и т.д. Такой подход использован в работах [140-141].

Ведущие мировые разработчики при разработке моделей часто применяют экспериментально-статистические методы. Это позволяет добиться максимальной адекватности разрабатываемых моделей реальным объектам. В идеальном случае тренажерный комплекс составляет единое целое с системой управления, а подстройка моделей происходит непрерывно при любых изменениях режимов работы аппаратов. Недостатком такого подхода является как длительность разработки комплексов, так и использование программного обеспечения производителей РСУ для получения доступа к режимным параметрам. При интеграции РСУ и компьютерного тренажера необходимо присутствие специалиста по работе с тренажерным комплексом непосредственно на предприятии.

При отсутствии открытых протоколов для выгрузки информации, либо при отсутствии РСУ необходимо вручную обрабатывать огромный объем информации за период работы предприятия от полугода до года. При этом данный интервал в обязательном порядке должен включать процедуры пуска и останова аппаратов, что в штатном режиме происходит раз в 1-2 года. Стоит отметить, что такая модель действует адекватно только в тех режимах, в которых она обучалась. При изменении режимов работы аппаратов тренажерный комплекс приходит в негодность и требуется его доработка.

Некоторые производители заявляют о возможности, например, пуска ХТС в любой последовательности, т.е. не опираясь на регламент. В таком случае необходимо привести объект из начального состояния в конечное. При этом для каждого параметра устанавливаются допустимые границы изменения параметра, при выходе за которые формируется ошибка. Стоит учитывать, что в различные периоды пуска допустимые границы будут постоянно меняться. Реализация такого подхода выглядит затруднительной. В данном случае, во-первых, многократно усложняется закладываемая математическая модель и ставится вопрос о возможности ее реализации и использования в режиме реального времени. Вполне очевидно, что реализация всех возможных вариантов поведения ХТС невозможна, а таких математических моделей просто не существует, т.к. отсутствует как теоретическая, так и экспериментальная база. Во-вторых, во время «свободного» пуска пользователь может сильно нарушить технологический режим, что приведет к аварийной ситуации либо к невозможности дальнейшей эксплуатации оборудования. В-третьих, технологический регламент разрабатывается для его исполнения. Все действия с промышленными объектами химического и нефтехимического профиля, являющимися взрывопожароопасными, строго регламентированы.

Описание различных методик и сценариев обучения проводится в работах [142-146], а изучение человеко-машинного взаимодействия и описание пользовательского интерфейса в работах [147-150]. Вопросы адекватности тренажерной модели рассматриваются в работах [151-153].

Разработки как зарубежных, так и отечественных производителей, составляют предмет интеллектуальной собственности. Отсутствует возможность для модернизации программного обеспечения, использования собственных моделей ХТС и алгоритмов управления.

1.5.2. Построение компьютерных тренажеров по обучению промышленного персонала работе в системах управления

При разработке тренажерного комплекса было рассмотрено множество вариантов, и в тесном сотрудничестве с заказчиком был определен следующий подход: возможность обучения промышленного персонала предприятий операциям пуска, останова и ликвидации штатных аварийных ситуаций согласно предписаниям технологического регламента и плана ликвидации аварийных ситуаций. Таким образом, ставится задача обучения персонала операциям пуска, останова, ликвидации аварийных ситуаций в строгом соответствии с технологическим регламентом. Каждой операции соответствует отдельный тест. Такая концепция реализована на примере управления установкой дебутанизации углеводородов.

Подход к разработке тренажера должен опираться на существующий опыт работы промышленного персонала, как с технологическим оборудованием, так и с современным компьютерным оборудованием. Очень остро стоит вопрос работы на компьютерных тренажерах людей старшего возраста, которые, досконально зная работу промышленного оборудования, не умеют работать с компьютерными программами и очень тяжело обучаются этому. Тогда как молодой персонал, легко обучаемый работе с любыми компьютерными системами, обладает недостаточными знаниями об особенностях управления технологическими установками.

Для решения задачи выбора универсальной среды моделирования ХТС разработан программный продукт, позволяющий моделировать как физико-химические процессы, протекающие в аппаратах химической технологии, так и системы управления. Моделирование ХТС осуществляется на языке непрерывных функциональных схем (НФС, СФС). Внутри каждого

функционального блока на языке структурированного текста записывается модель блока. НФС используется в качестве математической модели в тренажерном комплексе и для моделирования процесса автоматизированного пуска. Использование собственного программного продукта объясняется следующими причинами: готовые пакеты программ, как правило, являются платными и имеют закрытый исходный код, т.е. не позволяют модернизировать программное обеспечение для решения различных задач.

Математические модели составляются на основе уравнений баланса, законов сохранения импульса, массы и тепла. При этом стремятся использовать простые математические модели, реализующие заданные функции, которые качественно и количественно реагируют на определенный перечень входных возмущений. Проблема применения сложных математических моделей состоит в длительном времени их расчета и большом количестве объектов на технологической схеме, которые надо рассчитывать параллельно. В режиме реального времени выполнить это можно только на суперкомпьютере, использование которого для тренажерного комплекса нецелесообразно.

Разработанный программный продукт используется в различных сферах деятельности: в научной работе сотрудников кафедры автоматизации технологических процессов и производств (АТПП) для расчетов химико-технологических процессов и аппаратов; при разработке компьютерных тренажеров по обучению промышленного персонала безаварийной эксплуатации оборудования, проведению пусков, остановов и ликвидации штатных и нештатных аварийных ситуаций; при моделировании автоматизированной системы пуска и останова ХТС; в процессе обучения студентов кафедры, в том числе при написании выпускных квалификационных работ. Кафедра АТПП является разработчиком и собственником данного программного продукта, что дает возможность свободного использования продукта в учебных, научных и коммерческих целях (Приложение 3).

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ РАЗДЕЛЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ЯЗЫКЕ НЕПРЕРЫВНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ

В данной главе рассматриваются основы моделирования ХТС на языке непрерывных функциональных схем (НФС): условные обозначения функциональных блоков и параметров функциональных блоков; условные обозначения параметров функциональных блоков в программном коде; алгоритмы сопряжения функциональных блоков. Представлено конфигурирование типовых схем ХТС на языке НФС. На основе представленного технологического регламента и технологической схемы проводится конфигурирование технологической установки дебутанизации углеводородов.

2.1. Моделирование установки на языке НФС

Устойчивое функционирование технологического процесса в условиях постоянно действующих внешних и внутренних возмущающих факторов невозможно без применения системы управления процессом, приборов и средств автоматизации. Технологические аппараты, вспомогательное оборудование, приборы и средства автоматизации ХТС в процессе непрерывного функционирования неразрывно связаны между собой байпасными, рецикловыми, перекрестными технологическими и информационными потоками. Установить их взаимное влияние на состояние процесса в каждом аппарате в динамическом режиме функционирования, разработать систему управления и автоматизации чрезвычайно сложно.

Для решения данной задачи предлагается применить метод математического моделирования. При разработке программного кода для моделирования ХТС в режимах пуска, останова или нормального функционирования проводится ее конфигурирование, представление в виде НФС. НФС состоит из взаимосвязанных функциональных блоков, каждый из которых представляет математическую нестационарную модель элемента ХТС,

например, в виде уравнений баланса, регрессионных зависимостей, законов управления или команд типа «открыть», «закрыть», «включить», «выключить».

Конфигурирование ХТС начинается с рассмотрения структуры программного продукта, логики и правил конфигурирования [154]. Технологическая схема узла состоит из аппаратов химической технологии, которые можно разделить на следующие типы: разделительные, реакционные аппараты, теплообменное оборудование, емкостное оборудование, насосное оборудование, регулирующие органы (ручные арматуры, электрические задвижки, регулирующие и отсечные клапаны), регуляторы. Каждый аппарат и устройство на схеме представляется отдельным функциональным блоком. Функциональные блоки располагаются аналогично положению аппаратов на технологической схеме. Это упрощает работу со схемой и дает возможность понимания сущности протекания технологического процесса даже при отсутствии перед глазами самой технологической схемы. Таким образом, НФС структурно повторяет технологическую схему, что является важным фактором при моделировании ХТС.

Обозначение функциональных блоков можно выполнить двумя путями:

1. При работе с технологической схемой действующего или спроектированного производства проектировщиком уже введена система обозначений оборудования. Правила обозначений оборудования при этом зависят только от внутреннего стандарта, действующего в организации-проектировщике системы управления. Подробное разъяснение внутреннего стандарта, как правило, приводится в проектной документации. Разработчику модели ХТС в данном случае рекомендуется полностью опираться на действующую систему обозначений и задавать соответствующие названия блоков. При этом стоит сохранять как буквенное, так и числовое обозначение аппаратов для однозначной идентификации их с функциональными блоками.

2. При использовании программного продукта в учебном процессе или при научных исследованиях вводятся универсальные обозначения, примеры которых приведены в табл. 2.1.

При использовании программы в личных целях пользователь может вводить любые обозначения. Тем не менее, рекомендуется придерживаться единой системы обозначений как в рамках одного проекта, так и в течение всего времени использования программного продукта. Это существенно облегчает прочтение схем различной сложности, составленных на разных стадиях развития проекта любым пользователем, знакомым с принципами моделирования ХТС.

Таблица 2.1 – Типовое обозначение оборудования – функциональных блоков

№ п/п	Наименование оборудования	Условное обозначение
1	Ректификационная колонна	К, Kt
2	Емкость	Е, Tank
3	Теплообменник	Т
4	Насос	Н
5	Регулирующий клапан	РК, CV
6	Ручная арматура	РА, HV
7	ПИД-регулятор	ПИД, PID

В дальнейшем каждый блок наполняется моделью, алгоритмом или функциональной зависимостью. Параллельно с этим, согласно технологическому регламенту, задаются входные и выходные параметры функциональных блоков. При этом выходные параметры одних блоков являются входными для других. Они соединяются согласно структуре технологической схемы.

2.1.1. Условные обозначения параметров функциональных блоков

Для разработки математической модели ХТС на языке НФС создана программа – конструктор [155, 156]. В библиотеке конструктора заложен набор функциональных блоков и их математических моделей – ректификационная колонна, теплообменник, емкость, регулятор, регулирующий орган, ручная арматура и т.д. Пользователь имеет возможность пополнять данную библиотеку, создавая новые блоки на основе уже существующих блоков или на

основе пустого блока. При необходимости пользователь открывает библиотеку и копирует оттуда необходимые блоки.

При добавлении функционального блока на схему ему присваивается имя в соответствии со свободным порядковым номером: object1, object2 и т.д. (рис. 2.1). Имя блока задается в поле «Object ID». Имя блока отображается красным или зеленым цветом. Это информирует о наличии записанного кода программы внутри блока (зеленый цвет) или об его отсутствии (красный цвет). Имя блока меняет цвет с красного на зеленый после записи любого оператора внутри данного блока.

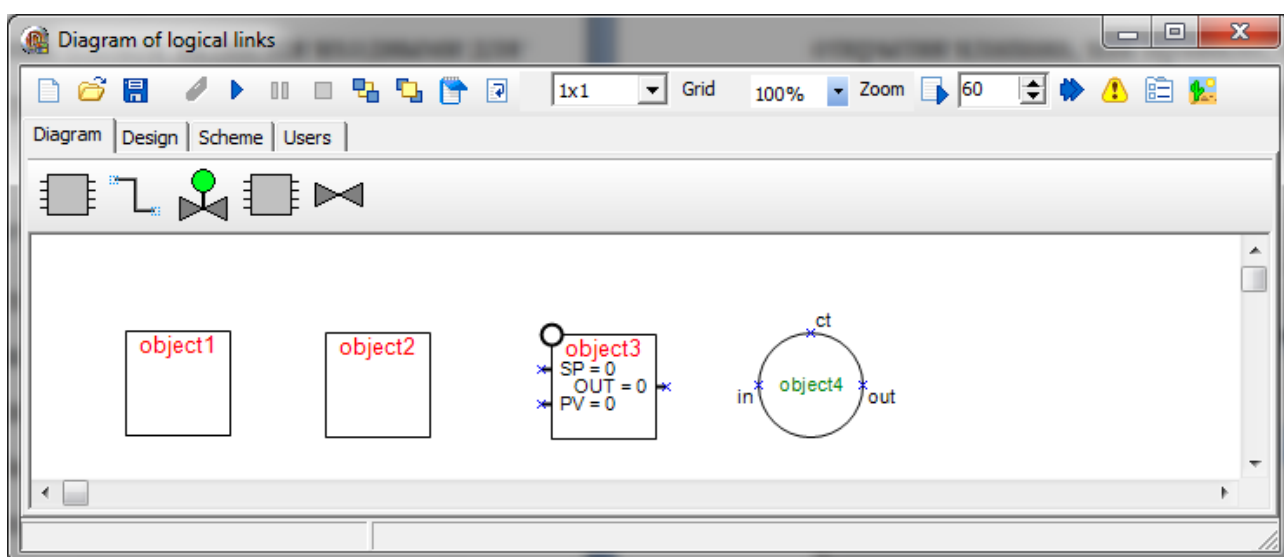


Рис. 2.1. Окно разработки непрерывных функциональных схем.

Блоки, кроме универсального, по умолчанию содержат определенный перечень параметров. Для блока, моделирующего регулирующей клапан, введены параметры In, Out, Ct, Dout, X (рис. 2.2):

In – величина расхода продукта, приходящего с предыдущего аппарата, который пройдет через клапан при степени открытия 100 %;

Out – величина расхода продукта, проходящего через клапан;

Ct – управляющее воздействие, поступающее на исполнительный механизм с регулятора;

Dout – вычисляется как разница между управляющим воздействием Ct и текущей степенью открытия X;

X – текущая степень открытия регулирующего органа.

Для моделирования запорных арматур используется блок, имеющий аналогичные параметры. Ключевым отличием являются возможные состояния управляющего воздействия St . По умолчанию для ручной арматуры это 0 и 1, арматура закрыта или открыта.

In	ID	Type	Side	Value	DefValu	LoLo	Lo	Hi	HiHi	Min	Max
1	in	Число	Left	0	0	0	0	1	1	0	1
2	out	Число	Left	0	0	0	0	1	1	0	1
3	ct	%	Left	0	0	0	0	100	100	0	100
4	dout	%	Left	0	0	0	0	100	100	0	100
5	X	%	Left	0	0	0	0	100	100	0	100

Рис. 2.2. Параметры функционального блока регулирующего органа.

Блок ПИД-регулятора по умолчанию содержит большой набор параметров (рис. 2.3):

Pv – текущее значение регулируемого параметра. Единицы измерения и диапазон изменения параметра настраиваются в соответствии с используемым датчиком;

Sp – текущее значение уставки ПИД-регулятора. Единицы измерения соответствуют единицам измерения регулируемого параметра Pv ;

Out – выходное управляющее воздействие, передаваемое на исполнительный механизм. Единицы измерения 0 - 100%;

$Spold$, $Spnew$ – старое и новое значение уставки. Используется в ручном режиме работы регулятора при слежении за текущим значением регулируемого параметра и присвоении этого значения уставке. Алгоритм используется для исключения резких колебаний степени открытия регулирующего органа при переходе из ручного режима в автоматический;

K_p , K_i , K_d – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты ПИД-регулятора. Коэффициенты не имеют размерности и являются настроечными параметрами ПИД-регулятора;

Auto – параметр, отвечающий за режим работы регулятора. Имеет два значения: 0 и 1, ручной и автоматический режим соответственно;

E , E_0 – величина ошибки рассогласования на текущем и предыдущем шаге соответственно.

In	ID	Type	Side	Value	DefValu	LoLo	Lo	Hi	HiHi	Min	Max
1	SP	%	Left	0	0	0	0	100	100	0	100
2	PV	%	Left	0	0	0	0	100	100	0	100
3	OUT	%	Right	50	0	0	0	100	100	0	100
4	SPold	Число	None	0	0	0	0	1	1	0	1
5	SPnew	Число	None	0	0	0	0	1	1	0	1
6	kp	Число	None	0,1	0	0	0	1	1	0	1
7	ki	Число	None	0	0	0	0	1	1	0	1
8	kd	Число	None	0	0	0	0	1	1	0	1
9	auto	Число	None	0	0	0	0	1	1	0	1
10	e	Число	None	0	0	0	0	100	100	0	100
11	e0	Число	None	0	0	0	0	100	100	0	100

Рис. 2.3. Параметры функционального блока ПИД-регулятора.

Функциональный блок может содержать произвольное количество параметров, в зависимости от функций, выполняемых этим блоком. Параметры функциональных блоков условно можно разделить на два типа:

1. Локальные параметры функционального блока, которые вводятся непосредственно в коде программы данного блока. Они могут использоваться только как временные внутренние переменные. Их нельзя выводить ни на уровень математических моделей, ни на уровень визуализации. Данные параметры не имеют размерности.

2. Параметры второго типа задаются в свойствах функциональных блоков. Параметры данного типа могут выводиться как на уровень математических моделей, так и на уровень визуализации. Для этого во вкладке «Params» необходимо нажать на кнопку «+» (рис. 2.4). При этом появляется окно, в котором задаются все необходимые настройки (рис. 2.5):

Param - название параметра;

Type - единицы измерения;

Side - вариант отображения параметра в блоке: left/right (слева/справа).

При выборе None параметр отображаться не будет;

Max, Min – максимальное и минимальное значения, указывающие диапазон изменения данного параметра;

HiHi, Hi – критическое и предупредительное значения верхних уставок;

LoLo, Lo – критическое и предупредительное значения нижних уставок.

Данные параметры используются для настройки сигнализации и блокировок;

DefValue – значение параметра по умолчанию;

Value – текущее значение параметра.

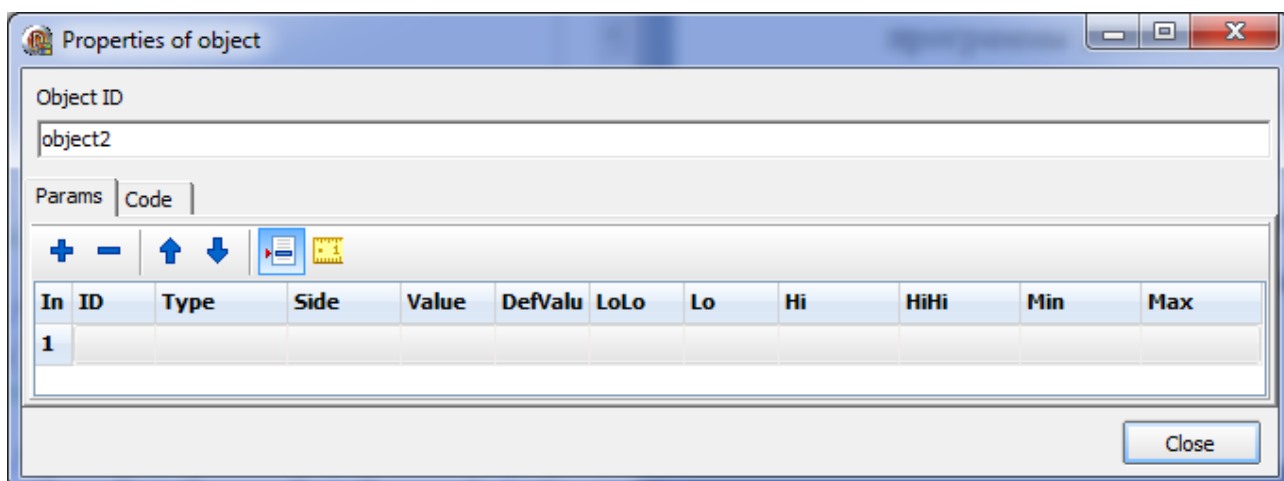


Рис. 2.4. Окно управления параметрами функционального блока.

Постоянно используемыми полями являются следующие: Param, Type, Max, Min, Value. Остальные используются при необходимости. У каждого поля есть значение по умолчанию. Кроме этого, существует несколько типовых настроек каждого параметра: для уровня в аппарате – 0-100% и 0-2000мм, для запорной арматуры – 0-1. После проведения всех необходимых настроек и

нажатия кнопки **Ок**, параметр добавляется в перечень параметров функционального блока.

Комбинация клавиш **F5/F6** позволяет копировать свойства функциональных блоков, к которым относится и перечень всех параметров. Таким образом, введя и настроив параметры одного блока, пользователь копирует их в аналогично работающие блоки.

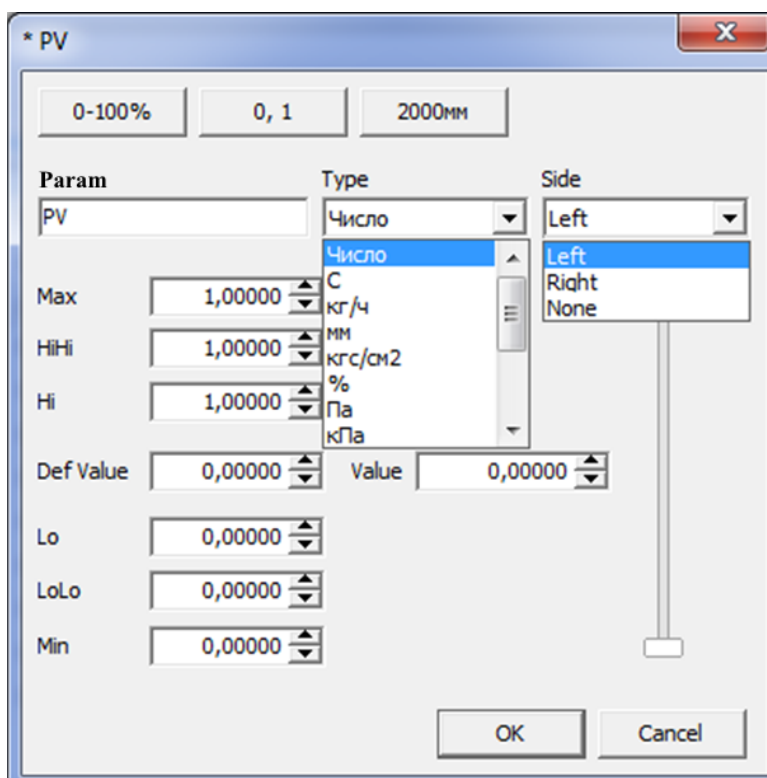


Рис. 2.5. Окно настройки свойств параметра.

2.1.2. Условные обозначения параметров функциональных блоков в программном коде

Запись обращения к параметру начинается с определения конкретного блока, к параметру которого необходимо обратиться. Для этого на первом месте записывается имя блока. После имени ставится знак подчеркивания « » и записывается параметр блока, к которому происходит обращение. Записав параметр блока, ставится точка «.». После этого из всплывающего списка выбирается свойство параметра, к которому происходит обращение: (Max, Min, HiHi, Hi, LoLo, Lo, Value, DefValue). При работе с текущим значением параметра, что является стандартным случаем, выбирается свойство Value.

Полная запись обращения к параметру выглядит следующим образом:

<Имя_блока>_<Параметр>.<Свойство_параметра>.

Подставив используемые названия, получим следующую запись:

«Object ID_Param.Property».

При написании кода программы внутри конкретного блока и при обращении к параметру данного блока можно пользоваться упрощенным синтаксисом. Имя блока и знак подчеркивания «_» можно исключить. В этом случае получим следующий упрощенный синтаксис обращения к параметру:

<Имя_параметра>.<Свойство_параметра> или «Param.Property».

Так как используется Pascal-подобный язык, то весь остальной синтаксис аналогичен синтаксису языка Pascal. Язык включает множество структур и конструкций с зарезервированными словами: if, then, else, while, for, begin, end. Подпрограммы делятся на процедуры и функции. Используются стандартные символы математических операций: *, /, +, - и оператор присваивания :=. Добавляемые параметры по умолчанию имеют вещественный тип (Real).

2.1.3. Алгоритмы сопряжения функциональных блоков

Сопряжение функциональных блоков осуществляется двумя способами:

1) Соединительными линиями. Выход одного блока соединяется со входом другого.

2) Программно. Применяется в случаях, когда схема становится перегруженной и сложно проследить связь между блоками. Для этого в коде блока требуемому входному параметру присваивается выходной параметр первого блока.

Рассмотрим оба варианта соединения. Добавим на функциональную схему два универсальных блока с именами BLOCK1 и BLOCK2. У блока BLOCK1 создадим параметр Out, у блока BLOCK2 параметр In. Соединим выходной параметр Out блока BLOCK1 с входным параметром In блока BLOCK2.

Для применения первого способа необходимо соединительной линией соединить параметр Out блока BLOCK1 с параметром In блока BLOCK2 (рис. 2.6). Для этого, выбрав элемент «Соединительная линия» (рис. 2.1), необходимо

нажать левой кнопкой мыши на параметр Out блока BLOCK1 и протянуть появившуюся линию до параметра In блока BLOCK2. После совершения такого действия параметр по соединительной линии будет передаваться от блока BLOCK1 к блоку BLOCK2. Соединив параметры в обратной последовательности, результат будет обратным, т.е. параметр будет передаваться от блока BLOCK2 к блоку BLOCK1. При этом на схеме у параметра принимающего блока появляется небольшой квадрат. Названия блоков и параметров никак не влияют на направление передачи параметров.



Рис. 2.6. Сопряжение функциональных блоков соединительными линиями.

Для соединения блоков программным способом в коде блока сделаем следующую запись:

```
«BLOCK2_In.Value := BLOCK1_Out.Value»
```

Такую запись можно разместить как в первом, так и во втором блоке, так как в ней есть указание полных имен всех используемых параметров (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Сопряжение функциональных блоков программным методом.

Рассмотрим запись, которая будет работать только в блоке BLOCK1:

```
«BLOCK2_In.Value := Out.Value»
```

Аналогично рассмотрим запись, которая будет корректно работать при записи только в блоке BLOCK2:

```
«In.Value := BLOCK1_Out.Value»
```

Используя упрощенный вариант записи параметра необходимо учитывать, что таким образом можно обращаться только к параметрам блока, в котором размещается данная запись.

2.2. Конфигурирование типовых ХТС

При описании различных ХТС будем придерживаться следующего правила: имена блоков задаются заглавными, а имена параметров и свойств малыми буквами.

2.2.1. Конфигурирование контура регулирования расхода

Сконфигурируем контур регулирования расхода, ключевыми элементами которого являются ПИД-регулятор и регулирующий орган. Для этого добавим на схему блок регулятора, блок регулирующего органа и три универсальных блока.

Зададим блокам следующие имена: PID – блок ПИД-регулятора, VALVE – блок регулирующего органа, SP – блок задания уставки (задания) регулятору, IN, OUT – блоки ввода и вывода величины расхода продукта.

В блоке IN введем один параметр с названием *in*, выберем единицы измерения кг/час, выставим значения *Min*, *Max* равные 0 и 500 соответственно. Свойству *Value* зададим значение 500. В блоке SP введем параметр *Sp* со свойствами, аналогичными свойствам параметра *In* блока IN. В блоке OUT введем параметр *Out* со свойствами, аналогичными свойствам параметра *In* блока IN. В блоках PID и VALVE все необходимые параметры введены по умолчанию. Необходимо лишь настроить свойства параметров *In*, *Out* блока VALVE и свойства параметра *Sp* блока PID аналогично другим настроенным параметрам.

В блоке PID необходимо выставить настройки ПИД-регулятора, т.е. значения П, И, Д коэффициентов. Для работы регулятора в автоматическом режиме значение параметра *Auto* блока PID выставляется равным 1.

При настройке параметров и подготовке к соединению блоков между собой необходимо помнить, что любые соединяемые параметры должны иметь одинаковые свойства, иначе конфигурируемая схема будет работать некорректно.

Далее соединительными линиями соединим следующие параметры:

- 1) параметр In блока IN с параметром In блока VALVE;
- 2) параметр Out блока VALVE с параметром Out блока OUT;
- 3) параметр Out блока VALVE с параметром PV блока PID;
- 4) параметр Sp блока SP с параметром Sp блока PID;
- 5) параметр Out блока PID с параметром Ct блока VALVE;

Сконфигурированная ХТС представлена на рисунке 2.8.

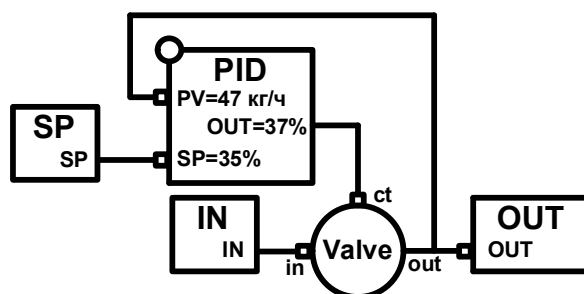


Рис. 2.8. Математическая модель ХТС регулирования расхода.

Модель имеет следующий алгоритм работы.

Первым шагом задается значение уставки в блоке SP. Для этого свойству Value параметра Sp присваивается необходимое значение.

На следующий временной такт данная величина попадает в регулятор в качестве параметра Sp блока PID, где происходит сравнение значения уставки Sp и величины текущего значения расхода Pv. На основании найденного рассогласования $E=Sp-Pv$ рассчитывается вклад каждой из П, И, Д составляющих в выходной управляющий сигнал. После их сложения происходит формирование управляющего сигнала, который поступает на выход регулятора в качестве параметра Out блока PID.

На следующий временной такт управляющее воздействие Out блока PID поступает на регулирующий клапан VALVE в качестве параметра Ct. В этом блоке происходит сравнение текущей степени открытия клапана X и управляющего воздействия Ct. Если разница данных параметров $Dout > 0,5\%$, то происходит изменение степени открытия клапана. (0,5% - зона нечувствительности регулирующего органа). После изменения степени открытия клапана происходит перерасчет расхода продукта, протекающего

через регулирующий орган. Измененное значение расхода присваивается значению параметра Out блока VALVE.

На следующий временной такт расход продукта через регулирующий орган в качестве параметра Out блока VALVE поступает на вход блока Out в качестве параметра Out и на вход блока PID в качестве параметра Pv. В блоке PID происходит сравнение значения уставки Sp и текущего значения регулируемого параметра Pv. На основании найденного рассогласования формируется новый управляющий сигнал, который поступает на регулирующий орган, изменяя степень его открытия и воздействуя на значение расхода продукта.

Таким образом, управляющее воздействие и степень открытия клапана изменяются до тех пор, пока текущее значение Pv не сравняется со значением уставки Sp. Алгоритм действует непрерывно в соответствии с алгоритмом опроса параметра, начиная с момента запуска программы моделирования до остановки ее пользователем.

2.2.2. Конфигурирование ХТС, состоящей из емкости, контуров регулирования уровня и расхода продукта

Состав конфигурируемой ХТС: емкость, контур регулирования уровня в емкости подачи продукта в емкость, контур регулирования расхода продукта из емкости. На уже существующую схему добавим один универсальный блок с названием TANK, моделирующий емкость и блоки PID, VALVE, SP, аналогичные имеющимся блокам. Зададим блокам следующие имена: регуляторам расхода и уровня PIDF и PIDL, регулирующим клапанам VALVEF и VALVEL, блокам задания уставок SPF и SPL соответственно. В блоке TANK введем три параметра: In – входящий поток, Out – выходящий поток, L – уровень в емкости.

В блоках PIDL и PIDF выставляются значения П, И, Д коэффициентов регулирования. Оба регулятора переводятся в автоматический режим работы, выставляя значение параметра Auto, равное единице. Перед соединением

блоков настраиваются свойства всех параметров. Блоки соединяются следующим образом:

- 1) параметр In блока IN с параметром In блока VALVEL;
- 2) параметр Out блока VALVEL с параметром In блока TANK;
- 3) параметр Out блока TANK с параметром In блока VALVEF;
- 4) параметр Out блока VALVEF с параметром F блока OUT;
- 5) параметр Out блока VALVEF с параметром Pv блока PIDF;
- 6) параметр Sp блока SPA с параметром Sp блока PIDF;
- 7) параметр Out блока PIDF с параметром Ct блока VALVEF;
- 8) параметр L блока TANK с параметром Pv блока PIDL;
- 9) параметр Sp блока SPL с параметром Sp блока PIDL;
- 10) параметр Out блока PIDL с параметром Ct блока VALVEL.

Сконфигурированная ХТС представлена на рис. 2.9.

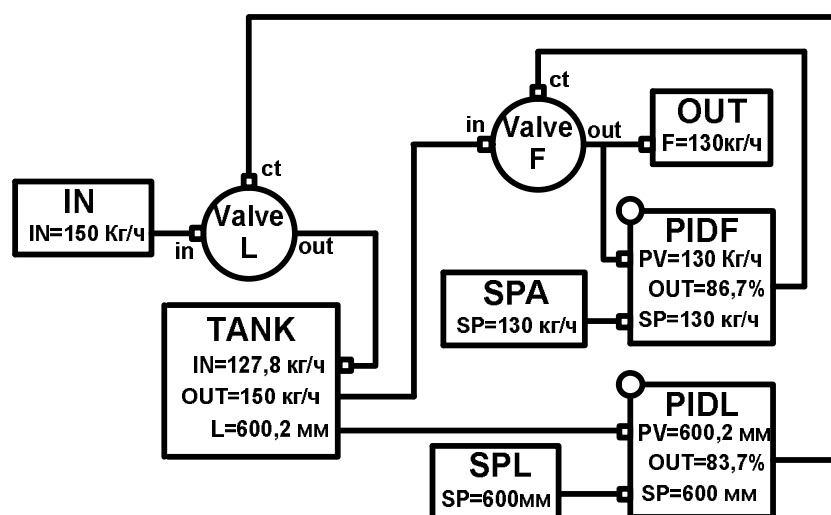


Рис. 2.9. Математическая модель ХТС, состоящей из емкости с контурами регулирования уровня и расхода.

Контур регулирования расхода продукта на выходе из емкости работает по алгоритму, описанному выше. Единственным отличием является то, что максимальный расход продукта задается не отдельным блоком, а является выходным параметром блока TANK. Для контура регулирования расхода задается значение уставки в блоке SPA путем задания необходимого значения свойству Value параметра Sp.

Модель ХТС имеет следующий алгоритм работы.

Первым шагом задается значение уставки в блоке SPL путем задания необходимого значения свойству Value параметра Sp.

На следующий временной такт данная величина попадает в регулятор в качестве параметра Sp блока PIDL, где происходит сравнение значения уставки Sp и величины текущего значения уровня в емкости Pv. На основании найденного рассогласования E рассчитывается вклад каждой из П, И, Д составляющих в выходной управляющий сигнал. После их сложения происходит формирование управляющего сигнала, и он поступает на выход регулятора в качестве параметра Out блока PIDL.

На следующий временной такт управляющее воздействие Out блока PIDL поступает на регулирующий клапан VALVEL в качестве параметра St. В этом блоке происходит сравнение текущей степени открытия клапана X и управляющего воздействия St. Если разница данных параметров $Dout > 0,5\%$, то происходит изменение степени открытия клапана. (0,5% - зона нечувствительности регулирующего органа). После изменения степени открытия клапана происходит перерасчет расхода продукта, протекающего через регулирующий орган. Измененное значение расхода присваивается значению параметра Out блока VALVEL.

На следующий временной такт расход продукта через регулирующий орган в качестве параметра Out блока VALVEL поступает на вход блока TANK в качестве параметра In. На основании заложенной модели рассчитывается изменение уровня в емкости, значение уровня присваивается параметру L.

На следующий временной такт значение уровня в емкости TANK поступает на вход блока PIDL в качестве параметра Pv. В блоке PIDL происходит сравнение значения уставки Sp и текущего значения регулируемого параметра Pv. На основании найденного рассогласования формируется новый управляющий сигнал, который поступает на регулирующий орган, изменяя степень его открытия и воздействуя на значение расхода продукта.

Таким образом, управляющее воздействие и степень открытия клапана изменяются до тех пор, пока текущее значение Pv не сравнивается со значением

уставки Sp. Алгоритм действует непрерывно (циклически), начиная с момента запуска программы моделирования до остановки ее пользователем [157, 158].

2.2.3. Конфигурирование ХТС теплообмена с контуром каскадного регулирования

Конфигурируемая ХТС состоит из теплообменного аппарата и контура каскадного регулирования расхода теплоносителя с коррекцией по температуре продукта на выходе из теплообменника. Для конфигурирования данного узла на схему необходимо добавить следующие элементы: 4 универсальных блока, 2 блока регулирования, 1 блок регулирующего органа.

Введем следующие обозначения: регулирующий клапан – VALVE, регуляторы – PIDT, PIDF, блок задания уставки – SPT, блоки ввода продукта и теплоносителя – INGX, INGG, блок теплообмена – T. Добавим в блоки следующие параметры:

PIDT – параметр Out, диапазон изменения от 0 до 100 %;

PIDF – параметр Sp, диапазон изменения от 0 до 100 %;

SPT – параметр Sp, диапазон изменения от 0 до 100 °С;

INGX – параметр Gx, диапазон изменения от 0 до 100 кг/час;

INGG – параметр Gg, диапазон изменения от 0 до 100 кг/час;

T – параметр Gx, диапазон изменения от 0 до 100 кг/час;

параметр Gg, диапазон изменения от 0 до 100 кг/час;

параметр T_{xk}, диапазон изменения от 0 до 100 °С;

параметр T_{gk}, диапазон изменения от 0 до 100 °С.

Обозначения введенных параметров:

Sp – уставка регулятору температуры;

Gx – расход продукта на входе в теплообменник;

Gg – расход теплоносителя на входе в теплообменник;

T_{xk} – значение температуры продукта на выходе из теплообменника;

T_{gk} – значение температуры теплоносителя на выходе из теплообменника.

Соединим параметры следующим образом:

- 1) параметр G_x блока INGX с параметром G_x блока T;
- 2) параметр G_g блока INGG с параметром In блока VALVE;
- 3) параметр Out блока VALVE с параметром G_g блока T;
- 4) параметр Out блока VALVE с параметром P_v блока PIDF;
- 5) параметр T_{xk} блока T с параметром P_v блока PIDT;
- 6) параметр S_p блока SPT с параметром S_p блока PIDT;
- 7) параметр Out блока PIDT с параметром S_p блока PIDF;
- 8) параметр Out блока PIDF с параметром C_t блока Valve.

Сконфигурированная ХТС представлена на рис. 2.10. Запуск модели осуществляется нажатием кнопки «Пуск».

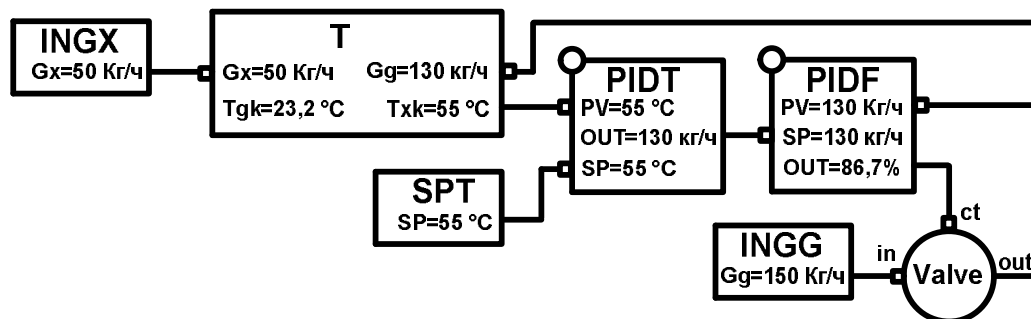


Рис. 2.10. Математическая модель ХТС теплообмена с контуром регулирования расхода теплоносителя с коррекцией по температуре продукта на выходе из теплообменника.

Сконфигурированная ХТС имеет следующий алгоритм работы.

Регуляторы PIDT и PIDF находятся в автоматическом режиме работы. При этом выходной сигнал Out регулятора PIDT задает уставку S_p на регуляторе PIDF. Реализован режим каскадного регулирования расхода теплоносителя G_g с коррекцией по температуре продукта на выходе из теплообменника.

После запуска режима моделирования пользователь в блоке SPT выставляет значение уставки – требуемую температуру продукта на выходе из теплообменного аппарата, которая будет поддерживаться контуром каскадного регулирования.

На следующий временной такт это значение в качестве параметра S_p поступает в блок регулятора PIDT. Одновременно с этим текущее значение

температуры продукта на выходе из теплообменника в качестве параметра T_{hk} блока теплообмена T поступает на регулятор в качестве параметра P_v блока PIDT. В блоке регулирования происходит сравнение текущего значения температуры продукта на выходе из теплообменника P_v с величиной уставки S_p . Рассчитывается рассогласование $E = S_p - P_v$. На основании рассогласования рассчитывается вклад каждой из П, И, Д составляющих в управляющий сигнал, который подается на выход регулятора PIDT в качестве параметра Out.

На следующий временной такт данная величина попадает в регулятор расхода в качестве параметра S_p блока PIDF. Одновременно с этим на данный блок в качестве параметра P_v поступает текущее значение расхода теплоносителя. Происходит сравнение значения уставки S_p и величины текущего значения расхода теплоносителя P_v . На основании найденного рассогласования E рассчитывается вклад каждой из П, И, Д составляющих в выходной управляющий сигнал. После их сложения происходит формирование управляющего сигнала, который поступает на выход регулятора в качестве параметра Out блока PIDF.

На следующий временной такт управляющее воздействие в качестве параметра Out блока PIDF поступает на регулирующий клапан VALVE в качестве параметра S_t . В этом блоке происходит сравнение текущей степени открытия клапана X и управляющего воздействия S_t . Если разница данных параметров $D_{out} > 0,5\%$, то происходит изменение степени открытия клапана. (0,5% - зона нечувствительности регулирующего органа). После изменения степени открытия клапана происходит перерасчет расхода продукта, протекающего через регулирующий орган. Измененное значение расхода присваивается значению параметра Out блока VALVE.

На следующий временной такт расход продукта через регулирующий орган в качестве параметра Out блока VALVE поступает на вход блока T в качестве параметра G_g . На основании заложенной модели рассчитывается изменение температуры продукта на выходе из теплообменника и значение температуры присваивается параметру T_{hk} .

На следующий временной такт данная величина поступает в качестве параметра P_v на блок PIDT, где сравнивается со значением уставки S_p . В блоке PIDT формируется новый управляющий сигнал для блока регулирования расхода PIDF. В блоке PIDF происходит сравнение новой уставки S_p с текущим значением расхода теплоносителя, находится рассогласование и вырабатывается новый управляющий сигнал, изменяющий степень открытия регулирующего органа VALVE. В результате этого меняется расход теплоносителя G_g и режим работы теплообменного аппарата T. Таким образом, происходит вывод аппарата на требуемый режим работы. Алгоритм выполняется непрерывно до завершения работы программы [159, 160].

2.3. Конфигурирование ХТС дебутанизации углеводородов

Технологическое оборудование данного узла состоит из ректификационной колонны поз. E-DA-105, флегмовой емкости поз. E-FA-130, насоса поз. E-GA-130 и трех теплообменных аппаратов: дефлегматора поз. E-EA-130, кипятильника поз. E-EA-131, подогревателя поз. E-EA-132. Система регулирования представлена следующими контурами: FIC1, FIC2, FIC3, FIC4, FIC5, TIC2, LICA1, LICSA3, PIC1A, PICSA1AB.

Для конфигурирования данной ХТС необходимы: 1 блок ректификационной колонны, 3 блока теплообмена, 1 блок емкости, 1 блок насоса, 10 блоков регуляторов, 8 блоков регулирующих органов, 4 блока арматуры. Рассмотрим подробный состав используемых блоков и их параметры, а также конфигурацию блоков в единую непрерывную функциональную схему.

I) Регуляторы:

1) FIC1 – регулятор отбора кубовой жидкости из колонны поз. E-DA-105.

Параметры:

S_p – уставка регулятору расхода, диапазон от 0 до 10 т/ч;

P_v – текущее значение расхода, диапазон от 0 до 10 т/ч;

Out – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%.

2) FIC2 – регулятор расхода пара в кипятильник поз. E-EA-131 с коррекцией по давлению в колонне поз. E-DA-105.

Параметры:

Sp – уставка регулятору расхода, диапазон от 0 до 100%;

Pv – текущее значение расхода, диапазон от 0 до 30 т/ч;

Out – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%.

3) FIC3 – регулятор расхода питания в колонну поз. E-DA-105.

Параметры:

Sp – уставка регулятору расхода, диапазон от 0 до 80 т/ч;

Pv – текущее значение расхода, диапазон от 0 до 80 т/ч;

Out – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%.

4) FIC4 – регулятор расхода флегмы в колонну поз. E-DA-105.

Параметры:

Sp – уставка регулятору расхода, диапазон от 0 до 150 т/ч;

Pv – текущее значение расхода, диапазон от 0 до 150 т/ч;

Out – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%.

5) FIC5 – регулятор расхода фракции C₃-C₄, уходящей из флегмовой емкости поз. E-FA-130.

Параметры:

Sp – уставка регулятору расхода, диапазон от 0 до 80 т/ч;

Pv – текущее значение расхода, диапазон от 0 до 80 т/ч;

Out – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%.

6) TIC2 – регулятор температуры питания расходом закалочной воды через подогреватель поз. E-EA-132.

Параметры:

Sp – уставка регулятору температуры, диапазон от 0 до 100 °С;

Pv – текущее значение температуры, диапазон от 0 до 100 °С;

Out – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%.

7) LICA1 – регулятор уровня в кубе колонны поз. E-DA-105 расходом питания.

Параметры:

S_p – уставка регулятору уровня, диапазон от 0 до 100%;

P_v – текущее значение расхода, диапазон от 0 до 100%;

Out – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%.

8) LICSA3 – регулятор уровня во флегмовой емкости поз. E-FA-130
расходом охлаждающей воды через дефлегматор поз. E-EA-130.

Параметры:

S_p – уставка регулятору расхода, диапазон от 0 до 100%;

P_v – текущее значение расхода, диапазон от 0 до 100%;

Out – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%.

9) PIC1A – регулятор давления в колонне поз. E-DA-105.

Параметры:

S_p – уставка регулятору давления, диапазон от 0 до 16 кгс/см²;

P_v – текущее значение давления, диапазон от 0 до 16 кгс/см²;

Out – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%.

10) PICSA1AB – регулятор давления в колонне поз. E-DA-105 в период
пуска подачей фракции C₃-C₄ на факел.

Параметры:

S_p – уставка регулятору давления, диапазон от 0 до 16 кгс/см²;

P_v – текущее значение давления, диапазон от 0 до 16 кгс/см²;

Out – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%.

II) Регулирующие клапаны:

1) FCV1 – регулирующий клапан.

Параметры:

In – расход продукта на входе, диапазон от 0 до 10 т/ч;

Out – расход продукта на выходе, диапазон от 0 до 10 т/ч;

St – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%;

X – текущая степень открытия, диапазон от 0 до 100%;

$Dout$ – рассогласование между текущей степенью открытия и
управляющим воздействием, диапазон от 0 до 100%.

2) FCV2 – регулирующий клапан.

Параметры:

In – расход продукта на входе, диапазон от 0 до 30 т/ч;

Out – расход продукта на выходе, диапазон от 0 до 30 т/ч;

St – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%;

X – текущая степень открытия, диапазон от 0 до 100%;

Dout – рассогласование между текущей степенью открытия и управляющим воздействием, диапазон от 0 до 100%.

3) FCV3 – регулирующий клапан.

Параметры:

In – расход продукта на входе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

Out – расход продукта на выходе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

St – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%;

X – текущая степень открытия, диапазон от 0 до 100%;

Dout – рассогласование между текущей степенью открытия и управляющим воздействием, диапазон от 0 до 100%.

4) FCV4 – регулирующий клапан.

Параметры:

In – расход продукта на входе, диапазон от 0 до 150 т/ч;

Out – расход продукта на выходе, диапазон от 0 до 150 т/ч;

St – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%;

X – текущая степень открытия, диапазон от 0 до 100%;

Dout – рассогласование между текущей степенью открытия и управляющим воздействием, диапазон от 0 до 100%.

5) FCV5 – регулирующий клапан.

Параметры:

In – расход продукта на входе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

Out – расход продукта на выходе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

St – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%;

X – текущая степень открытия, диапазон от 0 до 100%;

Dout – рассогласование между текущей степенью открытия и управляющим воздействием, диапазон от 0 до 100%.

6) PCV1 – регулирующий клапан.

Параметры:

In – расход продукта на входе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

Out – расход продукта на выходе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

St – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%;

X – текущая степень открытия, диапазон от 0 до 100%;

Dout – рассогласование между текущей степенью открытия и управляющим воздействием, диапазон от 0 до 100%.

7) TCV2 – регулирующий клапан.

Параметры:

In – расход продукта на входе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

Out – расход продукта на выходе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

St – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%;

X – текущая степень открытия, диапазон от 0 до 100%;

Dout – рассогласование между текущей степенью открытия и управляющим воздействием, диапазон от 0 до 100%.

8) LCV3 – регулирующий клапан.

Параметры:

In – расход продукта на входе, диапазон от 0 до 30 т/ч;

Out – расход продукта на выходе, диапазон от 0 до 30 т/ч;

St – управляющее воздействие, диапазон от 0 до 100%;

X – текущая степень открытия, диапазон от 0 до 100%;

Dout – рассогласование между текущей степенью открытия и управляющим воздействием, диапазон от 0 до 100%.

III) Ручные арматуры и отсечные клапаны:

1) HV10 – ручная арматура.

Параметры:

In – расход продукта на входе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

Out – расход продукта на выходе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

St – управляющее воздействие, 0 или 1.

2) HV37 – ручная арматура.

Параметры:

In – расход продукта на входе, диапазон от 0 до 10 т/ч;

Out – расход продукта на выходе, диапазон от 0 до 10 т/ч;

St – управляющее воздействие, 0 или 1.

3) SV15 – отсечной клапан.

Параметры:

In – расход продукта на входе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

Out – расход продукта на выходе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

St – управляющее воздействие, 0 или 1.

4) PSV16 – отсечной клапан.

Параметры:

In – расход продукта на входе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

Out – расход продукта на выходе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

St – управляющее воздействие, 0 или 1.

IV) Технологическое оборудование:

1) EEA130 – дефлегматор.

Параметры:

Voda – расход охлаждающей воды, диапазон от 0 до 30 т/ч;

Parvh – расход паров на входе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

Parvih – расход парожидкостной смеси на выходе из аппарата, диапазон от 0 до 80 т/ч.

2) EEA131 – кипятильник.

Параметры:

Kirvh – расход подогретой кубовой жидкости, диапазон от 0 до 30 т/ч;

Kirvih – расход входящей кубовой жидкости, диапазон от 0 до 30 т/ч;

Parvh – расход греющего пара, диапазон от 0 до 30 т/ч.

3) EEA132 – подогреватель.

Параметры:

G_x – расход теплоносителя на входе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

G_{xvih} – расход теплоносителя на выходе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

T_{xk} – температура теплоносителя на выходе, диапазон от 0 до 100 °С;

T_{gk} – температура продукта на выходе, диапазон от 0 до 100 °С;

G_g – расход продукта, диапазон от 0 до 80 т/ч.

4) EFA130 – флегмовая емкость.

Параметры:

L – уровень, диапазон от 0 до 100%;

I_n – расход парожидкостной смеси на входе в аппарат, диапазон от 0 до 230 т/ч;

V_{pred} – расход газовой смеси на выходе, диапазон от 0 до 80 т/ч;

$Flegm$ – расход флегмы, диапазон от 0 до 150 до т/ч.

5) EGA130 – насос.

Параметры

I_n – расход продукта на входе, диапазон от 0 до 150 т/ч;

O_{ut} – расход продукта на выходе, диапазон от 0 до 150 т/ч;

S_t – управляющее воздействие, 0 или 1.

6) EDA105 – ректификационная колонна.

Параметры:

P_{ar} – расход паров, уходящих сверху колонны; диапазон от 0 до 230 т/ч;

L – уровень в кубе колонны, диапазон от 0 до 100%;

P_{it} – расход питания, диапазон от 0 до 80 т/ч;

$Azot$ – давление азота, диапазон от 0 до 10 кгс/см²;

T_{kub} – температура куба колонны, диапазон от 0 до 150 °С;

G_{kub} – расход отбираемой кубовой жидкости, диапазон от 0 до 10 т/ч;

$Flegm$ – расход поступающей флегмы, диапазон от 0 до 150 т/ч;

P – давление в колонне, диапазон от 0 до 16 кгс/см²;

T_{verh} – температуры уходящих паров, диапазон от 0 до 150 °С;

K_{irvh} – расход подогретой кубовой жидкости, диапазон от 0 до 30 т/ч;

Kірvіh – расход подогреваемой кубовой жидкости, диапазон от 0 до 30 т/ч.

Соединим параметры следующим образом:

- 1) параметр Out блока HV6 с параметром In блока TCV2;
- 2) параметр Out блока TCV2 с параметром Gg блока EEA132;
- 3) параметр Tхk блока EEA132 с параметром Pv блока TIC2;
- 4) параметр Out блока TIC2 с параметром Ct блока TCV2;
- 5) параметр Out блока SV15 с параметром In блока FCV3;
- 6) параметр Out блока FCV3 с параметром Gx блока EEA132;
- 7) параметр Out блока FCV3 с параметром Pv блока FIC3;
- 8) параметр Out блока FIC3 с параметром Ct блока FCV3;
- 9) параметр Out блока LICA1 с параметром Ct блока FCV3;
- 10) параметр Out блока HV13 с параметром Azot блока EDA105;
- 11) параметр Gхvіh блока EEA132 с параметром Pit блока EDA105;
- 12) параметр Gkub блока EDA105 с параметром In блока FCV1;
- 13) параметр Out блока FCV1 с параметром Pv блока FIC1;
- 14) параметр Out блока FIC1 с параметром Ct блока FCV1;
- 15) параметр Kірvіh блока EDA105 с параметром Kірvіh блока EEA131;
- 16) параметр Kірvіh блока EEA131 с параметром Kірvіh блока EDA105;
- 17) параметр P блока EDA105 с параметром Pv блока PIC1A;
- 18) параметр Out блока PIC1A с параметром Sp блока FIC2;
- 19) параметр Out блока FIC2 с параметром Ct блока FCV2;
- 20) параметр Out блока FCV2 с параметром Parvіh блока EEA131;
- 21) параметр Out блока FCV2 с параметром Pv блока FIC2;
- 22) параметр Par блока EDA105 с параметром Parvіh блока EEA130;
- 23) параметр Voda блока EEA130 с параметром In блока LCV3;
- 24) параметр Parvіh блока EEA130 с параметром In блока EFA130;
- 25) параметр L блока EFA130 с параметром Pv блока LICSA3;
- 26) параметр Out блока LICSA3 с параметром Ct блока LCV3;
- 27) параметр Flegm блока EFA130 с параметром In блока EGA130;

- 28) параметр Out блока EGA130 с параметром In блока FCV4;
- 29) параметр Out блока FCV4 с параметром Flegm блока EDA105;
- 30) параметр Out блока FCV4 с параметром Pv блока FIC4;
- 31) параметр Out блока FIC4 с параметром Ct блока FCV4;
- 32) параметр Vpred блока EFA130 с параметром In блока FCV5;
- 33) параметр Out блока FCV5 с параметром Pv блока FIC5;
- 34) параметр Out блока FIC5 с параметром Ct блока FCV5;
- 35) параметр Vpred блока EFA130 с параметром In блока PSV16;
- 36) параметр Out блока PSV16 с параметром In блока PCV1;
- 37) параметр Out блока PICA1AB с параметром Ct блока PCV1;
- 38) параметр Out блока PICA1AB с параметром Ct блока PSV16;
- 39) параметр P блока EDA105 с параметром Pv блока PICA1AB;
- 40) параметр L блока EDA105 с параметром Pv блока LICA1.

Сконфигурированная ХТС представлена на рис. 2.12. Запуск модели осуществляется нажатием кнопки «Пуск».

Алгоритм работы модели можно разделить на несколько параллельно работающих подпрограмм. При этом целесообразно рассматривать каждую подпрограмму отдельно. Каждая подпрограмма представляет собой модель контура регулирования, привязанную к одному регулируемому органу. Выделим 8 контуров регулирования:

FIC1, FIC4, FIC5 – стандартные контуры регулирования расхода, работающие по описанным выше алгоритмам;

LICSA2, TIC2 - стандартные контуры регулирования уровня и температуры, работающие по описанным выше алгоритмам;

Контуры FIC3 и LICA1 объединяются в единую систему с одним регулирующим клапаном FCV3. Данный контур регулирования реализован таким образом, что в период пуска работает контур регулирования расхода питания, поступающего в колонну поз. E-DA-105. После вывода объекта на режим происходит переключение регуляторов и в работу вступает контур

регулирования уровня в кубе колонны LICA1. В эти интервалы контуры работают стандартно.

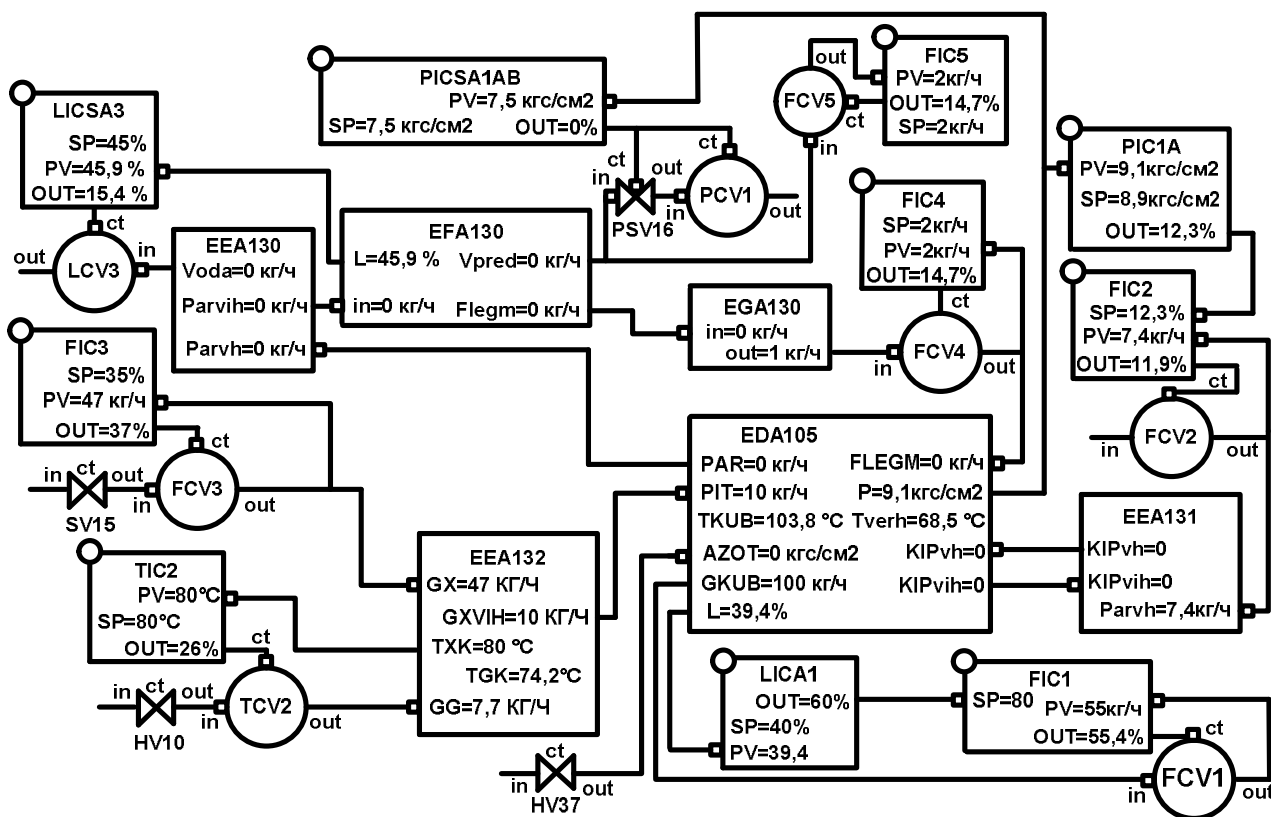


Рис. 2.12. Математическая модель ХТС дебутанизации углеводородов на языке НФС.

PICSA1AB – контур, объединяющий в себе функции регулирования и противоаварийной защиты. В период пусковых операций отсечной клапан PSV16 принудительно открыт. В это время данным контуром регулируется давление в колонне поз. E-DA-105. Для этого открытием регулирующего клапана PCV1 поддерживается давление в аппарате в соответствии с заданной уставкой. После начала отбора фракции C₃-C₄ на пиролиз контуром FIC5 закрывается отсечной клапан PSV16. В случае достижения давления в системе установленной критической величины (10.5 кгс/см²) на отсечной клапан PSV16 поступает сигнал открытия и в работу вновь вступает регулирующий клапан PCV1, через который давление сбрасывается до безопасной установленной величины (9 кгс/см²). Закрытие отсечного клапана в случае его аварийного срабатывания может произвести только производственный персонал после устранения причины повышения давления.

PIС1А и FIC2 – каскадный контур регулирования расхода пара в подогреватель с коррекцией по давлению в колонне поз. E-DA-105. Данный контур вступает в работу в автоматическом режиме каскадного регулирования после вывода объекта на режим. Одновременно с этим закрывается отсечной клапан PSV16 и начинается отбор фракции C₃-C₄ на пиролиз через клапан FCV5. В это время контур работает по рассмотренной схеме каскадного регулирования [159-160].

2.4. Математические модели функциональных блоков НФС дебутанизации углеводородов

Математические модели составлены на основе нестационарных уравнений баланса.

Математическая модель подогревателя исходной смеси.

Составим уравнения теплообмена в трубном и межтрубном пространствах подогревателя исходной смеси.

Пренебрегая термическим сопротивлением стенок труб теплообменника запишем нестационарные уравнения теплообмена в трубном и межтрубном пространствах. В трубном пространстве в режиме полного перемешивания движется исходная смесь, ее температура на входе $T_{вх} = \text{const}$. В межтрубном пространстве в режиме полного перемешивания движется нагревающий агент – горячая вода, температура которой на входе в аппарат $T_0 = \text{const}$. Расход исходной смеси G_1 , нагревающего агента G_2 .

Уравнения теплового баланса принимают вид:

$$\rho_1 c_1 V_1 \frac{dT_1}{dt} = G_1 c_1 T_1 - G_1 c_1 T_{вх} + kF(T_2 - T_1) \quad (2.1)$$

$$\rho_2 c_2 V_2 \frac{dT_2}{dt} = G_2 c_2 T_0 - G_2 c_2 T_2 - kF(T_2 - T_1) \quad (2.2)$$

Здесь ρ_1, ρ_2, c_1, c_2 – плотность и теплоемкость теплоносителей при средних значениях температуры; V_1, V_2 – объемы трубного и межтрубного

пространств; $V_1 = \frac{\pi l}{4} n d_{\text{тр}}^2$; $V_2 = \frac{\pi l}{4} (D^2 - n d_{\text{тр}}^2)$; n – число, l – длина, $d_{\text{тр}}$ – диаметр труб; D – диаметр теплообменника; T_1 , T_2 – температура теплоносителей в трубном и межтрубном пространствах на выходе теплообменного аппарата; k – коэффициент теплопередачи; F – поверхность теплопередачи, $F = \pi d_{\text{тр}} l$.

Начальные условия для уравнений (2.1), (2.2) заданы в виде:

$$T_1 = T_{10}, T_2 = T_{20} \text{ при } t = 0, \text{ где } t \text{ – время.}$$

Перепишем уравнения (2.1), (2.2) в следующем виде:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{\rho_1 V_1} \left(G_1 - \frac{kF}{c_1} \right) T_1 - \frac{G_1}{\rho_1 V_1} T_{\text{вх}} + \frac{kF}{\rho_1 c_1 V_1} T_2, \quad (2.3)$$

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{kF}{\rho_2 c_2 V_2} T_1 - \frac{1}{\rho_2 V_2} \left(G_2 + \frac{kF}{c_2} \right) T_2 + \frac{G_2}{\rho_2 V_2} T_0. \quad (2.4)$$

Введем обозначения:

$$a_1 = \frac{1}{\rho_1 V_1} \left(G_1 - \frac{kF}{c_1} \right); \quad b_1 = \frac{kF}{\rho_1 c_1 V_1}; \quad e_1 = \frac{G_1}{\rho_1 V_1} T_{\text{вх}}.$$

$$a_2 = \frac{1}{\rho_2 V_2} \left(G_2 + \frac{kF}{c_2} \right); \quad b_2 = \frac{kF}{\rho_2 c_2 V_2}; \quad e_2 = \frac{G_2}{\rho_2 V_2} T_0.$$

Теперь уравнения (2.3), (2.4) принимает вид:

$$\frac{dT_1}{dt} = a_1 T_1 + b_1 T_2 - e_1, \quad (2.5)$$

$$\frac{dT_2}{dt} = b_2 T_1 - a_2 T_2 + e_2. \quad (2.6)$$

Продифференцируем по t уравнение (2.5).

$$\frac{d^2 T_1}{dt^2} = a_1 \frac{dT_1}{dt} + b_1 \frac{dT_2}{dt} \quad (2.7)$$

Подставим в уравнение (2.7) значение производной $\frac{dT_2}{dt}$ из уравнения

(2.6). Получим:

$$\frac{d^2 T_1}{dt^2} = a_1 \frac{dT_1}{dt} + b_1 (b_2 T_1 - a_2 T_2 + e_2). \quad (2.8)$$

Вместо значения T_2 в данном уравнении, подставим его значение из уравнения (2.5).

$$T_2 = \frac{1}{b_1} \left(\frac{dT_1}{dt} - a_1 T_1 + e_1 \right) \quad (2.9)$$

Тогда уравнение (2.8) принимает вид

$$\frac{d^2 T_1}{dt^2} = a_1 \frac{dT_1}{dt} + b_1 b_2 T_1 - \frac{b_1 a_2}{b_2} \left(\frac{dT_1}{dt} - a_1 T_1 + e_1 \right) + b_1 e_2.$$

После преобразований данное уравнение запишется следующим образом.

$$\frac{d^2 T_1}{dt^2} = \left(a_1 - \frac{b_1 a_2}{b_2} \right) \frac{dT_1}{dt} + \left(b_1 b_2 + \frac{b_1 a_1 a_2}{b_2} \right) T_1 - \left(\frac{b_1 a_2}{b_2} e_1 - b_1 e_2 \right).$$

Отсюда следует уравнение в виде:

$$\frac{d^2 T_1}{dt^2} - A_1 \frac{dT_1}{dt} - B_1 T_1 + C_1 = 0. \quad (2.10)$$

$$\text{Здесь } A_1 = a_1 - \frac{b_1 a_2}{b_2}, \quad B_1 = b_1 b_2 + \frac{b_1 a_1 a_2}{b_2}, \quad C_1 = \frac{b_1 a_2}{b_2} e_1 - b_1 e_2.$$

Сначала решаем однородное уравнение (2.10).

$$\frac{d^2 T_1}{dt^2} - A_1 \frac{dT_1}{dt} - B_1 T_1 = 0.$$

$$\text{Его решение: } T_1 = g_1 e^{K_1 t} + g_2 e^{K_2 t}$$

$$\text{Дискриминант уравнения } D = A_1^2 - 4B_1;$$

Корни характеристического уравнения будут:

$$K_1 = \frac{A_1 + \sqrt{D}}{2}; \quad K_2 = \frac{A_1 - \sqrt{D}}{2}.$$

Решение неоднородного уравнения найдем методом вариации произвольных констант $g_1(t), g_2(t)$.

Составим систему уравнений

$$\begin{cases} e^{K_1 t} g_1(t) + e^{K_2 t} g_2(t) = 0; \\ K_1 e^{K_1 t} g_1'(t) + K_2 e^{K_2 t} g_2'(t) = -C_1(t). \end{cases}$$

Решаем систему уравнений по методу Крамера.

$$\Delta = \begin{vmatrix} e^{K_1 t} & e^{K_2 t} \\ K_1 e^{K_1 t} & K_2 e^{K_2 t} \end{vmatrix} = (K_2 - K_1) e^{(K_1 + K_2)t}$$

$$\Delta q_1' = \begin{vmatrix} 0 & e^{K_2 t} \\ -C_1 & K_2 e^{K_2 t} \end{vmatrix} = C_1 e^{K_2 t}$$

$$\Delta q_2' = \begin{vmatrix} e^{K_1 t} & 0 \\ K_1 e^{K_1 t} & -C_1 \end{vmatrix} = -C_1 e^{K_1 t}$$

$$q_1'(t) = \frac{\Delta q_1'}{\Delta} = \frac{C_1 e^{K_2 t}}{(K_2 - K_1) e^{(K_1 + K_2)t}} = \frac{C_1 e^{K_2 t} e^{-(K_1 + K_2)t}}{K_2 - K_1} = \frac{C_1 e^{-K_1 t}}{K_2 - K_1}$$

$$q_2'(t) = \frac{\Delta q_2'}{\Delta} = \frac{-C_1 e^{K_1 t} e^{-(K_1 + K_2)t}}{K_2 - K_1} = \frac{-C_1 e^{-K_2 t}}{K_2 - K_1}$$

Отсюда

$$q_1(t) = \frac{C_1}{K_2 - K_1} \int_0^t e^{-K_1 \tau} d\tau + q_{10} = -\frac{C_1 (e^{-K_1 t} - 1)}{K_1 (K_2 - K_1)} + q_{10} = \frac{C_1}{K_1 (K_2 - K_1)} (1 - e^{-K_1 t}) + q_{10}.$$

$$q_2(t) = \frac{-C_1}{K_2 - K_1} \int_0^t e^{-K_2 \tau} d\tau + q_{20} = \frac{C_1}{K_2 (K_2 - K_1)} (e^{-K_2 t} - 1) + q_{20}.$$

Решение уравнения примет вид

$$\begin{aligned} T_1(t) &= \left(\frac{C_1}{K_1 (K_2 - K_1)} (1 - e^{-K_1 t}) + q_{10} \right) e^{K_1 t} + \left(\frac{C_1}{K_2 (K_2 - K_1)} (e^{-K_2 t} - 1) + q_{20} \right) e^{K_2 t} = \\ &= \frac{C_1}{(K_2 - K_1)} \left[\frac{1 - e^{-K_1 t}}{K_1} e^{K_1 t} + \frac{e^{-K_2 t} - 1}{K_2} e^{K_2 t} \right] + q_{10} e^{K_1 t} + q_{20} e^{K_2 t} = \\ &= \frac{C_1}{K_1 K_2 (K_2 - K_1)} \left[K_2 (1 - e^{-K_1 t}) e^{K_1 t} + K_1 (e^{-K_2 t} - 1) e^{K_2 t} \right] + q_{10} e^{K_1 t} + q_{20} e^{K_2 t} = \\ &= \frac{C_1}{K_1 K_2 (K_2 - K_1)} \left[K_2 e^{K_1 t} - K_1 e^{K_2 t} - K_2 + K_1 \right] + q_{10} e^{K_1 t} + q_{20} e^{K_2 t}. \end{aligned} \tag{2.11}$$

Постоянные q_{10}, q_{20} найдем из начальных условий при $t = 0$

$$T_{10} = q_{10} + q_{20}. \text{ Отсюда } q_{10} = T_{10} - q_{20}.$$

Теперь найдем $T_2(t)$. Для этого используем уравнение (2.9).

Продифференцируем по t решение $T_1(t)$ (2.11):

$$\begin{aligned}\frac{dT_1}{dt} &= \frac{C_1}{K_1 K_2 (K_2 - K_1)} (K_1 K_2 e^{K_1 t} - K_1 K_2 e^{K_2 t}) + q_{10} K_1 e^{K_1 t} + q_{20} K_2 e^{K_2 t} = \\ &= \frac{C_1}{(K_2 - K_1)} (e^{K_1 t} - e^{K_2 t}) + (T_{10} - q_{20}) K_1 e^{K_1 t} + q_{20} K_2 e^{K_2 t} = \\ &= \frac{C_1}{(K_2 - K_1)} (e^{K_1 t} - e^{K_2 t}) + K_1 T_{10} e^{K_1 t} + q_{20} (K_2 e^{K_2 t} - K_1 e^{K_1 t}).\end{aligned}$$

Подставим значение этого выражения в уравнение (2.9)

$$\begin{aligned}T_2(t) &= \frac{1}{b_1} \left\{ \left[\frac{C_1}{K_2 - K_1} (e^{K_1 t} - e^{K_2 t}) + K_1 T_{10} e^{K_1 t} + q_{20} (K_2 e^{K_2 t} - K_1 e^{K_1 t}) \right] - \right. \\ &\left. - a_1 \left[\frac{C_1}{K_1 K_2 (K_2 - K_1)} [K_2 e^{K_1 t} - K_1 e^{K_2 t} - K_2 + K_1] + T_{10} e^{K_1 t} - q_{20} e^{K_1 t} + q_{20} e^{K_2 t} \right] + e_1 \right\}\end{aligned}$$

Постоянную q_{20} найдем из условия $T_2(0) = T_{20}$

$$T_{20} = \frac{1}{b_1} \{ K_1 T_{10} + q_{20} (K_2 - K_1) - a_1 T_{10} + e_1 \}$$

$$T_{20} b_1 = K_1 T_{10} - a_1 T_{10} + e_1 + q_{20} (K_2 - K_1)$$

$$q_{20} = \frac{T_{20} b_1 - (K_1 - a_1) T_{10} - e_1}{K_2 - K_1}$$

Тогда

$$\begin{aligned}T_1(t) &= \frac{C_1}{K_1 K_2 (K_2 - K_1)} [K_2 e^{K_1 t} - K_1 e^{K_2 t} - K_2 + K_1] + T_{10} e^{K_1 t} + q_{20} (e^{K_2 t} - e^{K_1 t}) = \\ &= \frac{C_1}{K_1 K_2 (K_2 - K_1)} [K_2 e^{K_1 t} - K_1 e^{K_2 t} - K_2 + K_1] + T_{10} e^{K_1 t} + \frac{T_{20} b_1 - (K_1 - a_1) T_{10} - e_1}{K_2 - K_1} (e^{K_2 t} - e^{K_1 t}) \\ T_2(t) &= \frac{1}{b_1} \left\{ \left[\frac{C_1}{K_2 - K_1} (e^{K_1 t} - e^{K_2 t}) + K_1 T_{10} e^{K_1 t} + q_{20} (K_2 e^{K_2 t} - K_1 e^{K_1 t}) \right] - \right. \\ &\left. - a_1 \left[\frac{C_1}{K_1 K_2 (K_2 - K_1)} [K_2 e^{K_1 t} - K_1 e^{K_2 t} - K_2 + K_1] + T_{10} e^{K_1 t} + q_{20} (e^{K_2 t} - e^{K_1 t}) \right] + e_1 \right\}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_2(t) &= \frac{1}{b_1} \left\{ \frac{C_1}{K_2 - K_1} (e^{K_1 t} - e^{K_2 t}) + (K_1 - a_1) T_{10} e^{K_1 t} + \right. \\
&+ \frac{T_{20} b_1 - (K_1 - a_1) T_{10} - e_1}{K_2 - K_1} (K_2 e^{K_2 t} - K_1 e^{K_1 t} - a_1 (e^{K_2 t} - e^{K_1 t})) - \\
&\left. - a_1 \frac{C_1}{K_1 K_2 (K_2 - K_1)} (K_2 e^{K_1 t} - K_1 e^{K_2 t} - K_2 + K_1) + e_1 \right\} \\
T_1(t) &= T_{10} e^{K_1 t} + \frac{1}{K_2 - K_1} \left[\frac{C_1}{K_1 K_2} (K_2 (e^{K_1 t} - 1) + K_1 (1 - e^{K_2 t})) + \right. \\
&\left. + (T_{20} b_1 - (K_1 - a_1) T_{10} - e_1) (e^{K_2 t} - e^{K_1 t}) \right] \tag{2.12}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_2(t) &= \frac{1}{b_1} \left\{ \frac{C_1}{K_2 - K_1} (e^{K_1 t} - e^{K_2 t}) + (K_1 - a_1) T_{10} e^{K_1 t} + \right. \\
&+ \frac{T_{20} b_1 - (K_1 - a_1) T_{10} - e_1}{K_2 - K_1} [(K_2 - a_1) e^{K_2 t} - (K_1 - a_1) e^{K_1 t}] - \\
&\left. - a_1 \frac{C_1}{K_1 K_2 (K_2 - K_1)} [K_2 (e^{K_1 t} - 1) + K_1 (1 - e^{K_2 t})] + e_1 \right\} \tag{2.13}
\end{aligned}$$

Коэффициент теплоотдачи в трубном пространстве определяется в зависимости от режима движения фракции: для горизонтального расположения

труб ($Re < 3500$):
$$Nu = 0.8 \left(Pe \frac{d}{l} \right)^{0.4} (Gr Pr)^{0.1} \left(\frac{\mu}{\mu_{ст}} \right)^{0.14}$$

при $20 \leq Pe \frac{d}{l} \leq 120$; $10^6 \leq Gr Pr \leq 1.3 \cdot 10^7$; $2 \leq Pr \leq 10$.

При $Re \geq 3500$:
$$Nu = 0.022 Re^{0.8} Pr^{0.4} \left(\frac{\mu}{\mu_{ст}} \right)^{0.14}; \quad Nu = \frac{\alpha d}{a}; \quad Re = \frac{\omega d}{\nu}; \quad Pr = \frac{\nu}{a}$$

$$Gr = \frac{ql^3 \beta \Delta T}{\nu^2}; \quad Pe = Re Pr; \quad \omega = \frac{G_F \pi d^2 n}{4 \cdot 3600 \cdot \rho_F},$$

где критерии: Nu - Нуссельта, Pr - Прандтля, Re - Рейнольдса, Gr - Грасгофа, Pe - Пекле, a - коэффициент температуропроводности, ω - скорость жидкости в трубе, d - диаметр труб, μ, ν - коэффициенты динамической и кинематической вязкости жидкости, $\mu_{ст}$ - коэффициент динамической вязкости при температуре стенки труб.

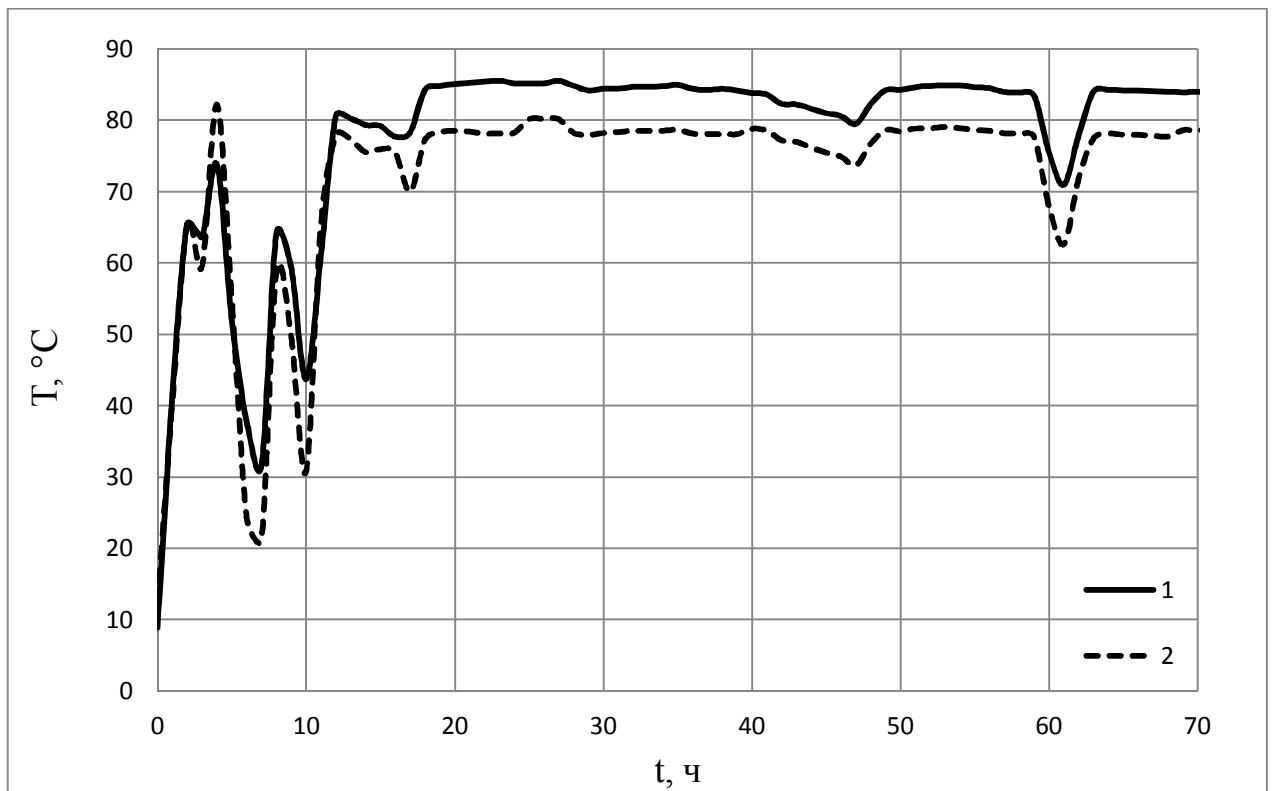


Рис. 2.13. Зависимость температуры ШФЛУ на выходе из подогревателя от времени в период пуска. 1 – экспериментальные значения, 2 – расчетные значения.

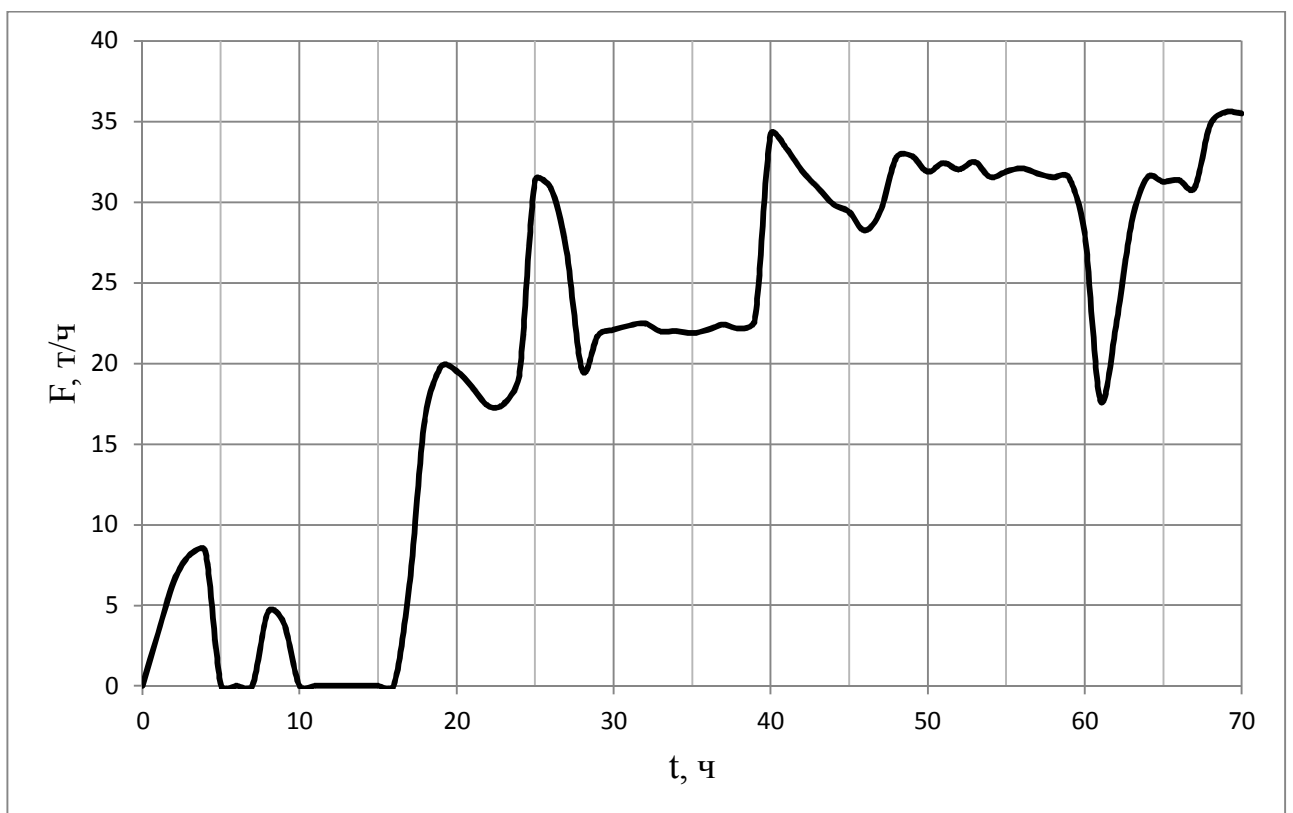


Рис. 2.14. Зависимость расхода закалочной воды в подогреватель Е-ЕА-132 от времени в период пуска.

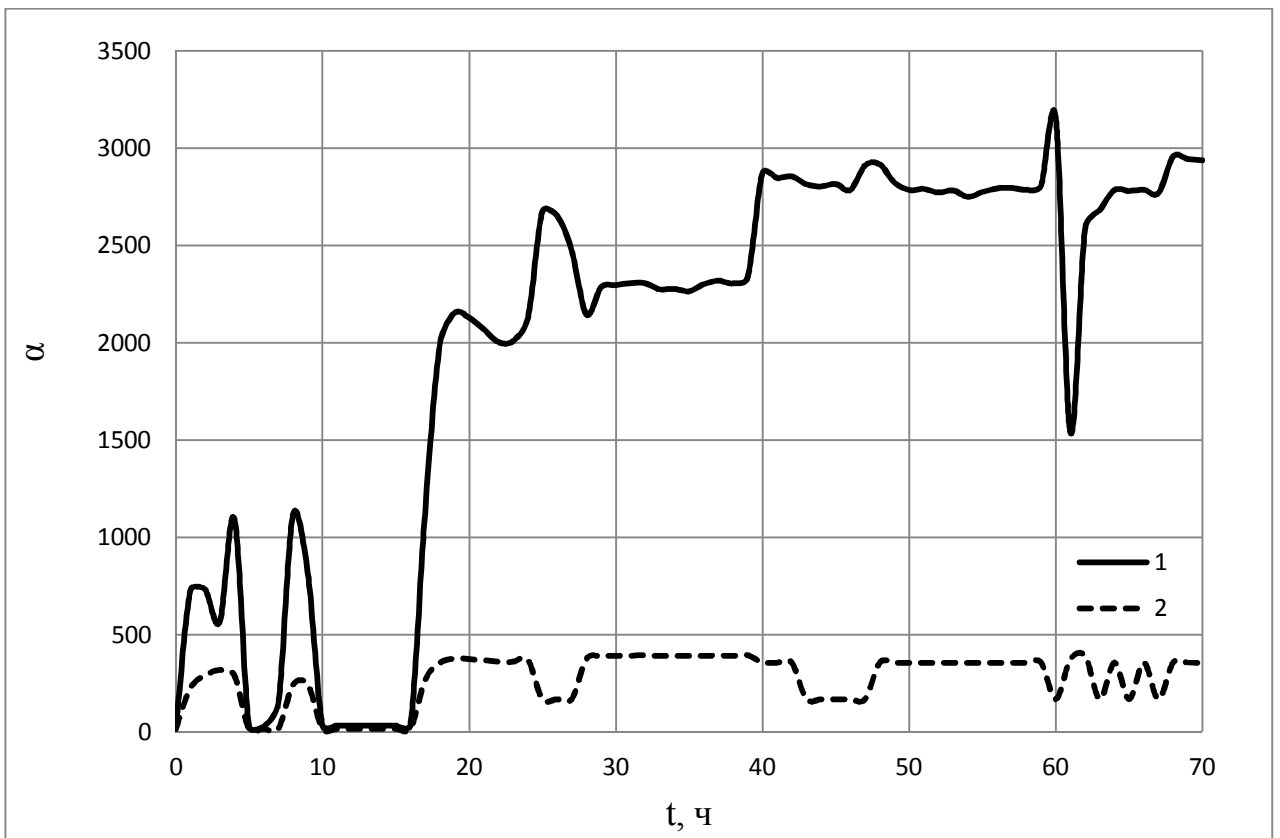


Рис. 2.15. Зависимость коэффициента теплоотдачи в подогревателе Е-ЕА-132 от времени в период пуска. 1 – межтрубное пространство; 2 – трубное пространство.

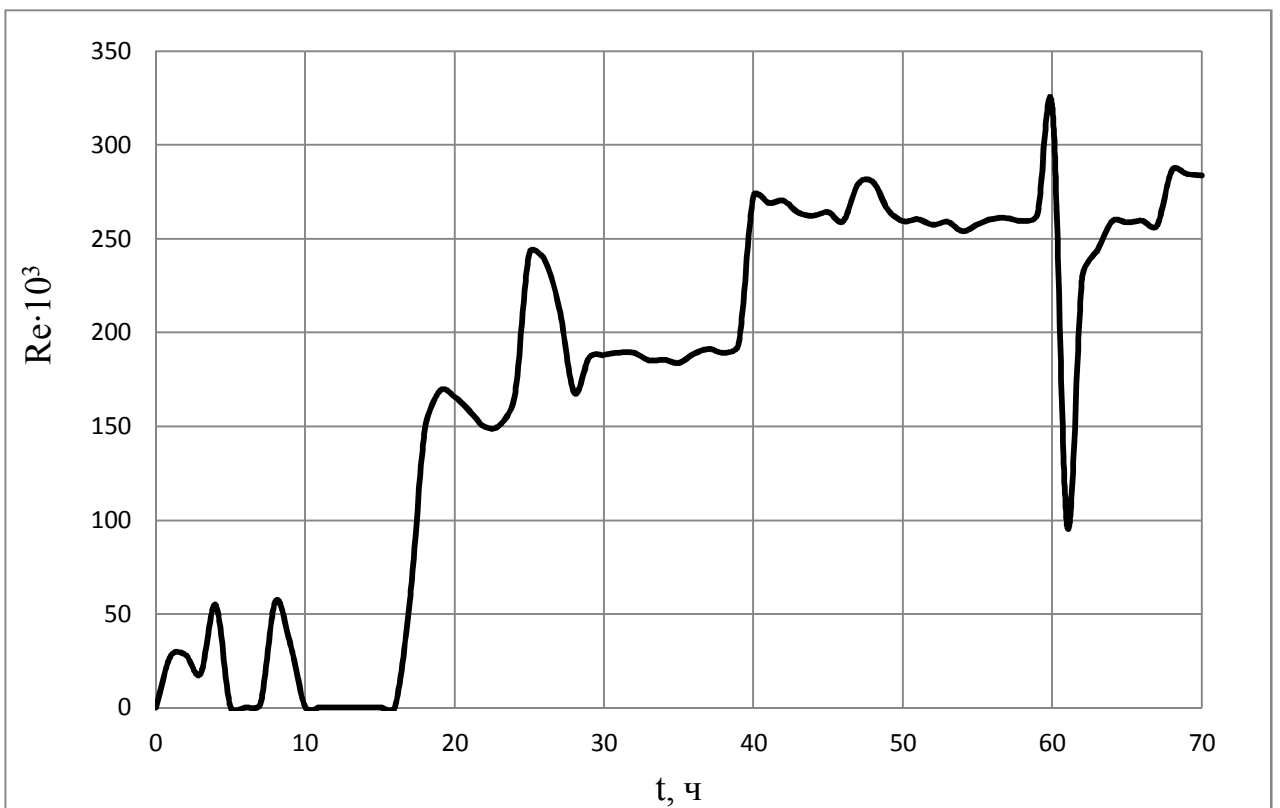


Рис. 2.16. Зависимость числа Рейнольдса в межтрубном пространстве подогревателя Е-ЕА-132 от времени в период пуска.

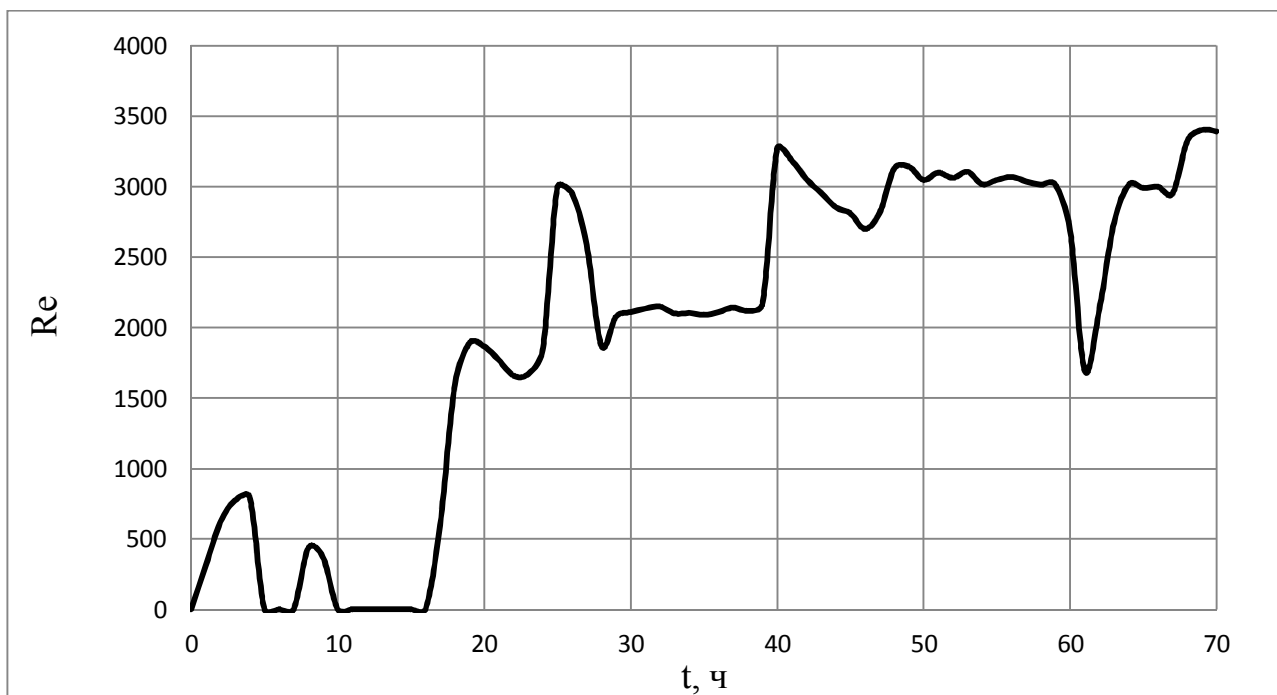


Рис. 2.17. Зависимость числа Рейнольдса в трубном пространстве подогревателя Е-ЕА-132 от времени в период пуска.

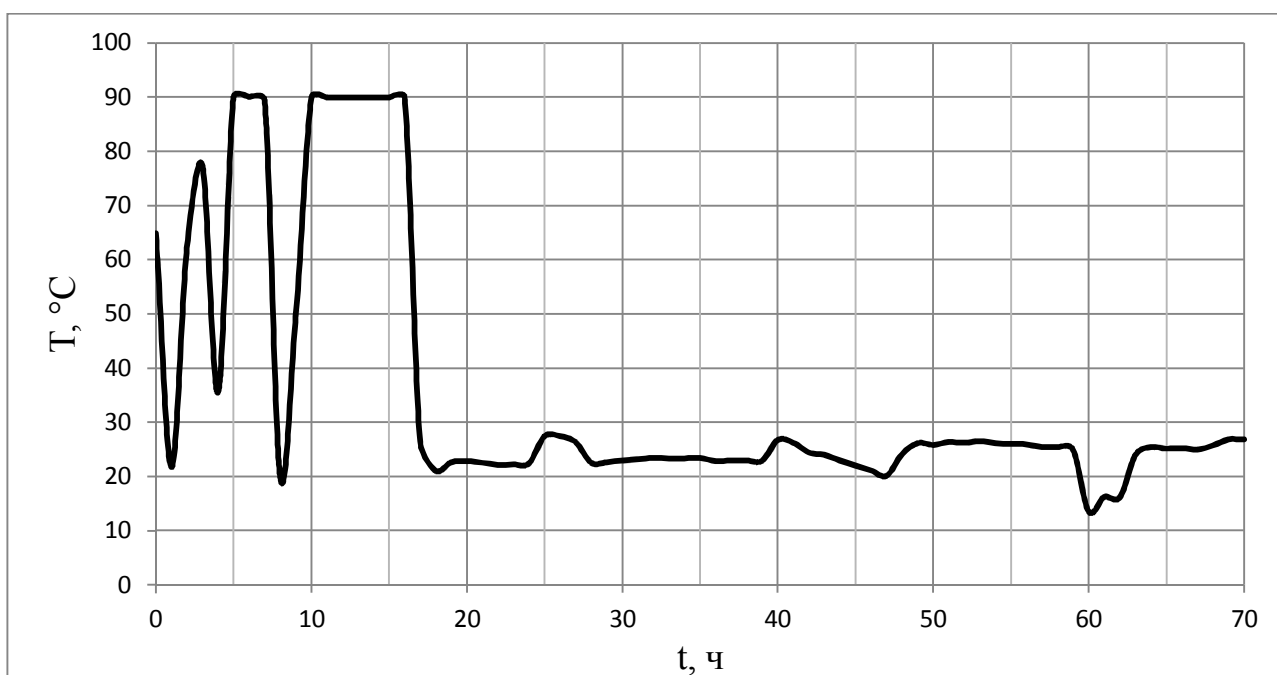


Рис. 2.18. Зависимость температуры закалочной воды на выходе из подогревателя Е-ЕА-132 от времени в период пуска.

На рис. 2.13 показано распределение температуры питания на выходе теплообменника от времени пуска и расходов питания (рис. 1.8) и закалочной воды (рис. 2.14). В расчет входит зависимость коэффициента теплоотдачи от времени в межтрубном и трубном пространстве (рис. 2.15) и зависимость числа

Рейнольдса от времени (рис. 2.16, 2.17). Зависимость температуры закалочной воды от времени в период пуска приводится на рис. 2.18.

Математическая модель колонны.

Давление паровой смеси на выходе подогревателя Е-ЕА-132 и в колонне Е-ДА-105 определяется как сумма парциального давления компонентов. Парциальное давление компонентов над жидкостью состава x_i согласно закону Рауля равно:

$$P_i = P_i^* x_i, \quad (2.14)$$

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 согласно закону Дальтона:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n P_i^* x_i. \quad (2.15)$$

где P - общее давление пара.

Поскольку давление в колонне достигает 9 кгс/см², то для расчета давления насыщенного пара i -го компонента, зависящего только от температуры используется уравнение Риделя-Планка-Миллера в виде [66]:

$$P_i^* = P_{ic} \exp \left\{ - \frac{G}{T_{ir}} \left[1 - T_{ir}^2 + k(3 + T_{ir})(1 - T_{ir})^3 \right] \right\} \quad (2.16)$$

Здесь $G = 0.4835 + 0.4065h^*$; $h^* = T_{ir}^b \frac{\ln P_{ic}}{1 - T_{ir}^b}$; $T_{ir} = T / T_{ic}$;

$$k = \frac{h^* / G - (1 - T_{ir}^b)}{(3 + T_{ir}^b)(1 - T_{ir}^b)^2}; \quad T_{ir}^b = T_{ib} / T_{ic}; \quad T - \text{температура пара, К}; \quad T_{ir} -$$

приведенная температура; T_{ir}^b - приведенная температура кипения; T_{ib} - нормальная температура кипения; T_{ic} , P_{ic} - критические температура и давление компонента.

Примем для расчета давления на выходе подогревателя уравнения (2.15) и (2.16). Концентрацию жидкого питания x_i , поступающего со склада, считаем постоянной. Продифференцируем уравнение (2.15) по времени:

$$\frac{dP}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{dP_i^*}{dt} x_i \quad (2.17)$$

Принимая зависимость давления насыщенного пара только от температуры, получим:

$$\frac{dP_i^*}{dt} = \frac{P_{ic} G}{T_{ic} T_{ir}^2} e^{\{o\}} \left\{ [o] + T_{ir} \left[2T_{ir} + k(1 - T_{ir})^3 + 3k(3 + T_{ir})(1 - T_{ir})^2 \right] \right\} \frac{dT}{dt}. \quad (2.18)$$

$$\text{Здесь } \{o\} = -\frac{G}{T_{ir}} \left[1 - T_{ir}^2 + k(3 + T_{ir})(1 - T_{ir})^3 \right],$$

$$[o] = 1 - T_{ir}^2 + k(3 + T_{ir})(1 - T_{ir})^3, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Продифференцируем уравнение (2.12) по t , получим:

$$\frac{dT_1}{dt} = K_1 T_{10} e^{K_1 t} + \frac{1}{K_2 - K_1} \left[C_1 (e^{K_1 t} - e^{K_2 t}) + [T_{20} b_1 - (K_1 - a_1) T_{10} - e_1] (K_2 e^{K_2 t} - K_1 e^{K_1 t}) \right]$$

Подставим значение производной $\frac{dT_1}{dt}$ температуры (2.12) в уравнение

(2.18), получим:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} = & \sum_{i=1}^n \frac{P_{ic} G}{T_{ic} T_{ir}^2} e^{\{o\}} \left\{ [o] + T_{ir} \left[2T_{ir} + k(1 - T_{ir})^3 + 3k(3 + T_{ir})(1 - T_{ir})^2 \right] \right\} \times \\ & \times \left\{ K_1 T_{10} e^{K_1 t} + \frac{1}{K_2 - K_1} \left[C_1 (e^{K_1 t} - e^{K_2 t}) + [T_{20} b_1 - (K_1 - a_1) T_{10} - e_1] (K_2 e^{K_2 t} - K_1 e^{K_1 t}) \right] \right\}. \end{aligned}$$

Изменение давления на выходе подогревателя на отрезке времени $dt = t_{j+1} - t_j$ запишется в виде:

$$\begin{aligned} P_{j+1} = & P_j + \left[\sum_{i=1}^n \frac{P_{ic} G x_i}{T_{ic} T_{irj}^2} e^{\{o\}_j} \left\{ [o]_j + T_{irj} \left[2T_{irj} + k(1 - T_{irj})^3 + 3k(3 + T_{irj})(1 - T_{irj})^2 \right] \right\} \right] \times \\ & \times \left\{ K_1 T_{10} e^{K_1 t} + \frac{1}{K_2 - K_1} \left[C_1 (e^{K_1 t} - e^{K_2 t}) + [T_{20} b_1 - (K_1 - a_1) T_{10} - e_1] (K_2 e^{K_2 t} - K_1 e^{K_1 t}) \right] \right\} dt, \quad (2.19) \end{aligned}$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, m.$$

Здесь $T_{ij} = T_{j+1} / T_{ic}$, T_{j+1} - значение температуры на выходе подогревателя, определяемое из уравнения (2.12). По уравнению (2.19) ведется набор давления на выходе из подогревателя в процессе пуска установки дебутанизации (рис. 2.19).

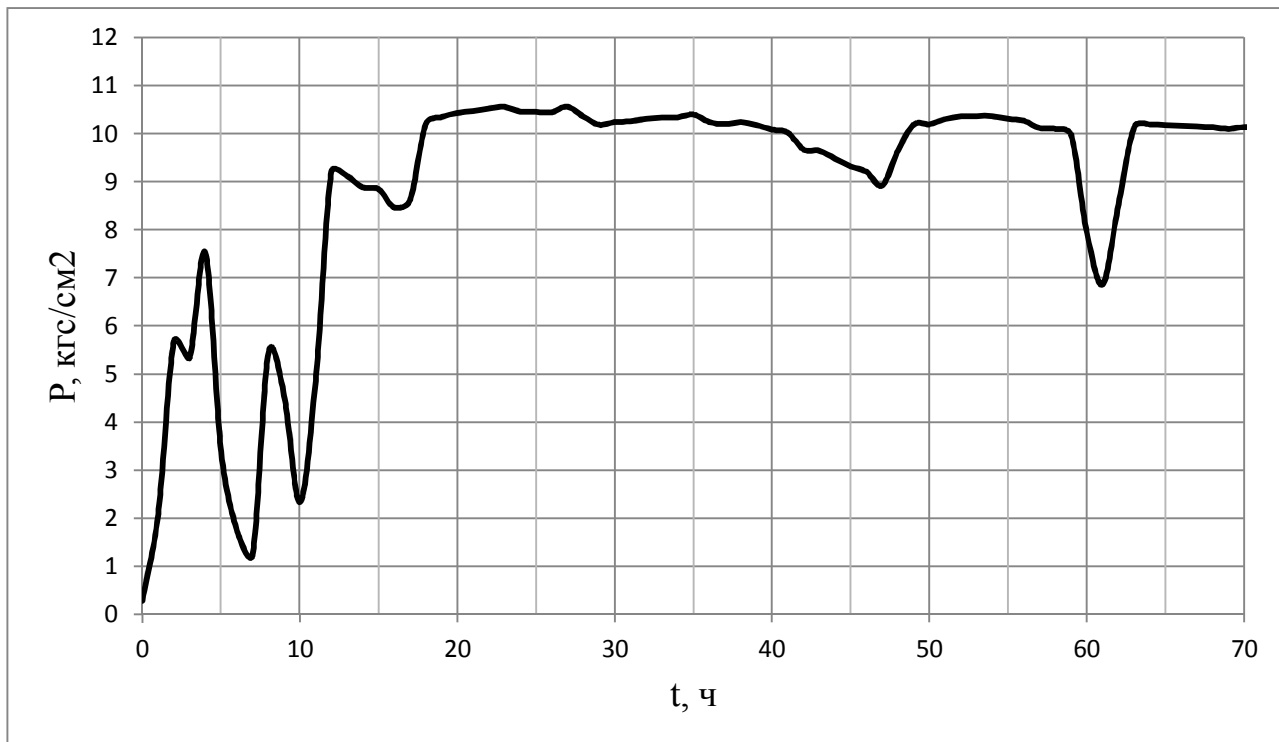


Рис. 2.19. Зависимость давления на выходе подогревателя E-EA-132 от времени в период пуска.

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 V в колонне: $Vr_{CM} = G_{ГП}r_{ГП}$, $\Rightarrow V = G_{ГП} \frac{r_{ГП}}{r_{CM}}$,

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:

$$V_0 \rho c_p \frac{dT_k}{dt} = (G_F(1-\varepsilon) + L)c_F T_1 - V r_{CM} - W c_w T, \quad W = 0 \forall V_0 \leq 0,45 V_k \quad (2.20)$$

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:

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

$$\text{Отсюда: } V_0(t) = \left(G_F(1-\varepsilon) - G_{ГП} \frac{r_{ГП}}{r_{CM}} - W \right) t + V_n, \quad (2.21)$$

здесь $V_0(t) = S H_k(t)$. S – сечение куба колонны, H_k – уровень жидкости в кубе.

Интегрируя уравнение (2.20) при начальном условии $T_k = T_{k0}$ при $t = t_0$ с учетом распределения температуры исходной смеси $T_1(t)$ из уравнения (2.12) и объема жидкости (2.21), получим значение температуры в кубе колонны $T_k(t)$.

Подставляя в уравнение (2.18) распределение температуры $T_k(t)$ и производной $dT/dt = dT_k/dt$ из уравнения (2.20) и (2.17), найдем давление в колонне. Управление расходами питания G_F , флегмы L , греющего пара в кипятильник колонны $G_{ГП}$, дистиллята G_{C3-C4} , кубового остатка G_D ведется в режиме ручного управления с помощью регуляторов и на отрезке времени $dt = t_{j+1} - t_j$ устанавливаются постоянными $G_F = \text{const}$, $L = \text{const}$, $G_{ГП} = \text{const}$, $G_{C3-C4} = \text{const}$, $G_D = \text{const}$.

Давление пара в колонне теперь определяется по температуре в зависимости от задаваемых расходов питания, флегмы и греющего пара в кипятильник колонны до тех пор, пока давление не достигнет заданного значения, а расход фракции C_3-C_4 станет равным заданному $G_{C_3-C_4} = 50 \text{ т/ч}$.

Результаты расчета давления в колонне E-DA-105 в период пуска приведены на рис. 2.20. Расположение расчетной кривой выше

экспериментальной объясняется тем, что при пуске установки давление свыше 9 кгс/см^2 сбрасывается на факел в автоматическом режиме. Данное условие не заложено в математическую модель расчета давления в колонне.

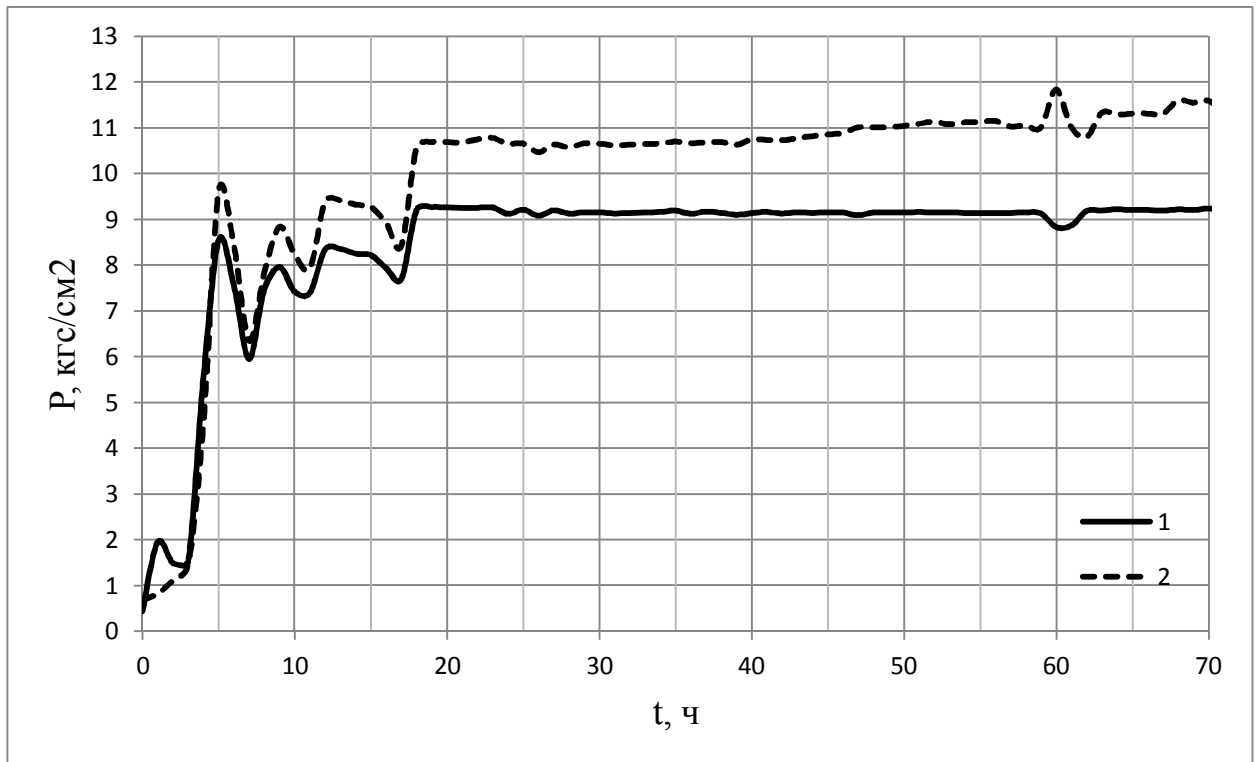


Рис. 2.20. Зависимость давления в колонне E-DA-105 от времени в период пуска. 1 – экспериментальные значения; 2 – расчетные значения.

Математическая модель флегмовой емкости (функциональный блок расчета уровня жидкости в емкости до отбора флегмы).

С начала пуска установки ведется отбор парового потока легких компонентов с верха колонны для конденсации в дефлегматоре и заполнения флегмовой емкости. Отбора продуктов из емкости нет.

Уравнение материального баланса записывается в виде:

$$S \frac{dH_L}{dt} = G_F \varepsilon, \quad (2.22)$$

где S - сечение емкости; H_L - уровень жидкости в флегмовой емкости; $G_F \varepsilon = V$ - расход конденсата парового потока из дефлегматора. Принимая на отрезке времени $dt = t_{j+1} - t_j$ расход питания постоянным $G_F = \text{const}$, решение

уравнения получим в виде: $H_{L(j+1)}(t) = H_{Lj} + \frac{G_F \varepsilon}{S} t$; $j = 0, 1, 2, \dots, m$.

При достижении уровня в флегмовой емкости $H_L = 0.35H_{L0}$ его расчет ведется по следующей математической модели:

$$S \frac{dH_L}{dt} = G_F \varepsilon (R + 1) - G_F \varepsilon - G_F \varepsilon R, \quad H_L(t_0) = H_L^0.$$

Здесь $R = 1.9$ - флегмовое число, определяется из расчета статики колонны, величина постоянная; $G_F \varepsilon = G_D$ - расход дистиллята (расход фракции C_3-C_4); $G_D R = L$ - расход флегмы. На отрезке времени dt уровень остается постоянным, поэтому $\frac{dH_L}{dt} = 0$, а с регуляторов FIC4 и FIC5 поступает на исполнительный механизм управление – (открыть регулирующие органы) на величину: $x_{Li} = L_i / k_L$ - степень открытия клапана на подаче флегмы; $x_{Di} = G_{(C_3-C_4)i} / k_D$ - степень открытия клапана на потоке фракции C_3-C_4 на пиролиз. Здесь k_L, k_D - коэффициенты расхода регулирующих органов FCV4 и FCV5.

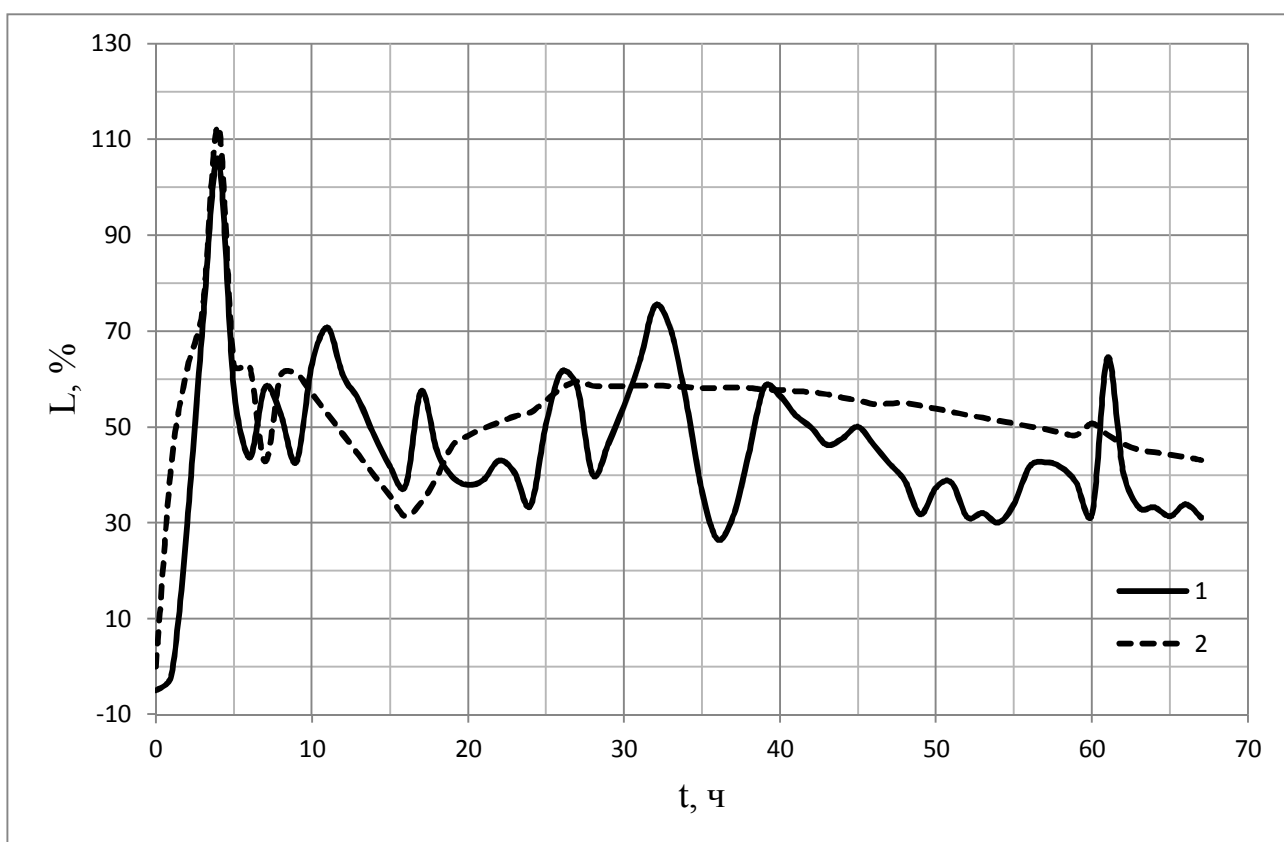


Рис. 2.21. Зависимость уровня в флегмовой емкости E-FA-130 от времени в период пуска. 1 – экспериментальные значения; 2 – расчетные значения.

Математические модели регулирующих органов. (функциональные блоки расчета степеней открытия регулирующих клапанов)

Статические характеристики регулирующих органов имеют близкий к линейному характер, поэтому расход протекающей жидкости или пара пропорционален степени открытия регулирующего органа. Зависимость расходов от степени открытия регулирующих органов аппроксимируется линейными функциями:

$$G = kx, \quad (2.23)$$

где G - расход продукта (т/ч); x - степень открытия регулирующего органа (%); k - коэффициент пропорциональности рассматриваемого регулирующего органа ($k = G / x$).

Математическая модель степени открытия регулирующих органов в каждый момент времени записывается следующим образом:

- расхода питания: $x_F = G_F / k_F$;
- расхода закалочной воды: $x_{ЗВ} = G_{ЗВ} / k_{ЗВ}$;
- расхода флегмы: $x_L = L / k_L$;
- расхода фракции С₃-С₄: $x_D = G_{С3-С4} / k_D$;
- расхода греющего пара: $x_{ГП} = G_{ГП} / k_{ГП}$;
- расхода кубового остатка: $x_K = G_K / k_K$.

Здесь $k_F, k_B, k_L, k_D, k_{П}, k_K$ - коэффициенты расхода питания, воды, флегмы, дистиллята, пара, кубового остатка, величины постоянные.

На рис. 2.22-2.27 приведены экспериментальные зависимости расходов продуктов от степени открытия регулирующих органов, установленных на трубопроводах технологической схемы.

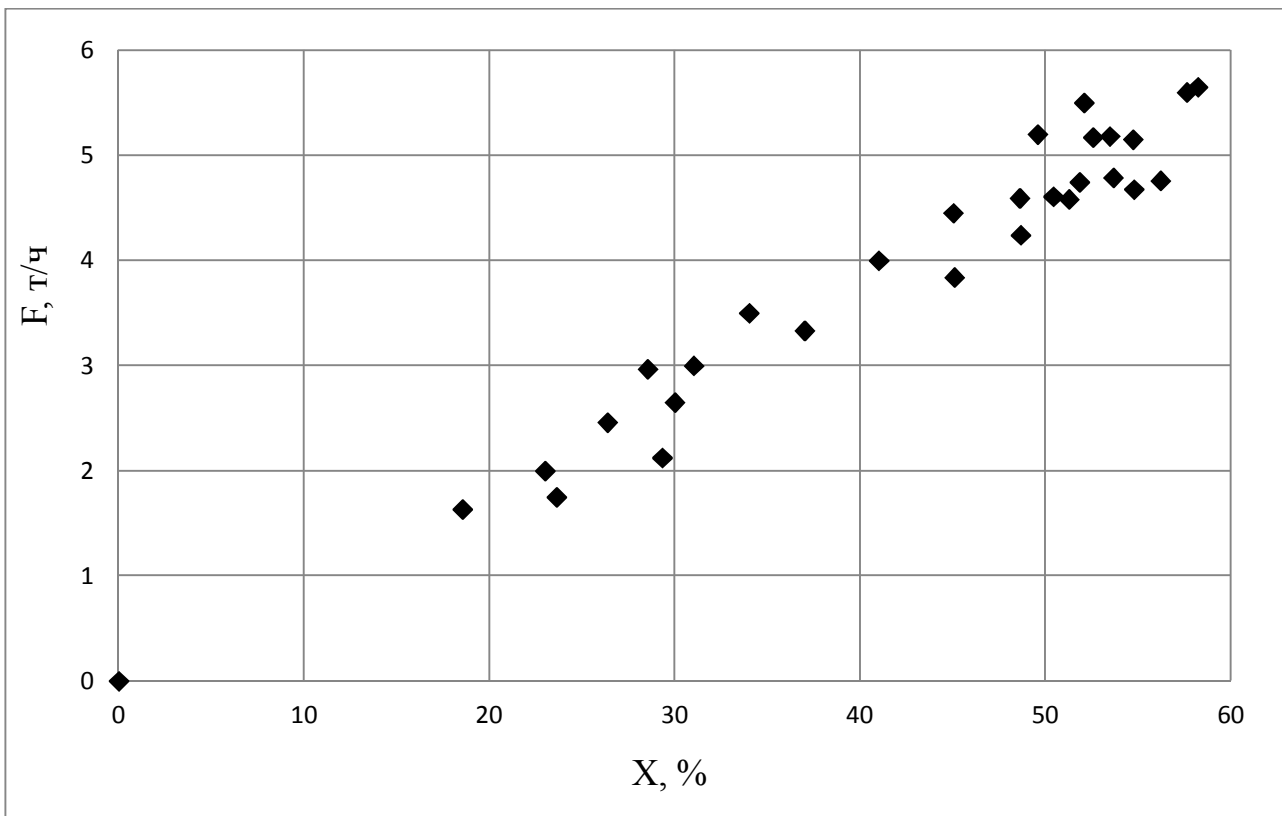


Рис. 2.22. Зависимость расхода кубового остатка из колонны поз. E-DA-105 от степени открытия регулирующего клапана FCV1. Коэффициент пропорциональности $k = 0.1$.

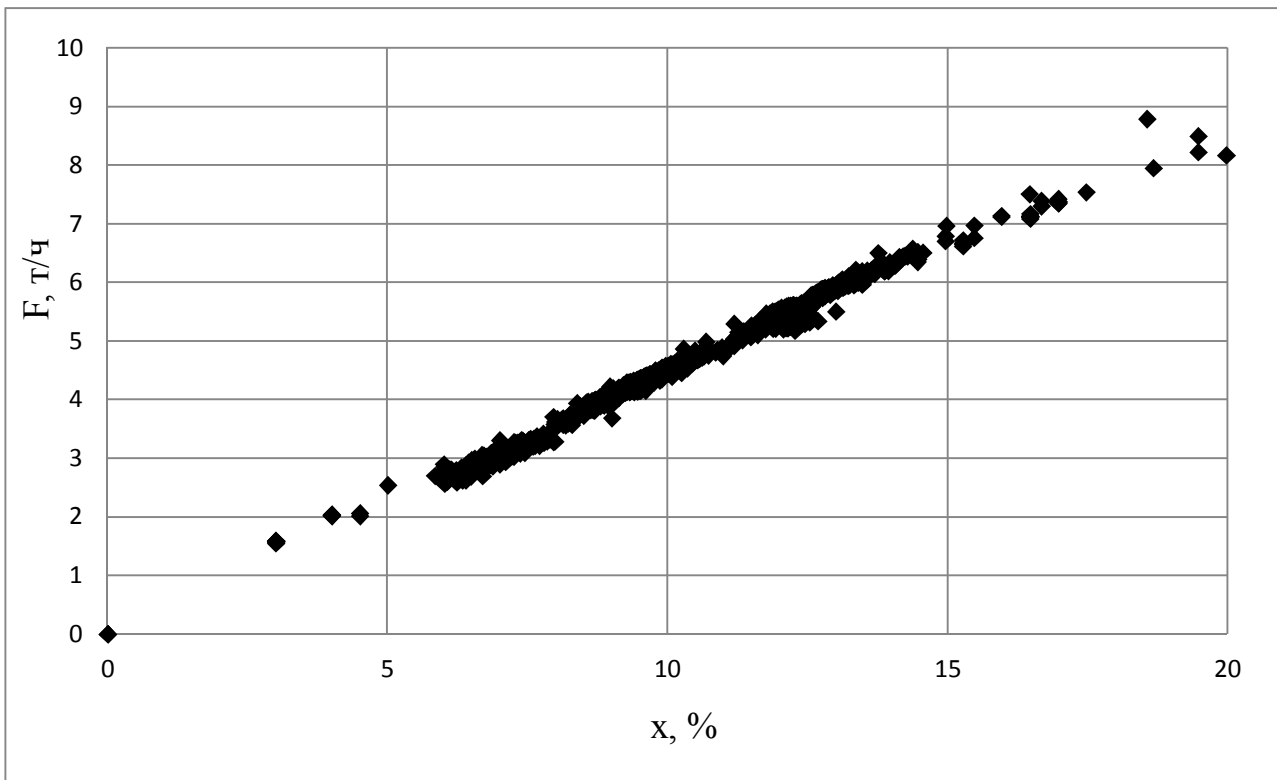


Рис. 2.23. Зависимость расхода пара в кипятильник поз. E-EA-131 от степени открытия регулирующего клапана FCV2. Коэффициент пропорциональности $k = 0.45$.

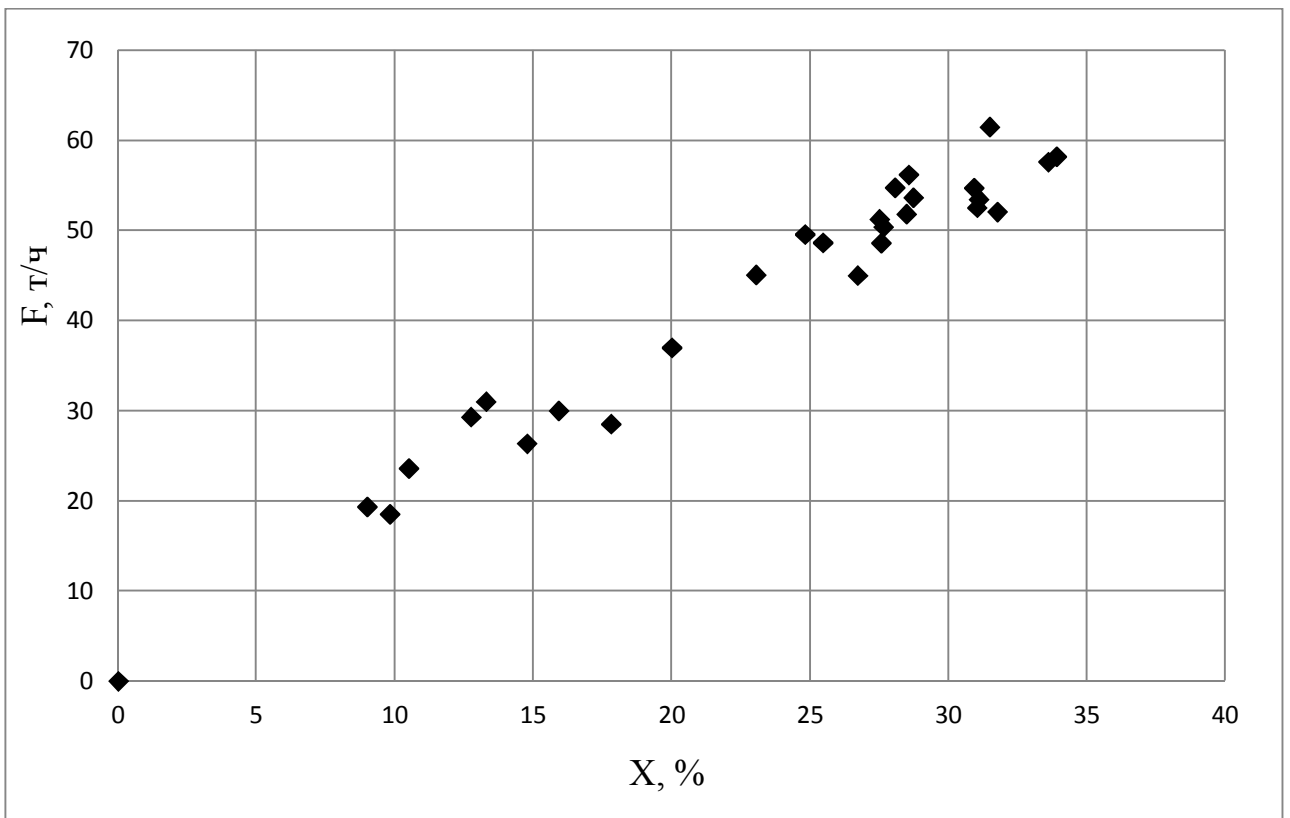


Рис. 2.24. Зависимость расхода питания в колонну поз. E-DA-105 от степени открытия регулирующего клапана FCV3. Коэффициент пропорциональности $k = 1.85$.

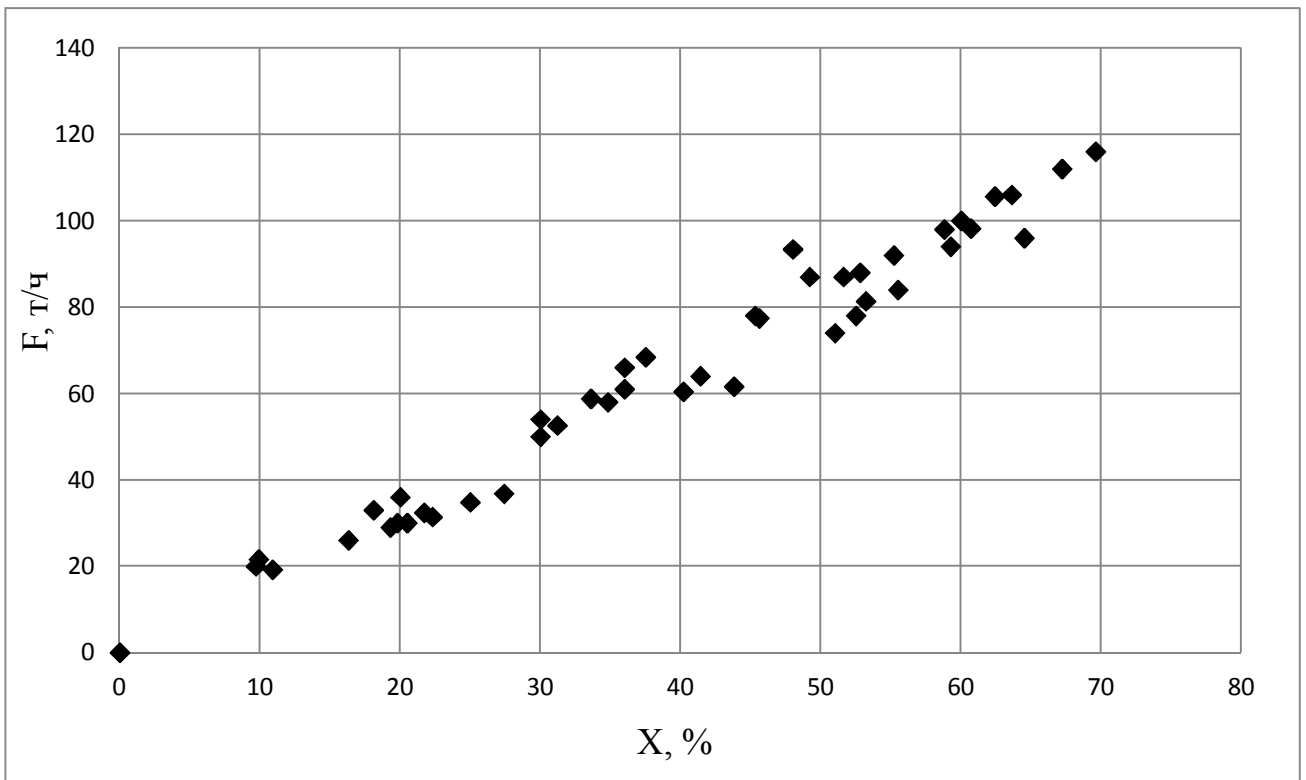


Рис. 2.25. Зависимость расхода флегмы в колонну поз. E-DA-105 от степени открытия регулирующего клапана FCV4. Коэффициент пропорциональности $k = 1.5$.

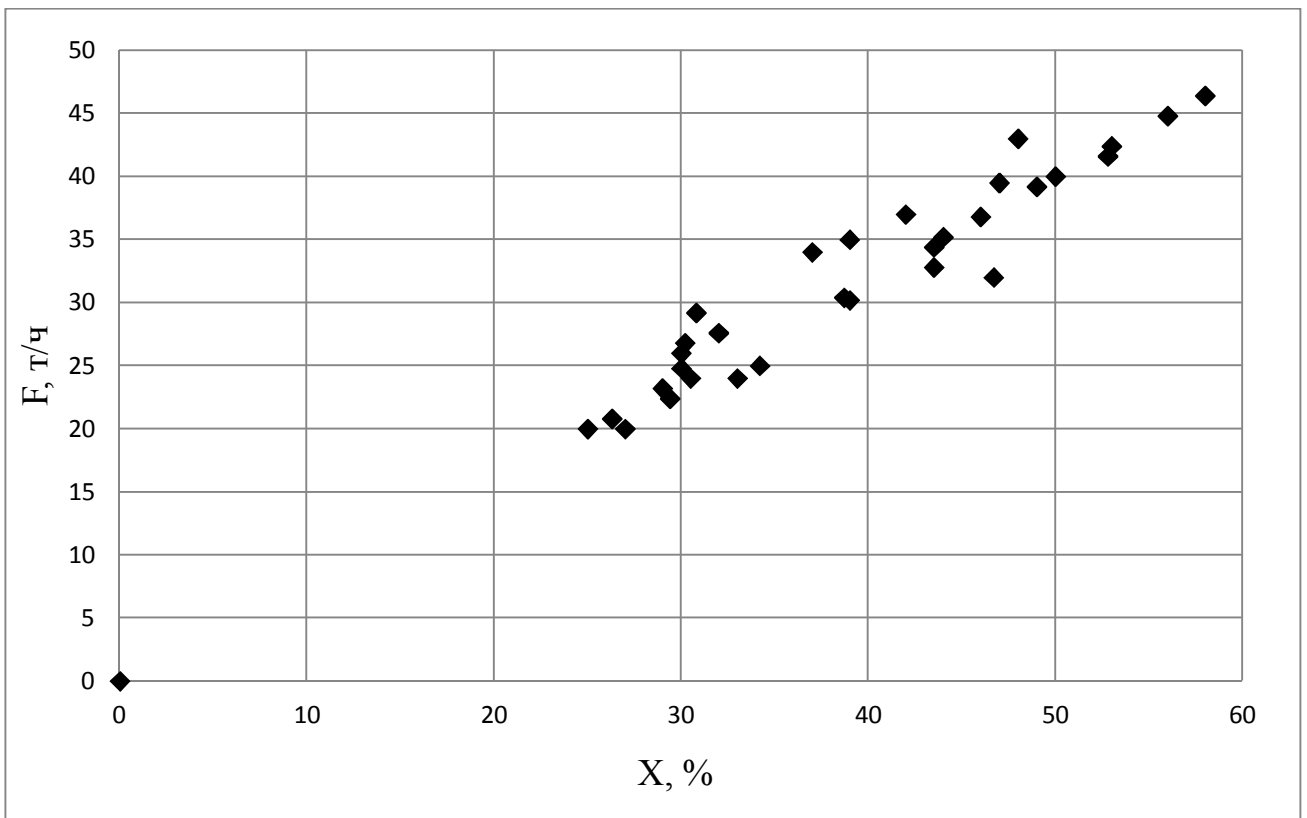


Рис. 2.26. Зависимость расхода фракции C₃-C₄ от степени открытия регулирующего клапана FCV5. Коэффициент пропорциональности $k = 0.8$

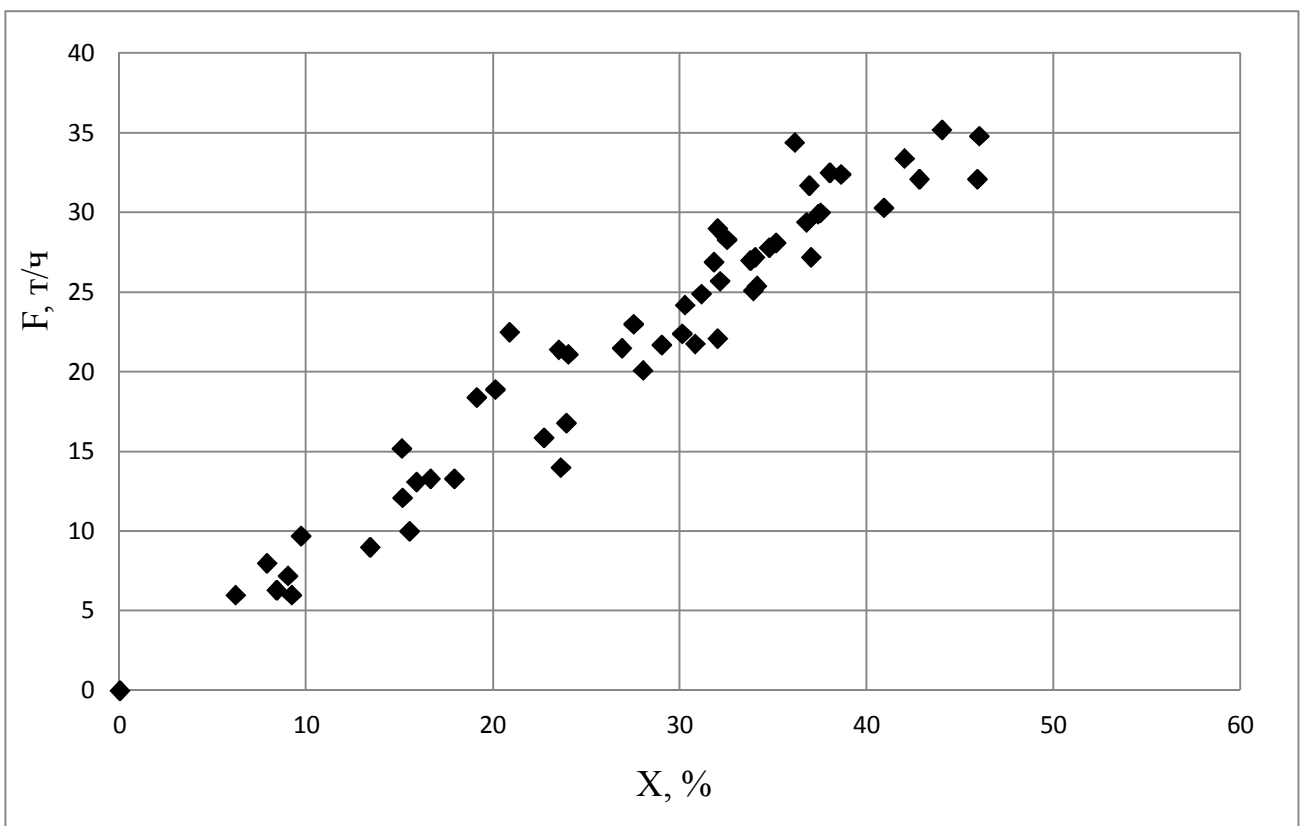


Рис. 2.27. Зависимость расхода закалочной воды в подогреватель поз. Е-ЕА-132 от степени открытия регулирующего клапана TCV2. Коэффициент пропорциональности $k = 0.8$.

Выводы

1. Разработаны математические модели нестационарных режимов пуска основных технологических аппаратов установки дебутанизации углеводородов, интегрированные в алгоритм управления компьютерного тренажера

2. По аналогии с технологией конфигурирования контроллеров в АСУТП, обычно на языке функциональных блоков (FBD), предложен метод моделирования химико-технологических систем (ХТС). Математическая модель включает помимо системы управления, технологическое и вспомогательное оборудование, связанное между собой технологическими и информационными потоками.

3. Математическая модель ХТС построена на языке непрерывных функциональных схем (НФС) и представляет собой связанные между собой входными и выходными параметрами функциональные блоки. Функциональные блоки – суть математические модели динамических процессов пуска и останова технологических аппаратов, вспомогательного оборудования и систем управления ХТС.

4. Конфигурирование ХТС на языке НФС проводится с помощью разработанной программы – конструктора, в которой представлены типовые функциональные блоки и их математические модели.

5. Проведена классификация функциональных блоков: блок моделирования регулирующего клапана, блок моделирования ручной арматуры, блок моделирования ПИД-регулятора, универсальный блок. Рассматривается перечень параметров каждого функционального блока.

6. В рамках процесса конфигурации ХТС предложены условные обозначения параметров функциональных блоков, изложены принципы написания программного кода, в том числе в части обращения к параметрам функциональных блоков. Приведены алгоритмы сопряжения функциональных блоков, показаны стандартный и упрощенный способ обращения к параметрам функциональных блоков в программном коде.

7. Приводится конфигурирование типовых ХТС: контур регулирования расхода; емкости с контурами регулирования уровня и расхода продукта; теплообмена с контуром каскадного регулирования.

8. Проведено исследование установки дебутанизации углеводородов и на основе предложенного подхода сконфигурирована НФС данного узла. НФС узла дебутанизации углеводородов используется при разработке тренажерного комплекса по обучению промышленного персонала.

9. Предложенный метод моделирования ХТС используется при разработке математических моделей, алгоритмов управления и тренажерных комплексов, внедренных на производствах ПАО «Нижнекамскнефтехим» (Приложение №3).

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

В данной главе предложен метод разработки компьютерных тренажеров, в котором реализованы рассмотренные математические модели для управления технологическим процессом при обучении промышленного персонала нефтехимических производств на примере установки разделения углеводородов завода «Этилен-600» ПАО «Нижекамскнефтехим». Приведены этапы разработки компьютерного тренажера на уровнях визуализации, функциональных блоков, разработки сценариев, а также алгоритм работы всего комплекса под управлением модуля обработки сценариев. Описан пользовательский интерфейс разработанного программного комплекса. Рассмотрен подробный перечень действий по пуску узла разделения углеводородов.

3.1. Метод разработки компьютерных тренажеров для обучения персонала.

Этапы разработки

Рассмотрим метод и этапы разработки тренажерного комплекса [161-165].

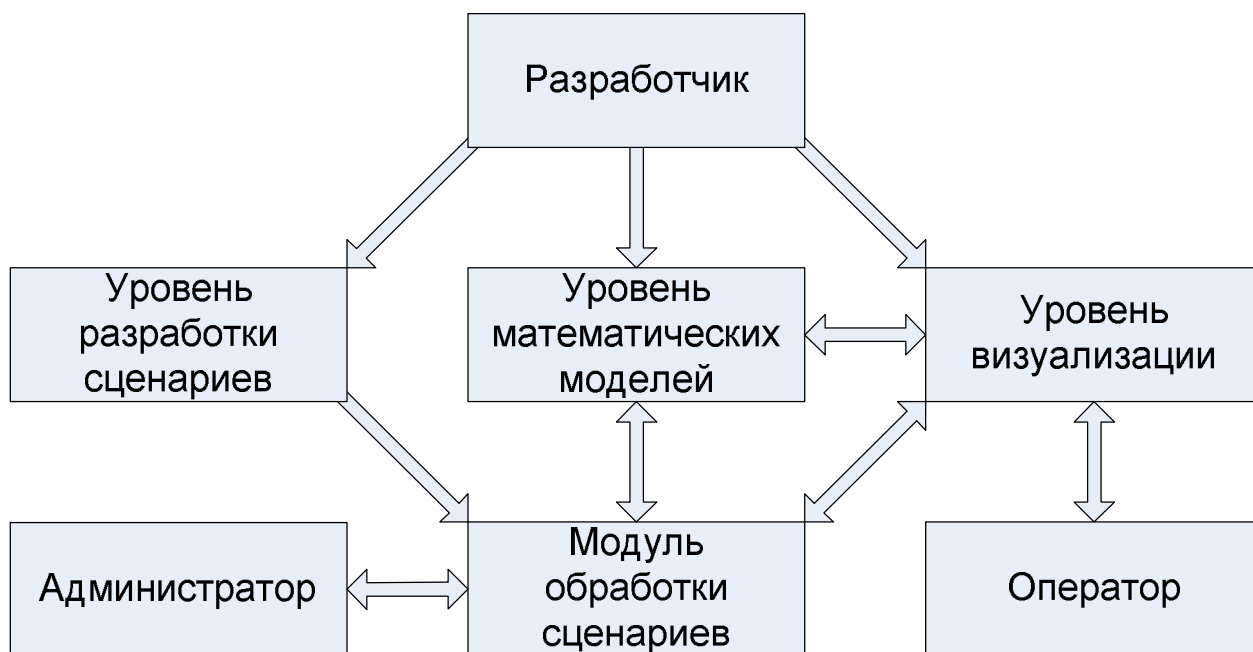


Рис. 3.1. Структурная схема компьютерного тренажерного комплекса

На структурной схеме тренажерного комплекса представлены основные компоненты системы и их связь между собой (рис. 3.1). Комплекс состоит из

трех подсистем/уровней, на которых осуществляется разработка: уровень визуализации технологических схем, уровень разработки математических моделей и уровень разработки сценариев. На каждом из уровней разработчиком реализуются определенные функции.

3.1.1. Уровень визуализации технологических схем

Одним из важнейших наглядных этапов разработки компьютерного тренажера является этап визуализации рабочего места оператора. Важность данного этапа объясняют несколько причин. Во-первых, данный уровень является «лицом» всего комплекса и поэтому продуманный интерфейс является неотъемлемой частью подобного продукта. Во-вторых, только данный уровень демонстрирует пользователям и заказчикам степень разработки комплекса. В-третьих, оператор работает с системой через графический интерфейс, а о принципах функционирования остальных частей комплекса ему не нужно знать и задумываться.

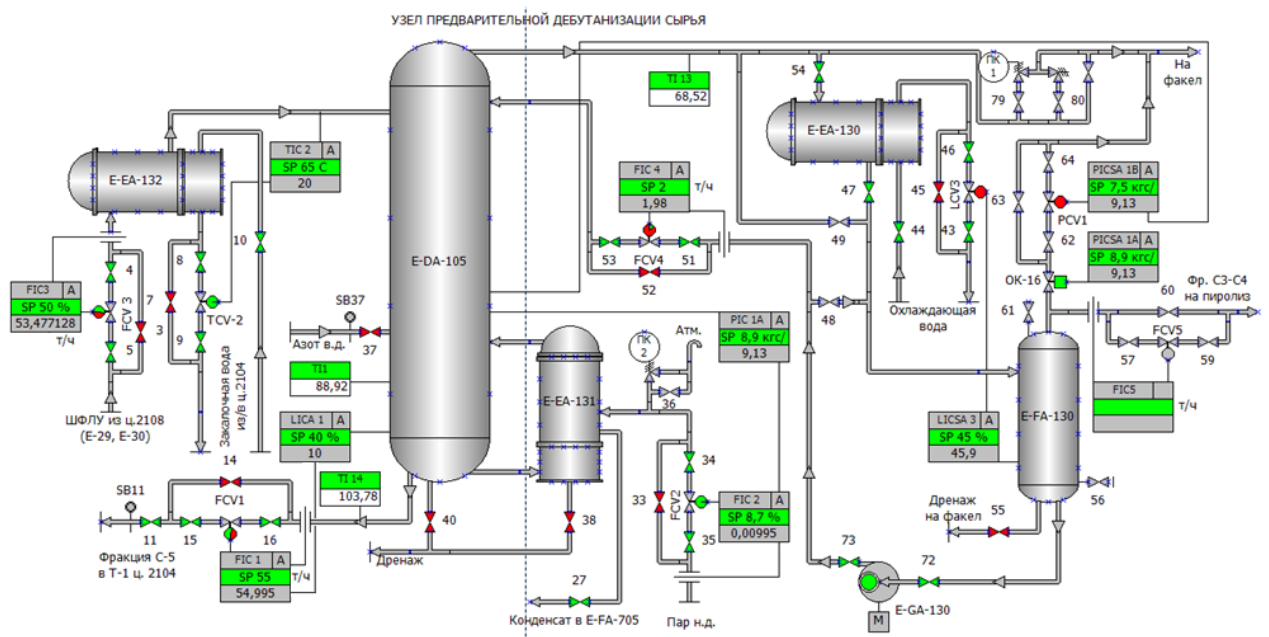


Рис. 3.2. Мнемосхема узла дебутанизации углеводородов

На данном этапе происходит создание графической оболочки (рис. 3.2), которая в SCADA-системах называется мнемосхемой. Мнемосхема создается на основании технологической схемы узла из имеющегося набора стандартных визуальных элементов, а также окон контроля и управления. В ходе управления

технологическим узлом аппаратчикам приходится выполнять множество действий вручную по месту. Поэтому на разрабатываемой мнемосхеме также размещаются все неавтоматизированные элементы управления технологическим процессом, такие как ручная арматура. Разработанная мнемосхема является основным объектом, с которым работает обучаемый.

3.1.2. Уровень математических моделей

На данном уровне происходит разработка математической модели ХТС дебутанизации углеводородов на языке непрерывных функциональных схем (НФС) [160]. НФС состоит из функциональных блоков, правила конфигурирования которых приводятся в гл. 2.

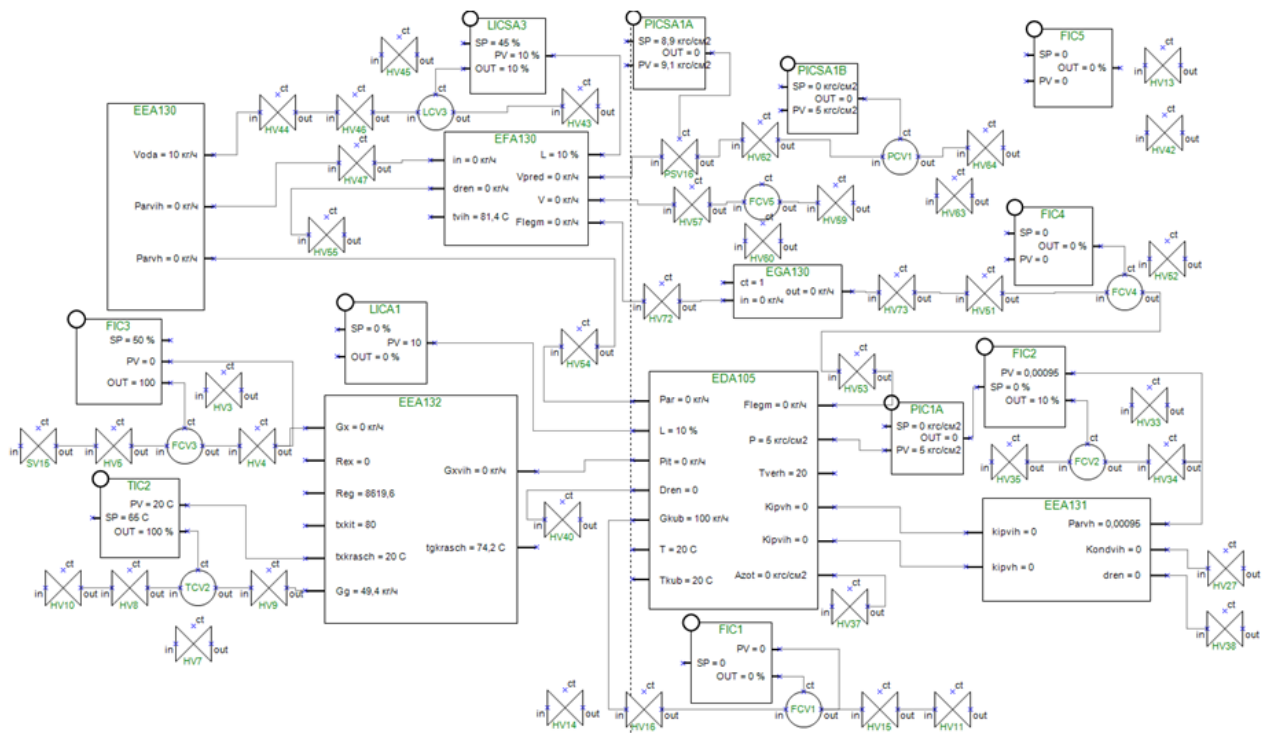


Рис. 3.3. Конфигурация ХТС дебутанизации углеводородов в виде непрерывной функциональной схемы

Отличием конфигурирования ХТС при разработке тренажерного комплекса является необходимость введения в схему всех неавтоматизированных элементов (ручных арматур, заглушек). НФС ХТС дебутанизации углеводородов, используемая в тренажерном комплексе, приведена на рис. 3.3 [166-168].

Разработчик отлаживает математическую модель непосредственно на НФС. На ней отображаются все технологические параметры и имеется возможность изменения режимов работы модели. Для этого открывается требуемый функциональный блок и выбирается параметр, значение которого необходимо изменить. Затем меняется численное значение поля Value и нажимается кнопка ОК (рис. 3.5).

Оператор не имеет доступа к уровню математических моделей и работает с тренажером только на уровне визуализации. При этом на мнемосхему необходимо выводить моделируемые технологические параметры (температуры, давления, расходы, уровни и т.д.) и начальные состояния управляющих элементов (ручные арматуры, регулирующие клапаны, регуляторы и т.д.), а пользователю необходимо предоставить инструменты управления технологическим процессом. Требуется «оживить» мнемосхему, которая без динамических элементов является статической картинкой. Для этого уровень визуализации объединяется с уровнем математических моделей: между функциональными блоками и визуальными элементами создаются связи, набор которых зависит от типа визуального объекта (табл. 3.1). Расшифровка названий параметров приводится в гл. II.

Таблица 3.1 – Список связей для визуальных элементов

Тип визуального элемента	Список связей
Ручная арматура, кнопка управления насосом, отсечной клапан, электроздвижка	Ct.Value
Регулирующий клапан	Ct.Value Auto.Value
Регулятор	Sp.Value Pv.Value Out.Value Auto.Value
Элемент отображения технологического параметра: температура, давление, расход, уровень	T.Value P.Value F.Value L.Value

Для подключения визуального элемента к функциональному блоку необходимо совершить нажатие правой кнопкой мыши по выбранному визуальному элементу и из появившегося списка выбрать пункт «set_parameter»

(рис. 3.4). В появившемся окне выбора параметров находится список всех функциональных блоков, имеющихся на НФС (рис. 3.5). Разработчик выбирает нужный блок и нажатием на его имя выводит на экран список всех параметров блока. Нажатием левой кнопкой мыши по нужному параметру разработчик создает связь между визуальным элементом и функциональным блоком (между уровнем визуализации и уровнем математических моделей). Выбор нескольких параметров осуществляется последовательно. В определенных случаях для одного визуального элемента выбираются параметры из разных блоков. После окончания процедуры выбора нажимается кнопка ОК. Список связей для выбранного визуального элемента приводится на рис. 3.6. Таким образом, создаются связи для всех визуальных элементов.

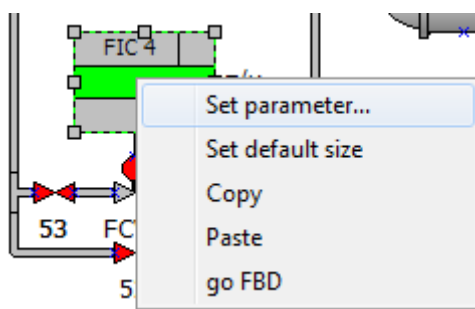


Рис. 3.4. Окно свойств визуального элемента

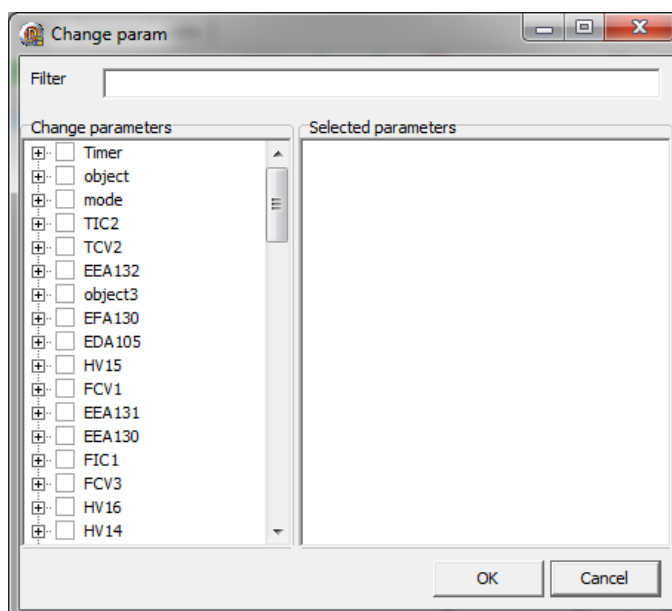


Рис. 3.5. Окно выбора функциональных блоков

Связь уровней является двусторонней. 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 арматуры, 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.

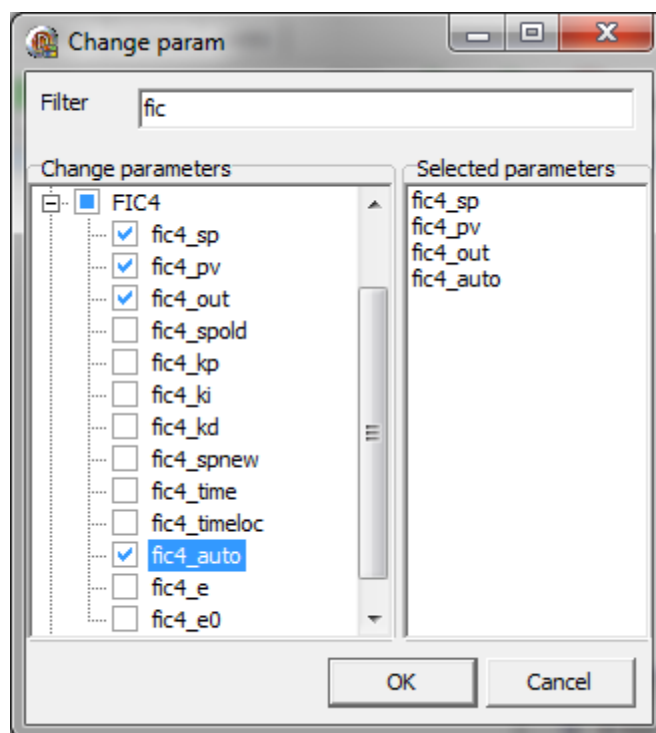


Рис. 3.6. Окно выбора параметров функционального блока



3.1.3. Уровень разработки сценариев

Разработка сценариев является ключевым этапом создания тренажерного комплекса. Концепция тренажерного комплекса такова, что пользователю в ходе обучения необходимо освоить перечень действий, определенных технологическим регламентом. Технологический регламент по своей сути является сценарием, программой обучения.

Для каждого технологического процесса технологический регламент устанавливает определенный набор действий, сценариев, тестов. Типовой набор действий оператора согласно технологическому регламенту включает

следующие тесты: подготовка к пуску, пуск, ведение технологического процесса в нормальных условиях, останов.

Согласно технологическому регламенту технологическая схема разбивается на отдельные блоки. Для каждого блока по плану ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС) разрабатывается определенный набор тестов [169-171].

Добавление теста осуществляется нажатием кнопки , а кнопка  добавляет раздел в тесте. Каждый тест состоит из двух разделов: инициализации и действий пользователя. Раздел разбивается на перечень отдельных действий, которые шаг за шагом выполняет система или пользователь. Каждое действие состоит из нескольких заполняемых полей: Caption, Interval, Parameter, Type, Value (рис. 3.7).

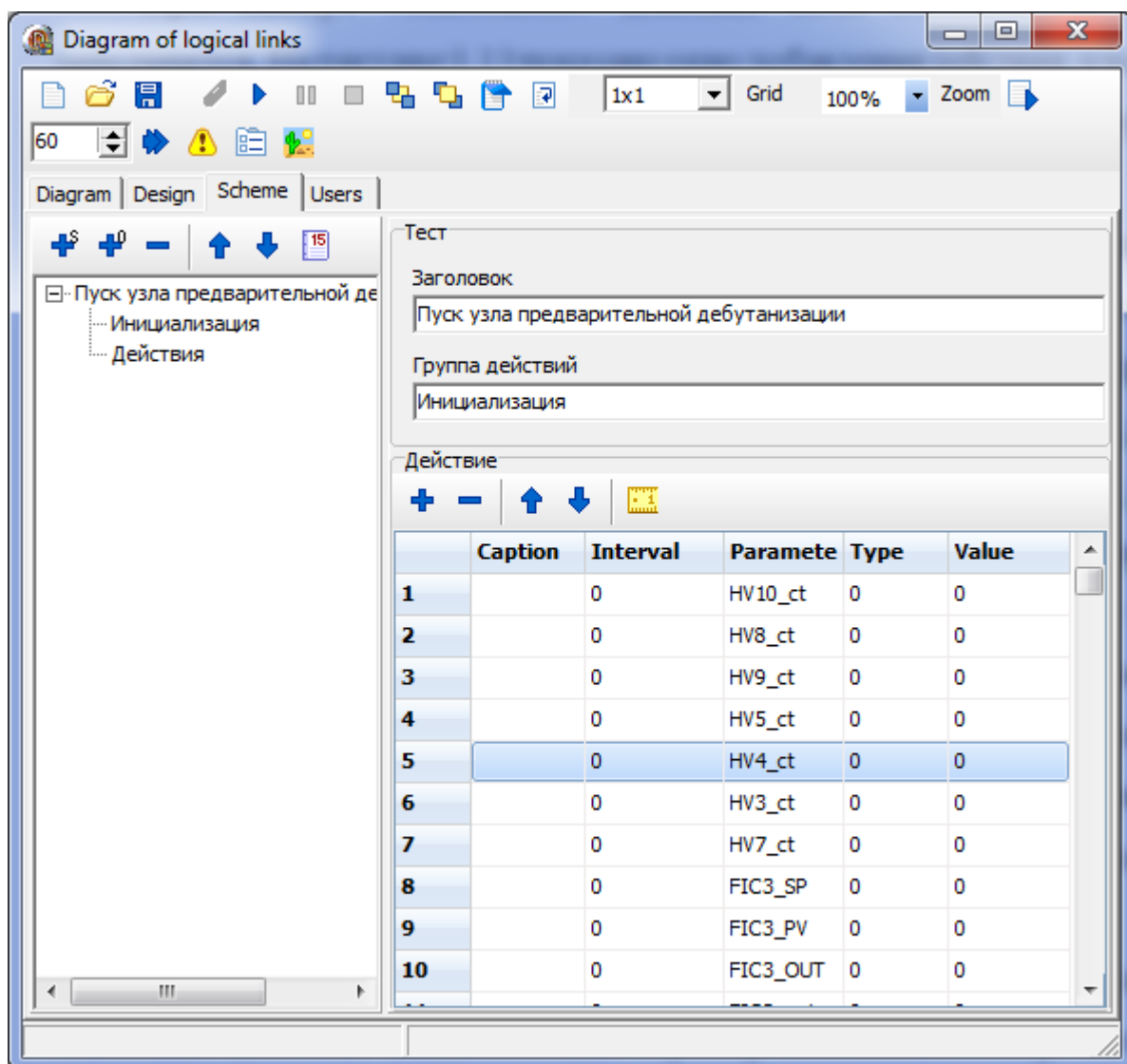



Рис. 3.7. Окно разработки сценариев

Для добавления действия нажимается кнопка  и в появившемся окне заполняются все поля (рис. 3.8). Заполненный перечень действий приведен на рис. 3.9 и в приложении 2.

Caption – текстовое описание выполняемого действия, которое используется разработчиком в процессе отладки программы и при составлении инструкции по эксплуатации компьютерного тренажера. В процессе обучения пользователя записанное текстовое действие отображается в окне подсказок и заносится в отчет о выполнении теста.

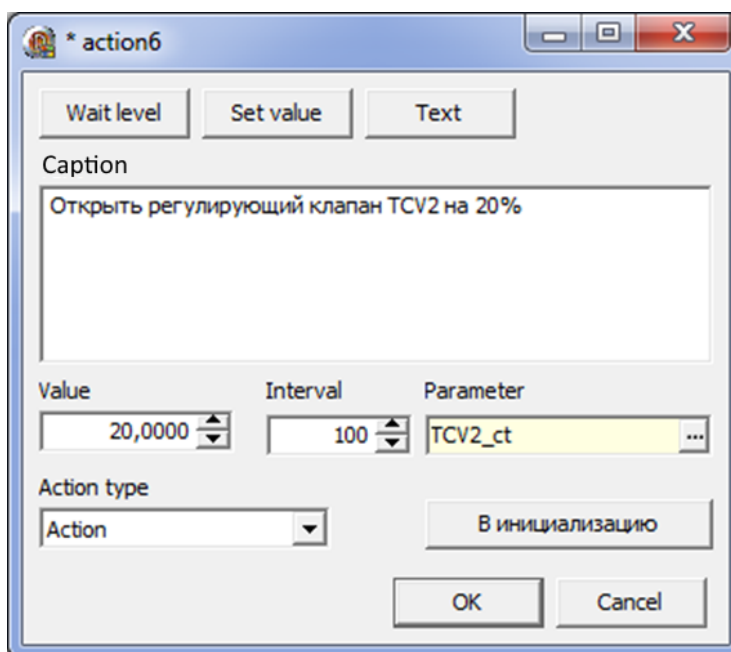


Рис. 3.8. Окно добавления действия

В поле Interval при необходимости выставляется время, за которое пользователю необходимо выполнить данное действие. Данный пункт реализуется в соответствии с пожеланиями конкретного заказчика.

В поле Type выбирается тип действия: 0 – инициализация, 1 – текстовое действие, 2 – активное действие, 3 – ожидание и т.д.

В поле Parameter заносится параметр функционального блока, с которым необходимо совершить действие. Например, для открытия арматуры или регулирующего клапана – параметр Ct, для выставления уставки регулятора – параметр Sp и т.д. Выбор параметра функционального блока осуществляется аналогично выбору параметра при создании связи функционального блока и визуального элемента (рис. 3.5-3.6).

В поле Value заносится численное значение, которому выбранный параметр должен соответствовать после выполнения действия или с которым будет происходить сравнение.

Описание действий, выполняемых пользователем, приведено в описании интерфейса оператора. Отдельно следует отметить действия по инициализации, выполняемые системой.

	Caption	Interval	Paramete	Type	Value
1	Принять закалочную воду в подогреватель сырья поз. E-EA-132	60		1	0
2	Открыть ручную арматуру №10	60	HV10_ct	2	1
3	Открыть ручную арматуру №8	60	HV8_ct	2	1
4	Открыть ручную арматуру №9	60	HV9_ct	2	1
5	Открыть регулирующий клапан TCV2 на 20%	60	TCV2_ct	2	20
6	По согласованию с цехом №2108 принять сырье (ШФЛУ) в колонну поз. E-DA-105	60		1	0
7	Открыть ручную арматуру №5	60	HV5_ct	2	1
8	Открыть ручную арматуру №4	60	HV4_ct	2	1
9	Открыть регулирующий клапан FCV3 на 20%	60	FCV3_ct	2	20
10	Задать уставку регулятору TIC2 равную 65°C	60	TIC2_SP	2	65
11	Перевести регулятор TIC2 в автоматический режим работы	60	TIC2_auto	2	1
12	Задать уставку регулятору FIC3 равную 50 т/ч	60	FIC3_SP	2	50000
13	Перевести регулятор FIC3 в автоматический режим работы	60	FIC3_auto	2	1

Рис. 3.9. Перечень выполняемых действий

Перед выполнением теста все оборудование должно быть приведено в определенное состояние, например, предпусковое. Для этого выставляются соответствующие этому состоянию значения всех технологических параметров (температуры, давления, расходы, уровни и т.д.), состояния управляющих элементов (насосов, арматур, регулирующих клапанов и т.д.), состояния регуляторов (значения уставок, режим работы и т.д.).

В поле Type для каждого действия указывается его тип – Init. В полях Parameter и Value указываются необходимый параметр и его значение. В поле Interval заносится число ноль. Количество действий соответствует количеству инициализируемых параметров.

В процессе загрузки теста система автоматически выполняет все действия по инициализации. Пример заполненного перечня действий по инициализации узла дебутанизации углеводородов представлен на рис. 3.7 и в приложении 2.

3.1.4. Модуль обработки сценариев

Модуль обработки сценариев объединяет уровни визуализации, математических моделей и разработки сценариев в единую систему (рис. 3.1). С уровнем математического моделирования и уровнем визуализации он имеет двухстороннюю связь, тогда как с уровнем разработки сценариев – одностороннюю.

После запуска теста пользователь приступает к выполнению действий. Как видно из структурной схемы (рис. 3.1), оператор работает только с подсистемой визуализации. Модуль обработки сценариев получает с уровня разработки сценариев действие, стоящее первым в списке. После получения действия модуль обработки сценариев находится в режиме ожидания. Пользователь выполняет активное действие, которое сравнивается с действием, полученным с уровня разработки сценариев. Если они совпадают, то действие засчитывается как верно выполненное и заносится в отчет о выполнении теста. В связи с тем, что пользователь совершил действие, и оно оказалось верным, выполненное действие в качестве управляющего сигнала поступает на уровень математических моделей. На данном уровне происходит изменение режима работы функциональных блоков в соответствии с поступившим управляющим сигналом, что отражается на уровне визуализации. В это время с уровня разработки сценариев на модуль обработки сценариев поступает следующее действие, и модуль обработки сценариев вновь переходит в режим ожидания.

Если пользователь совершает неверное действие, то модуль обработки сценариев вырабатывает ошибку, которая появляется в окне подсказок и заносится в отчет о прохождении теста. При этом уровень математических моделей на данное действие никак не реагирует, так как действие, выполненное на уровне визуализации, передается на уровень математических моделей только в случае получения разрешающего сигнала от модуля обработки сценариев. Таким образом, формируется жесткая структура выполнения теста.

Если в тесте заложено время на выполнение действия, то по истечении данного времени модуль обработки сценариев автоматически выполняет

данное действие и посылает управляющий сигнал на уровень математических моделей. Пользователь может пропустить любое из выполняемых действий. Для этого он нажимает кнопку «Пропустить». В этом случае модуль обработки сценариев также автоматически выполняет пропущенное действие. Все действия, выполняемые пользователем, заносятся в отчет о выполнении теста. Таким образом, пользователь шаг за шагом выполняет все действия, прописанные в тесте.

3.2. Разработка интерактивного пользовательского интерфейса тренажера

3.2.1. Описание интерфейса оператора

Работа с системой тренажер начинается с процедуры аутентификации (рис. 3.10). Из выпадающего списка необходимо выбрать имя пользователя. Для добавления нового пользователя необходимо нажать на кнопку «Новый пользователь». В появившемся окне «Выбор пользователя» необходимо нажать на кнопку «+» и в окне «New» заполнить поля ФИО, группа и должность, после чего нажать кнопку «ОК» (рис. 3.11).

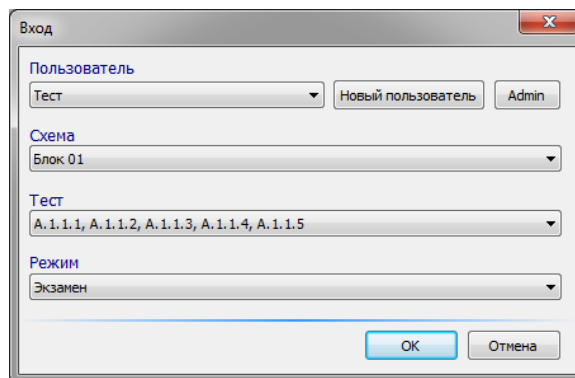


Рисунок 3.10. Окно входа в систему

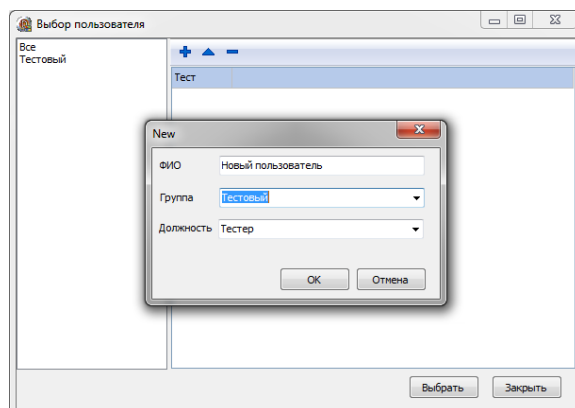


Рисунок 3.11. Добавление нового пользователя

После аутентификации из списка узлов/блоков требуется выбрать необходимую технологическую схему. Далее происходит выбор конкретного теста из существующих для данной технологической схемы. Последним действием является выбор режима тестирования: демонстрационный, учебно-тренировочный, экзаменационный.

В режиме демонстрации все действия выполняются автоматически, а пользователь выступает в качестве наблюдателя. Данный режим предназначен для ознакомления пользователя с работой тренажера.

Учебно-тренировочный режим приближен к экзаменационному. Перед выполнением каждого действия пользователю даются указания. При выполнении ошибочного действия на экран выводится правильное действие. Результаты обучения не записываются в базу данных и не учитываются экзаменатором при оценке действий обучаемого. В учебно-тренировочном режиме время на выполнение каждого действия не ограничивается.

Режим экзамена максимально приближен к реальным условиям. Каждое ошибочное действие заносится в отчет о выполнении теста (рис. 3.21), который сохраняется в базе данных.

После нажатия кнопки «ОК» появляется окно загрузки схемы (рис. 3.12). Длительность загрузки может занять несколько минут. После загрузки схемы перед пользователем появляется окно общего вида (рис. 3.13).



Рисунок 3.12. Окно загрузки схемы

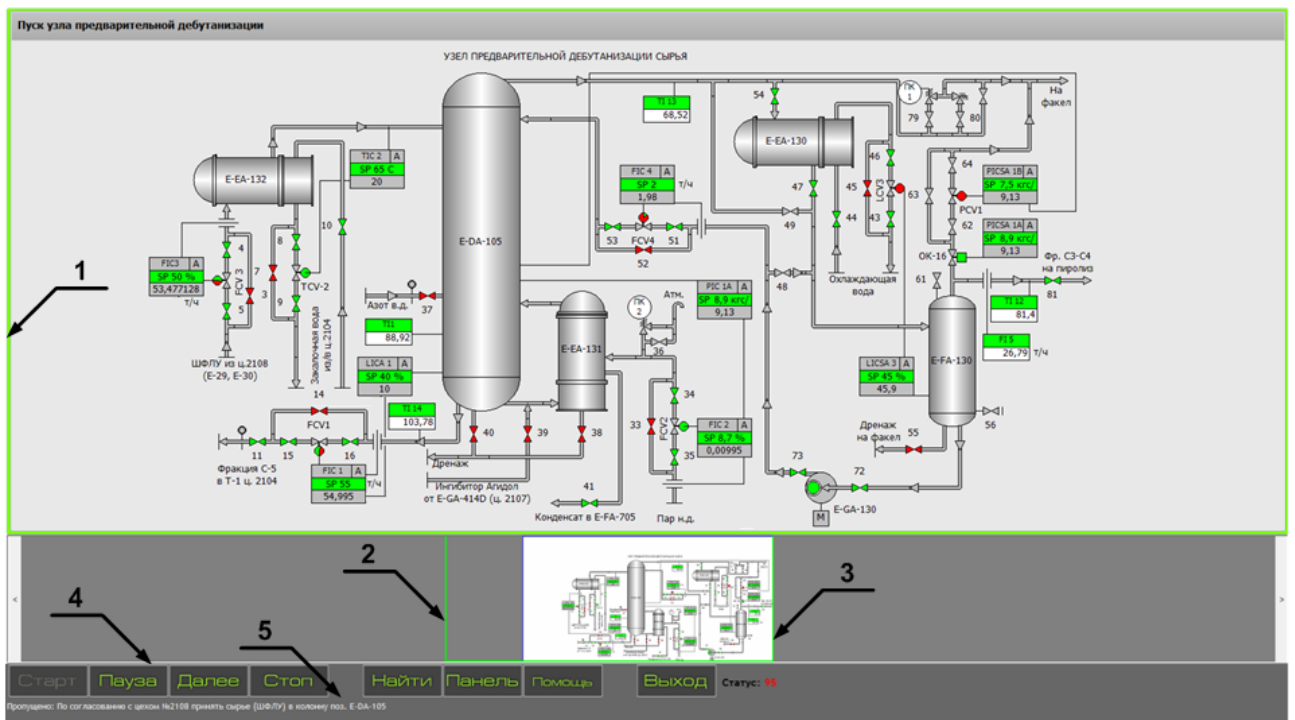


Рисунок 3.13. Окно общего вида

Окно общего вида 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», «Далее», «Стоп», «Найти», «Панель», «Помощь», «Выход».
- 5 – Окно сообщений, в котором отражается правильность/неправильность каждого выполненного пользователем действия, а также выполнение действия по ожиданию.

Кнопки «Старт» и «Стоп» предназначены для запуска и остановки теста. После запуска теста пользователь выполняет операции пуска/останова/аварийного останова в соответствии с регламентом. Кнопка «Далее» предназначена для пропуска того или иного действия в том случае, если пользователь не может его выполнить. При нажатии на кнопку «Найти» происходит автоматический переход на ту область технологической схемы, где необходимо совершить следующее действие.

Кнопка «Панель» позволяет скрыть/отобразить миникарту, что может быть удобно в тех или иных ситуациях. Миникарта представляет собой уменьшенную копию всей технологической схемы, размещенную в нижней части окна. Она предназначена для помощи пользователю при поиске объектов и при перемещении по схеме.

Кнопка «Помощь» предоставляет доступ к электронно-справочной системе, в которую входят «Руководство пользователя» и «Упражнения». Данная кнопка доступна до запуска теста, либо после его остановки. Время, отведенное на выполнение текущего действия, отображается в поле Статус.

Все действия, выполняемые пользователем в компьютерном тренажере, делятся на несколько типов:

1). Текстовые действия – действия, не связанные с работой технологического оборудования. К ним относятся: позвонить, предупредить, сообщить и т.д. (рис. 3.14); При разработке теста текстовое действие заносится в поле Caption (рис. 3.8).

2). Активные действия – действия, связанные с работой технологического оборудования. К ним относятся: открытие/закрытие регулирующих клапанов, ручных арматур, электродвигателей, отсечных клапанов, пуск/останов насоса и т.д. (рис. 3.15, 3.16, 3.17);

3). Действия по ожиданию – действия, протекающие во времени: ожидание заполнения/опорожнения емкости, превышения/падения уровня и т.д.

Для выбора текстового действия необходимо совершить двойное нажатие мышью по выбранному действию (рис. 3.14). Выполненное действие окрашивается в зеленый цвет. У пользователя имеется возможность пропустить одно/несколько текстовых действий, нажимая на кнопку «Пропустить». При этом система автоматически перейдет к следующему действию, а пропущенное действие будет засчитано как невыполненное (ошибочное), что отразится в отчете о выполнении теста.

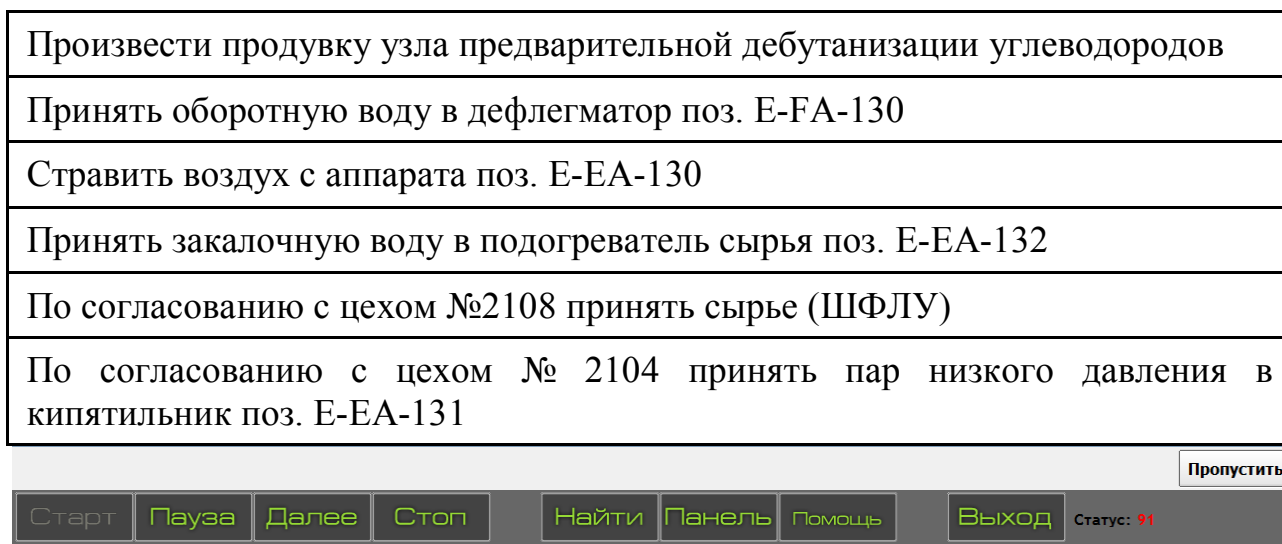


Рисунок 3.14. Окно выбора текстового действия

Таблица 3.2 – Графическое изображение управляющих элементов

Управляющие элементы		
Арматура		
Электрозадвижка		
Отсечной клапан		
Регулирующий клапан в положениях: закрыт/частично открыт/полностью открыт		
Управление насосом	---	

Рассмотрим выполнение активных действий над управляющими элементами, графическое изображение которых приведено в табл. 3.2.

Для открытия/закрытия ручной арматуры необходимо найти на мнемосхеме соответствующую арматуру и совершить двойное нажатие левой кнопкой мыши по ней. После это открывается окно управления состоянием арматуры (рис. 3.15). Текущее состояние арматуры – арматура закрыта. Для ее открытия совершается нажатие на кнопку «Открыть», после чего окно управления состоянием автоматически закрывается. Если пользователь после открытия окна управления передумал изменять состояние арматуры, то он закрывает окно управлением нажатием кнопки «X» в правом верхнем углу.

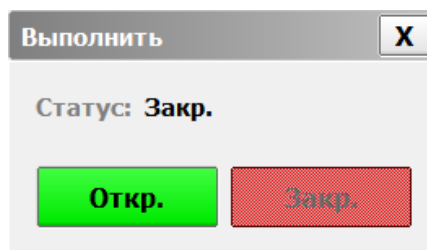


Рисунок 3.15. Окно управления ручной арматурой

Для запуска/останова насоса пользователь совершает аналогичные действия, нажимая на кнопку управления насосом. Окно управления насосом изображено на рис. 3.16.

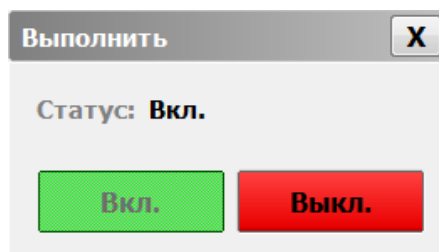


Рисунок 3.16. Окно управления насосом

На лицевой панели регулятора отображается имя контура регулирования, уставка регулятора и текущее значение измеряемой величины (рис. 3.17). Управление регулирующим клапаном может происходить в двух режимах: автоматическом и ручном. Для изменения режима работы регулятора необходимо найти на схеме динамку соответствующего регулятора и нажать на поле в правом верхнем углу, в котором отображается режим его работы: А или Р. Окно управления режимом работы регулятора изображено на рис. 3.18.

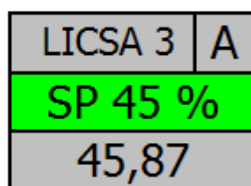


Рисунок 3.17. Лицевая панель регулятора (динамка)

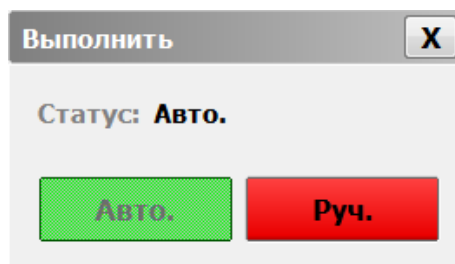


Рис. 3.18. Окно изменения режима работы регулятора

При нажатии на динамку регулятора появляется окно, изображено на рис. 3.19. Оно имеет одинаковую конфигурацию и в ручном и в автоматическом режиме. В левой части окна отображается текущая уставка регулятору, а в правой текущее значение регулируемого параметра. Для задания новой уставки пользователь передвигает бегунок в левом столбце на необходимую величину или задает численное значение уставки в поле над столбцом. Для подтверждения выполнения действия нажимается кнопка «Принять». Только после нажатия данной кнопки система реагирует на совершенное действие. Если изменить уставку регулятору и закрыть окно без нажатия кнопки «Принять», то никаких изменений не произойдет.

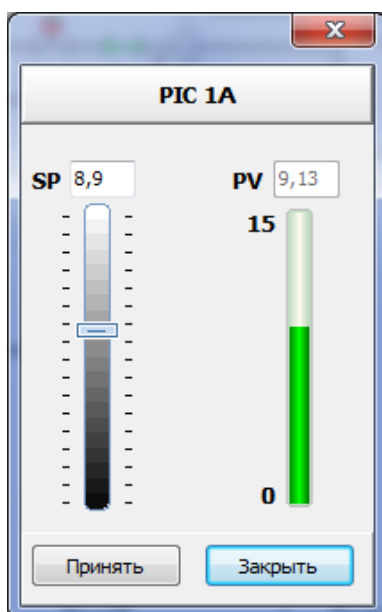


Рис. 3.19. Задание уставки регулятору

В ручном режиме работы регулятора пользователь может воздействовать непосредственно на степень открытия регулирующего органа. Для этого необходимо совершить двойное нажатие левой кнопкой мыши по изображению регулирующего клапана. Окно управления степенью открытия регулирующего органа изображено на рис. 3.20.

После прохождения теста формируется отчет о прохождении тестирования (рис. 3.21). В отчете отражается информация, которая в дальнейшем подвергается анализу, как самим пользователем, так и экзаменатором – перечень всех действий, выполненных пользователем: правильных, пропущенных, ошибочных.

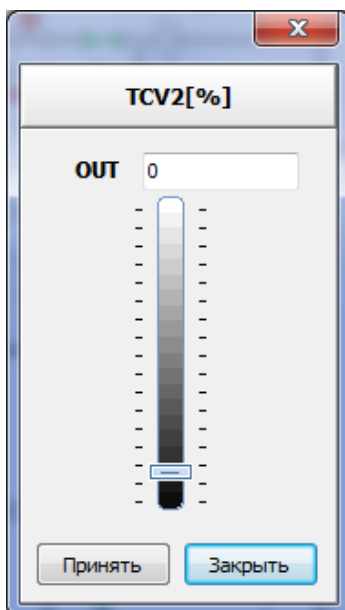


Рис. 3.20. Окно управления степенью открытия регулирующего органа

Верно: Задать уставку регулятору PICSA1B равную 9 кгс/см ²		
Верно: Перевести регулятор PICSA1B в автоматический режим работы		
Верно: Дождаться появления уровня в кубе колонны поз. E-DA-105		
Верно: Подать пар н.д., открыв регулирующий клапан поз. FCV2 на 10%, и вести разогрев куба		
Дождались: Дождаться появления уровня во флегмовой емкости		
Верно: Включить в работу насос поз. E-GA-130		
Верно: Открыть регулирующий клапан FCV на 10%		
Пропущено: По согласованию с цехом №2104 подать фракцию C ₃ -C ₄ на газовые печи пиролиза, открыв регулирующий клапан поз. FCV5 на 10%		
Всего действий:	55	100%
Осталось действий:	0	0%
Ошибочные действия:	5	9%
Пропущено действий:	2	4%
Количество подсказок: 0		
Пропустить		
Старт	Пауза	Далее
Стоп	Найти	Панель
Помощь	Выход	Статус: 91

Рисунок 3.21. Фрагмент журнала о прохождении теста

Также указывается общее время прохождения теста; общее количество действий в тесте; количество действий, оставшихся до завершения теста (больше нуля в том случае, если тест прекращен досрочно); количество действий с ошибочным выбором; количество ошибочных действий; количество пропущенных действий; список всех действий в порядке их выполнения. Все данные отображаются в абсолютных единицах и в процентах. Отчет или его фрагмент можно скопировать и вывести на печать.

Оценку пользователю может поставить лишь экзаменатор, который является экспертом в этой области, так как одни ошибки могут практически не повлиять на ход технологического процесса, другие же могут привести к серьезным последствиям. После просмотра и анализа отчета экзаменатор может вынести решение о сдаче/не сдаче теста.

3.2.2. Описание интерфейса администратора

Для входа в режим администратора необходимо нажать на соответствующую кнопку «Admin» (рис. 3.10) и ввести пароль администратора. Первичный пароль администратора задают разработчики тренажера. Окно администратора изображено на рис. 3.22.

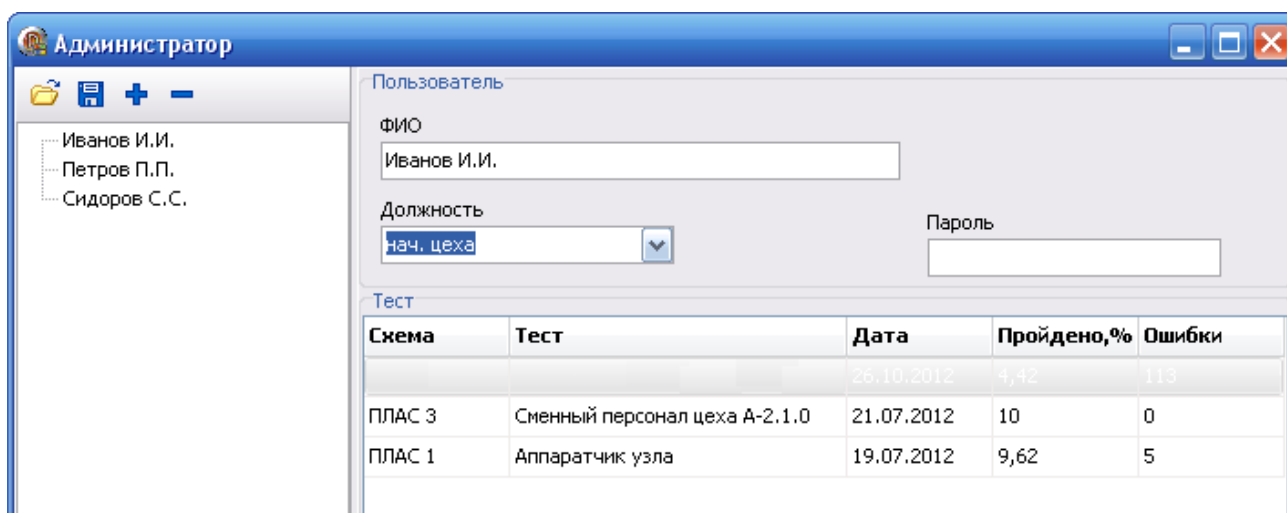






Рисунок 3.22. Окно администратора

Администратору доступны права на добавление/удаление пользователей, установку паролей, просмотр результатов тестирования. Открытие, редактирование и сохранение списка пользователей осуществляется при

помощи кнопок    . При добавлении нового пользователя необходимо заполнить поле «ФИО» и выбрать соответствующую позицию в выпадающем меню «Должность». После ввода данных необходимо нажать на кнопку «Сохранить»  . После этого пользователь может приступить к выполнению заданий. По умолчанию у всех пользователей, кроме администратора, заданы пустые пароли. Для обеспечения безопасного доступа к системе рекомендуется задавать индивидуальные пароли для каждого пользователя.

В окне администратора отображается список всех пользователей. При нажатии на фамилию конкретного пользователя в правой части окна формируется список тестов, пройденных пользователем. Информация о пройденных тестах хранится в модуле обработки сценариев.

3.3. Сценарий пуска узла дебутанизации углеводородов в компьютерном тренажере

Рассмотрим перечень действий, выполняемых при пуске узла дебутанизации углеводородов, прописанный в сценарии и соответствие этих действий пунктам технологического регламента. Как правило, каждый пункт технологического регламента разбивается на несколько действий, выполняемых пользователем. При этом система реагирует на каждое выполненное пользователем действие.

Структура данного раздела выглядит следующим образом:

- 1). Пункт технологического регламента.
- 2). Действия пользователя.
- 3). Реакция системы на действия пользователя.

В технологическом регламенте обозначено 9 основных пунктов пуска узла дебутанизации углеводородов. При переносе данных пунктов в компьютерный тренажер получается перечень из 55 действий (Приложение 2). Сохраним имеющуюся нумерацию действий, обозначив действия технологического регламента римскими цифрами, а для действий в компьютерном тренажере оставив арабскую нумерацию.

Для начала тестирования пользователю необходимо запустить программу «Simulation model» (рис. 3.23), пройти процедуру аутентификации (при необходимости добавить нового пользователя), выбрать требуемую технологическую схему (Узел дебутанизации углеводородов), выбрать тест (пуск узла дебутанизации углеводородов), режим прохождения теста (экзамен) и нажать кнопку «Ок».

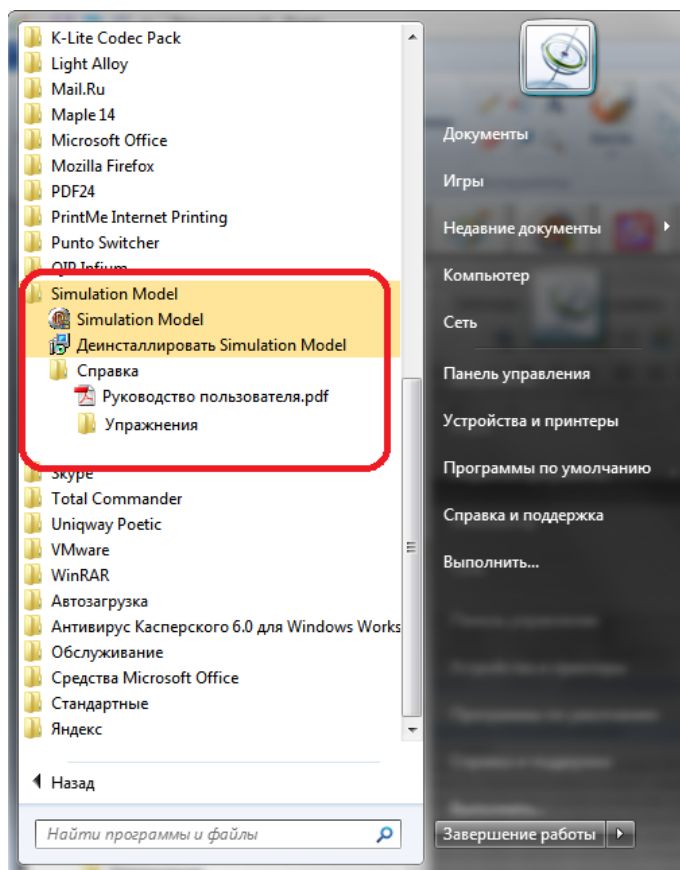


Рисунок 3.23. Расположение компьютерного тренажера в меню «Пуск»

После этого перед пользователем появится окно общего вида (рис. 3.13). Запуск теста осуществляется путем нажатия кнопки «Старт». При этом происходит инициализация всех параметров в соответствии с выбранным сценарием. В данном случае состояние всех параметров соответствует предпусковому. Перечень параметров для инициализации представлен в приложении 2. Далее пользователь приступает непосредственно к пуску узла дебутанизации углеводородов.

1) Произвести продувку узла дебутанизации азотом от кислорода (до содержания кислорода в отходящем азоте н. б. 0,5 %).

1) Открыть ручную арматуру № 37.

Действия пользователя: Для совершения данного действия пользователю необходимо найти на схеме ручную арматуру №37 (рис. 3.24). Это можно сделать с помощью кнопки «Найти», либо с помощью миникарты. После этого необходимо совершить двойное нажатие левой кнопкой мыши по найденному визуальному объекту. При этом откроется окно управления состоянием арматуры (рис. 3.25). Текущее состояние арматуры – закрыто. Для открытия арматуры необходимо нажать на кнопку «Открыть». После этого окно управления состоянием арматуры автоматически закроется, независимо от того, верное или неверное действие совершил пользователь.

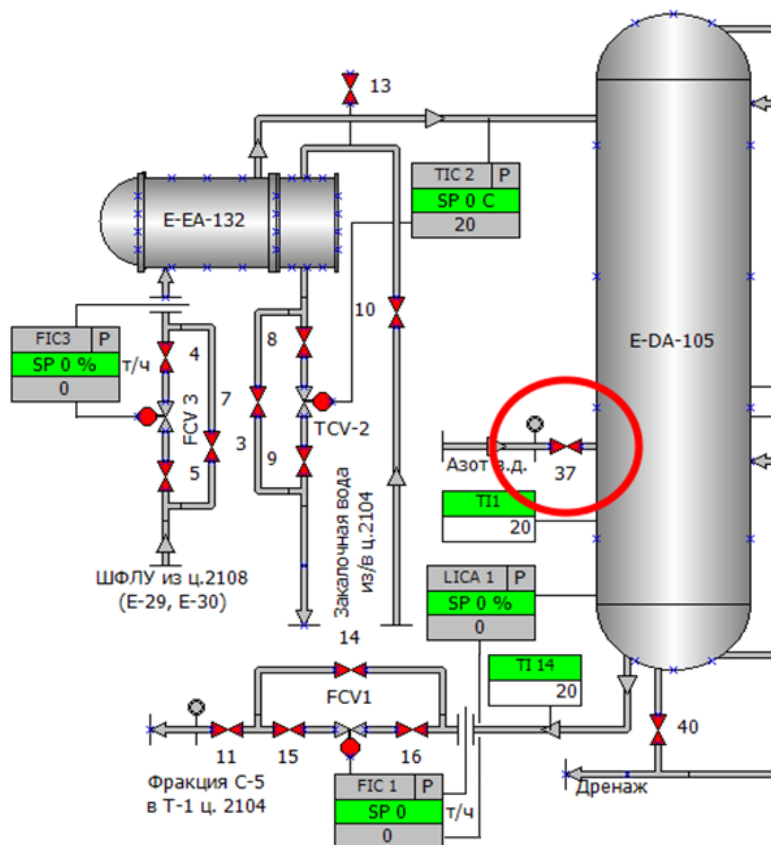


Рисунок 3.24. Расположение ручной арматуры №37 на мнемосхеме

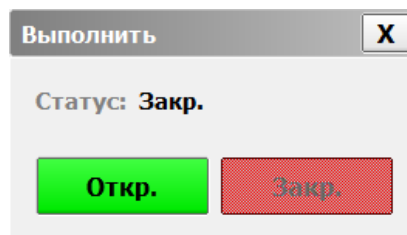


Рисунок 3.25. Окно управления состоянием ручной арматуры №37

Реакция системы: После совершения активного действия пользователем, выполненное действие попадает в модуль обработки сценариев. В нем происходит сравнение действия, выполненного пользователем с действием, полученным модулем обработки сценариев с уровня разработки сценариев.

При несовпадении этих действий модуль обработки сценариев выдает сообщение об ошибке и записывает его в журнал прохождения теста. При этом на уровень математических моделей никаких управляющих воздействий не поступает.

При совпадении действий модуль обработки сценариев выдает сообщение о правильно выполненном действии и получает с уровня разработки сценариев следующее действие, которое необходимо выполнить пользователю. При этом модуль обработки сценариев отправляет выполненное пользователем действие на уровень математических моделей.

Примечание: процесс продувки аппаратов упрощен и состоит из открытия арматуры на линии подачи азота.

На уровне математических моделей меняется состояние ручной арматуры №37. Она становится открытой и данный сигнал поступает на уровень визуализации. Ее цвет меняется с красного на зеленый. Других изменений в работе математических моделей не происходит, поэтому остальные параметры на уровне визуализации не изменяются.

2) Произвести продувку узла дебутанизации азотом от кислорода (до содержания кислорода в отходящем газе н.б. 0.5%).

Действия пользователя: Данное действие является «Текстовым», поэтому при его выполнении автоматически появляется окно выбора текстовых действий (рис. 3.26). Среди представленных текстовых действий пользователю необходимо найти действие «Произвести продувку узла дебутанизации азотом от кислорода (до содержания кислорода в отходящем газе н.б. 0.5%)» и выбрать его двойным нажатием левой кнопкой мыши по данному действию.

Реакция системы: При выборе пользователем текстового действия, оно поступает на модуль обработки сценариев. В модуле обработки сценариев уже

содержится действие, которое необходимо выполнить пользователю. Происходит сравнение этих действий.

При несовпадении этих действий модуль обработки сценариев выдает сообщение об ошибке и записывает его в журнал прохождения теста. При этом окно выбора текстовых действий не закрывается и система ожидает от пользователя выбора правильного действия.

При совпадении действий модуль обработки сценариев выдает сообщение о правильно выполненном действии и получает с уровня разработки сценариев следующее действие, которое необходимо выполнить пользователю. При этом выполненное действие подкрашивается в зеленый цвет. Если следующим действием является текстовое, то окно выбора текстовых действий остается развернутым. В противном случае оно автоматически сворачивается и перед пользователем появляется окно общего вида.

Произвести продувку узла предварительной дебутанизации углеводородов
Принять оборотную воду в дефлегматор поз. Е-FA-130
Стравить воздух с аппарата поз. Е-ЕА-130
Принять закалочную воду в подогреватель сырья поз. Е-ЕА-132
По согласованию с цехом №2108 принять сырье (ШФЛУ)
По согласованию с цехом № 2104 принять пар низкого давления в кипятильник поз. Е-ЕА-131

Старт Пауза Далее Стоп Найти Панель Помощь Выход Статус: 91

Рисунок 3.26. Окно выбора текстового действия

3) Закрыть ручную арматуру №37.

Действия пользователя и реакция системы на выполнение данного действия аналогичны действию по открытию ручной арматуры №37.

II) Принять оборотную воду в дефлегматор поз. Е-ЕА-130, стравить воздух через воздушник аппарата.

Данный пункт технологического регламента разбивается на ряд действий, первое из которых является текстовым. Это необходимо для однозначной идентификации пользователем выполняемой операции.

4) Принять оборотную воду в дефлегматор поз. Е-ЕА-130.

Данное действие является текстовым и выполняется аналогично описанному выше действию.

5) Открыть ручную арматуру №44.

6) Открыть ручную арматуру №46.

7) Открыть ручную арматуру №43.

Данные действия выполняются аналогично действиям открытия других арматур. При этом на уровне математических моделей не происходит изменений. Это связано с тем, что единственным прибором, установленным на линии подачи охлаждающей воды является датчик температуры поз. Т12. Но так как в трубопроводе содержится воздух, то изменения температуры не происходит.

8) Открыть ручную арматуру №42.

После открытия ручной арматуры на уровне математических моделей происходит изменение температуры охлаждающей воды на выходе из дефлегматора поз. Е-ЕА-130 по прибору поз. Т12. Температура изменяется с начальной температуры, соответствующей температуре окружающей среды, до температуры охлаждающей воды. Повышения температуры охлаждающей воды не происходит, так как отсутствует расход охлаждаемого продукта в межтрубном пространстве теплообменного аппарата.

9) Стравить воздух с аппарата поз. Е-ЕА-130.

Данное действие является текстовым и выполняется по правилам совершения текстовых действий.

10) Закрывать ручную арматуру №42.

Действие выполняется по описанным выше правилам.

III) По согласованию с цехом №2104 принять закалочную воду в подогреватель ШФЛУ поз. Е-ЕА-132.

11) Принять закалочную воду в подогреватель ШФЛУ поз. Е-ЕА-132.

12) Открыть ручную арматуру №10.

13) Открыть ручную арматуру №8.

14) Открыть ручную арматуру №9.

Набор действий 11-14 выполняется аналогично описанным выше действиям. Действие 11 является текстовым.

IV) По согласованию с цехом №2104 принять пар низкого давления в кипятильник поз. Е-ЕА-131.

15) По согласованию с цехом №2104 принять пар низкого давления в кипятильник поз. Е-ЕА-131.

16) Открыть ручную арматуру №35.

17) Открыть ручную арматуру №34.

18) Открыть ручную арматуру №27.

Набор действий 15-18 выполняется аналогично описанным выше действиям. Действие 15 является текстовым.

V) По согласованию с цехом №2108 принять сырье (ШФЛУ) в колонну поз. Е-ДА-105, по мере набора давления до 8 – 9.0 кгс/см³ воздействуя на регулирующий клапан поз. LCV3 начать частичную конденсацию верхнего продукта колонны, излишки фракции C₃-C₄ сбрасывать на факел через регулирующий клапан поз. PCV1.

19) По согласованию с цехом №2108 принять сырье (ШФЛУ) в колонну поз. Е-ДА-105.

20) Открыть ручную арматуру №5.

21) Открыть ручную арматуру №4.

Открытие арматур №5 и №4 выполняется аналогично описанным действиям. Изменений в работе математических моделей не происходит.

22) Открыть регулирующий клапан FCV3 на 10%.

Действия пользователя: Так как регулятор FIC3 находится в ручном режиме работы (рис. 3.27), то для выполнения данного действия пользователь находит на мнемосхеме регулирующий клапан FCV3. Для изменения степени

открытия регулирующего органа пользователь совершает двойное нажатие левой кнопкой мыши по пиктограмме регулирующего клапана FCV3. После этого появляется окно управления состоянием регулирующего органа (рис. 3.28). Пользователю необходимо изменить степень открытия регулирующего органа с текущего значения 0% на значение 10%. Для этого пользователь передвигает движок на необходимую величину или задает требуемое значение степени открытия в поле SP. Для подтверждения выполнения данного действия пользователь нажимает на кнопку «Принять». Окно управления состоянием регулирующего органа автоматически закрывается.

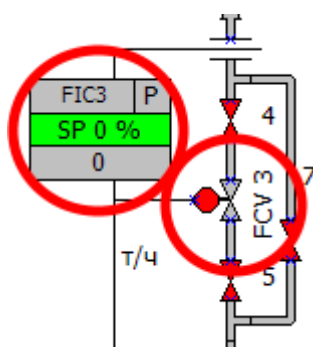


Рисунок 3.27. Расположение регулирующего контура FIC3 на мнемосхеме

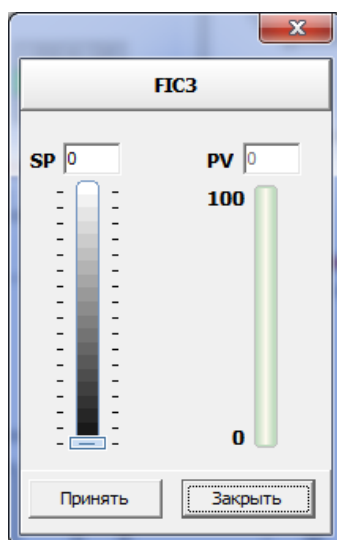


Рисунок 3.28. Окно управления состоянием регулирующего клапана FCV3

Реакция системы: После совершения пользователем активного действия, выполненное действие попадает в модуль обработки сценариев. В нем происходит сравнение действия, выполненного пользователем, с действием, полученным модулем обработки сценариев с уровня разработки сценариев.

При несовпадении этих действий модуль обработки сценариев выдает сообщение об ошибке и записывает его в журнал прохождения теста. При этом на уровень математических моделей никаких управляющих воздействий не поступает.

При совпадении действий модуль обработки сценариев выдает сообщение о правильно выполненном действии и получает с уровня разработки сценариев следующее действие, которое необходимо выполнить пользователю. При этом модуль обработки сценариев отправляет выполненное пользователем действие на уровень математических моделей.

На уровне математических моделей происходит изменение режимов работы некоторых моделей. Во-первых, начинается изменение степени открытия регулирующего органа. Открытие регулирующего органа происходит не мгновенно и зависит от скорости работы регулирующего клапана.

После открытия регулирующего клапана FCV3 начинается протекание продукта (ШФЛУ) через этот клапан. ШФЛУ поступает в подогреватель поз. Е-ЕА-132. Процессы теплообмена не моделируются, так как отсутствует расход закалочной воды через подогреватель поз. Е-ЕА-132.

Далее ШФЛУ в качестве питания поступает в ректификационную колонну поз. Е-ДА-105. При этом ШФЛУ находится в жидком состоянии и полностью стекает в нижнюю часть аппарата, заполняя тарелки, трубное пространство кипятильника поз. Е-ЕА-131 и куб колонны. По мере подачи ШФЛУ начинается процесс роста давления в колонне и смежных аппаратах. Процессы массообмена не происходят, а соответственно и не моделируются, потому что отсутствует паровой поток с куба колонны.

23) Открыть регулирующий клапан TCV2 на 10%.

Открытие регулирующего клапан TCV2 осуществляется аналогично открытию регулирующего клапана FCV3.

Реакция системы: После совершения активного верного действия пользователем, выполненное действие через модуль обработки сценариев попадает на уровень математических моделей, где происходит изменение

режимов работы некоторых моделей. Во-первых, начинается изменение степени открытия регулирующего органа.

После открытия регулирующего клапана TCV2 закалочная вода поступает в подогреватель поз. E-EA-132. В подогревателе начинаются процессы теплообмена. Происходит процесс нагрева ШФЛУ за счет тепла закалочной воды. В соответствии с заложенной математической моделью меняется температура ШФЛУ на выходе из теплообменника.

Далее подогретая ШФЛУ в качестве питания поступает в ректификационную колонну поз. E-DA-105. При этом ШФЛУ находится в парожидкостном состоянии и частично стекает в нижнюю часть аппарата. Остальная часть в виде паровой фракции поступает в верхнюю часть колонны, откуда поступает в дефлегматор поз. E-EA-130. При этом конденсации паров не происходит, так как отсутствует расход охлаждающей воды через дефлегматор.

24) Задать уставку регулятору TIC2 равную 65°C.

Действия пользователя: Пользователю необходимо найти на мнемосхеме динамку регулятора TIC2 (рис. 3.29) и совершить по ней двойное нажатие левой кнопкой мыши. При этом появится окно управления регулятором (рис. 3.30). В данном окне необходимо задать уставку регулятору равную 65 °C. Для этого необходимо передвинуть движок или задать численное значение в поле SP. Для подтверждения выполнения действия нажимается кнопка «Принять».

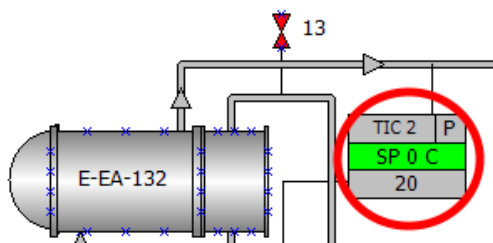


Рисунок 3.29. Расположение динамки регулятора TIC2 на мнемосхеме

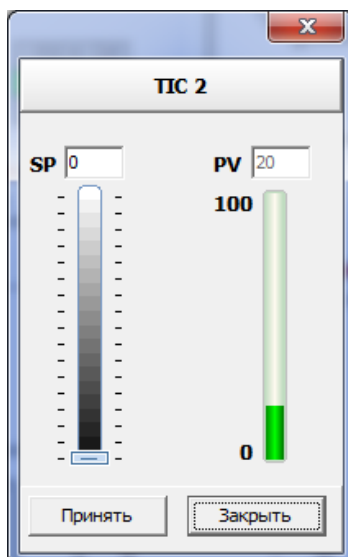


Рисунок 3.30. Окно управления регулятором TIC2

Реакция системы: При выполнении данного действия у регулятора изменится уставка, что отобразится на мнемосхеме. При этом изменения режима работы регулятора не произойдет, так как регулятор находится в ручном режиме работы.

25) Перевести регулятор TIC2 в автоматический режим работы.

Действия пользователя: Пользователю необходимо найти на мнемосхеме динамку регулятора TIC2 (рис. 3.29) и совершить двойное нажатие левой кнопкой мыши по участку отображения режима работы регулятора. В данном случае по квадрату в правом верхнем углу динамки с надписью «Р». При этом появится окно управления режимом работы регулятора (рис. 3.31). Текущий режим работы – ручной. Для перевода регулятора в автоматический режим работы необходимо нажать на кнопку «Авто». После выполнения данного действия окно автоматически закроется.

Реакция системы: После выполнения данного действия регулятор переводится в автоматический режим работы. В автоматическом режиме регулятор работает по следующему алгоритму:

а) На вход регулятора поступает текущее значение регулируемой величины P_v (температура ШФЛУ на выходе из подогревателя поз. Е-ЕА-132) и значение уставки, установленное в предыдущем пункте. Происходит расчет рассогласования между этими величинами: $E = Sp - P_v$. Рассчитывается выходной

управляющий сигнал, складывающийся из вклада каждой из П, И, Д составляющих;

б) Рассчитанный управляющий сигнал поступает на регулирующий клапан;

в) Изменяется степень открытия регулирующего клапана;

г) Изменившийся расход закалочной воды поступает в подогреватель поз. Е-ЕА-132. Происходит перерасчет модели теплообмена.

Алгоритм выполняется циклически до установления текущего значения регулируемой величины значению уставки.

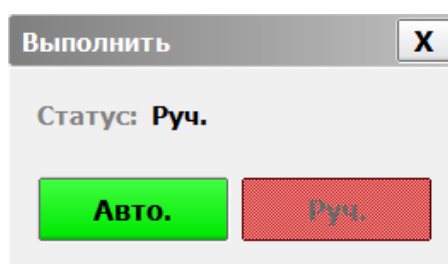


Рисунок 3.31. Окно управления режимом работы регулятора

26) Дождаться повышения давления в аппарате до величины 5 кгс/см^2 .

При выполнении данного действия пользователю нужно дождаться повышения давления до величины 5 кгс/см^2 . После чего перейти к следующему действию. Давление в системе изменяется в соответствии с заложенными математическими моделями.

27) Открыть регулирующий клапан поз. LCV3 на 10%.

Действие выполняется аналогично действиям 22-23.

28) Задать уставку регулятору PИCСА1В равную 9 кгс/см^2 .

Действие выполняется аналогично действию 24.

29) Перевести регулятор PИCСА1В в автоматический режим работы.

Действие выполняется аналогично действию 25.

VI) По мере набора уровня в кубовой части колонны по прибору поз. LICA-1, воздействуя на регулирующий клапан поз. FCV2, подать пар низкого давления в кипятильник поз. Е-ЕА-131 и вести разогрев куба (температура контрольной тарелки в пределах $77 - 87 \text{ }^\circ\text{C}$).

30) Дождаться появления уровня в кубе колонны поз. Е-DA-105.

Действие выполняется аналогично действию 26.

31) Подать пар н.д., открыв регулирующий клапан поз. FCV2 на 10%, и вести разогрев куба.

Действие выполняется аналогично действиям 22-23.

VII) При появлении уровня во флегмовой емкости поз. E-FA-130 (контроль по прибору поз. LICSA-3) включить в работу насос поз. E-GA-130 и подать флегму на орошение.

32) Дождаться появления уровня во флегмовой емкости.

Действие выполняется аналогично действию 26.

33) Включить в работу насос поз. E-GA-130.

Для включения насоса поз. E-GA-130 пользователь находит на мнемосхеме данный элемент и совершает двойное нажатие левой кнопкой мыши по элементу управления насосом. При этом появляется окно управления насосом, в котором нажатием кнопки «Включить» необходимо изменить состояние насоса.

34) Открыть регулирующий клапан FCV4 на 10%.

Действие выполняется аналогично действиям 22-23.

VIII) По согласованию с цехом №2104 подать фракцию C₃-C₄ на газовые печи пиролиза; по мере увеличения расхода ШФЛУ на печи пиролиза клапан поз. PCV1 полностью закрывается.

35) По согласованию с цехом №2104 подать фракцию C₃-C₄ на газовые печи пиролиза, открыв регулирующий клапан поз. FCV5 на 10%.

Действие выполняется аналогично действиям 22-23.

36) Открыть регулирующий клапан FCV1 на 5%.

Действие выполняется аналогично действиям 22-23.

37) Задать уставку регулятору LICSA3 равную 45%.

Действие выполняется аналогично действию 24.

38) Перевести регулятор поз. LICSA3 в автоматический режим работы.

Действие выполняется аналогично действию 25.

39) Задать уставку регулятору PIC1A равную 8,9 кгс/см².

- Действие выполняется аналогично действию 24.
- 40) Перевести регулятор поз. PIC1A в автоматический режим работы.
Действие выполняется аналогично действию 25.
- 41) Задать уставку регулятору FIC3 равную 35 т/ч.
Действие выполняется аналогично действию 24.
- 42) Перевести регулятор FIC3 в автоматический режим работы.
Действие выполняется аналогично действию 25.
- 43) Задать уставку регулятору FIC5 равную 32 т/ч.
Действие выполняется аналогично действию 24.
- 44) Перевести регулятор FIC5 в автоматический режим работы.
Действие выполняется аналогично действию 25.
- 45) Задать уставку регулятору FIC1 равную 3 т/ч.
Действие выполняется аналогично действию 24.
- 46) Перевести регулятор FIC1 в автоматический режим работы.
Действие выполняется аналогично действию 25.
- 47) Задать уставку регулятору FIC4 равную 3 т/ч.
Действие выполняется аналогично действию 24.
- 48) Перевести регулятор FIC4 в автоматический режим работы.
Действие выполняется аналогично действию 25.
- 49) Задать уставку регулятору FIC3 равную 55 т/ч.
Действие выполняется аналогично действию 24.
- 50) Задать уставку регулятору FIC5 равную 50 т/ч.
Действие выполняется аналогично действию 24.
- 51) Задать уставку регулятору FIC1 равную 5 т/ч.
Действие выполняется аналогично действию 24.
- 52) Задать уставку регулятору FIC4 равную 5 т/ч.
Действие выполняется аналогично действию 24.
- 53) Задать уставку регулятору LICA1 равную 40%.
Действие выполняется аналогично действию 24.
- 54) Перевести регулятор LICA1 в автоматический режим работы.

Действие выполняется аналогично действию 25.

IX) Стабилизировать режим по узлу дебутанизации углеводородов с учетом лабораторных анализов.

55) Стабилизировать режим по узлу дебутанизации углеводородов с учетом лабораторных анализов.

Действие является текстовым и выполняется аналогично действию 2.

3.4. Разработка и внедрение компьютерных тренажеров для обучения промышленного персонала нефтехимических производств ПАО «Нижнекамскнефтехим»

1. Цех № 1423 по приему, хранению и откачке углеводородного сырья. Технологическая схема содержит 23 блока, которые включают в себя емкости, теплообменники, сепараторы, насосы, турбокомпрессоры. Число технологических единиц составляет 206.

На основе технологического регламента и предложенных методов разработан компьютерный тренажер для приобретения практических навыков безопасного ведения работ, отработки действий персонала для цеха № 1423 завода ДБиУВС, который введен в эксплуатацию, а программное обеспечение зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ (Приложение 3) [172-175]. Компьютерный тренажер соответствует «Общим правилам взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утвержденным приказом Ростехнадзора от 11.03.2013 № 96.

2. Цех № 2106 по производству этилена, пропилена и соответствующих продуктов из пирогаза. Технологическая схема содержит 18 блоков, которые включают в себя ректификационные и экстракционные колонны, реакторы, емкости, теплообменники, сепараторы, насосы, компрессоры. Число технологических единиц составляет 227.

На основе технологического регламента и предложенных методов разработан компьютерный тренажер для приобретения практических навыков безопасного ведения работ, отработки действий персонала для цеха № 2106

завода Этилена, который введен в эксплуатацию (Приложение 3). Компьютерный тренажер соответствует «Общим правилам взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утвержденным приказом Ростехнадзора от 11.03.2013 № 96.

3. Цех по производству бензола. Технологическая схема содержит 14 блоков, которые включают в себя ректификационные и экстракционные колонны, реакторы, емкости, теплообменники, сепараторы, насосы, компрессоры. Число технологических единиц составляет 245.

На основе технологического регламента и предложенных методов разработан компьютерный тренажер для приобретения практических навыков безопасного ведения работ, отработки действий персонала для цеха № 2107 завода Этилена, который введен в эксплуатацию, а программное обеспечение зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ (Приложение 3) [176]. Компьютерный тренажер соответствует «Общим правилам взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утвержденным приказом Ростехнадзора от 11.03.2013 № 96.

4. Цех № 1808 ИФ-7, ИФ-8 по получению изопрена, приему и откачке жидких углеводородов. Технологическая схема содержит 20 блоков, которые включают в себя ректификационные колонны, емкости, теплообменники, реакторы, печи, насосы. Число технологических единиц составляет 98.

На основе технологического регламента и предложенных методов разработан компьютерный тренажер для приобретения практических навыков безопасного ведения работ, отработки действий персонала для цеха № 1808 ИФ-7, ИФ-8 завода ИМ, который введен в эксплуатацию (Приложение 3). Компьютерный тренажер соответствует «Общим правилам взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утвержденным приказом Ростехнадзора от 11.03.2013 № 96.

5. Цех по получению пиролизного газа завода Этилена. Технологическая схема содержит 11 блоков, которые включают в себя емкости, теплообменники, реакторы, насосы. Число технологических единиц составляет 98.

На основе технологического регламента и предложенных методов разработан компьютерный тренажер для приобретения практических навыков безопасного ведения работ, отработки действий персонала для цеха № 2104 завода Этилена, который введен в эксплуатацию (Приложение 3). Компьютерный тренажер соответствует «Общим правилам взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утвержденным приказом Ростехнадзора от 11.03.2013 № 96.

7. Цех по производству изопрена завода СК. Технологическая схема содержит 11 блоков, которые включают в себя насосы, колонны ректификационные, теплообменники, емкости. Число технологических единиц составляет 78.

На основе технологического регламента и предложенных методов разработан компьютерный тренажер для приобретения практических навыков безопасного ведения работ, отработки действий персонала для цеха № 1508 завода СК, который введен в эксплуатацию (Приложение 3). Компьютерный тренажер соответствует «Общим правилам взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утвержденным приказом Ростехнадзора от 11.03.2013 № 96.

8. Цех по очистки изопентан-изопреновой фракции, бутадиена, стирола, приготовления шихты и катализатора. Технологическая схема содержит 17 блоков, которые включают в себя насосы, колонны ректификационные, теплообменники, емкости, полимеризаторы. Число технологических единиц составляет 141.

На основе технологического регламента и предложенных методов разработан компьютерный тренажер для приобретения практических навыков

безопасного ведения работ, отработки действий персонала для цеха № 1530 завода СК, который введен в эксплуатацию (Приложение 3). Компьютерный тренажер соответствует «Общим правилам взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утвержденным приказом Ростехнадзора от 11.03.2013 № 96.

9. Цех по полимеризации изопрена в изопентане-растворителе в присутствии катализатора Циглера-Натта. Технологическая схема содержит 11 блоков, которые включают в себя насосы, колонны ректификационные, теплообменники, емкости, эжекторы, крошкообразователи, полимеризаторы. Число технологических единиц составляет 181.

На основе технологического регламента и предложенного метода разработан компьютерный тренажер для приобретения практических навыков безопасного ведения работ, отработки действий персонала для цеха № 1531 завода СК, который введен в эксплуатацию (Приложение 3). Компьютерный тренажер соответствует «Общим правилам взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утвержденным приказом Ростехнадзора от 11.03.2013 № 96.

Выводы

1. Предлагается метод разработки компьютерных тренажеров для обучения промышленного персонала нефтехимических производств. Основными этапами разработки тренажеров являются: создание графической оболочки, в виде мнемосхемы ХТС, аналогичной в SCADA-системах; разработка математической модели ХТС на языке НФС; разработка тестов и сценариев обучения, интерфейсов оператора и инструктора. Сценарий или программа обучения представлена в виде технологического регламента пуска и останова ХТС, безопасной ликвидации штатных и нештатных аварийных ситуаций согласно ПЛАС.

2. Разработана структурная схема компьютерного тренажерного комплекса, состоящая из трех подсистем разработки тренажера (подсистема визуализации, подсистема математического моделирования, подсистема разработки сценариев) и модуля обработки сценариев. Описан алгоритм взаимодействия подсистем между собой на основании сравнения действий, описанных в сценарии, с действиями, выполняемыми пользователем.

3. Представлен разработанный пользовательский интерфейс тренажерного комплекса, включающий интерфейс оператора и интерфейс администратора. Описано человеко-машинное взаимодействие оператора с системой, способы воздействия на систему и реакция системы на них.

4. В качестве примера разработанного тренажерного комплекса представлен алгоритм ручного управления пуском узла дебутанизации углеводородов. На основе анализа технологического регламента разработан перечень действий по пуску данного узла в тренажерном комплексе. Приведено подробное описание каждого действия, выполняемого оператором, и описана реакция системы на эти действия. Представлен перечень параметров и их значений, которые присваиваются переменным перед запуском теста.

5. 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 цехе № 1423 завода ДБиУВС, цехах № 2104, 2106, 2107 завода Этилена, цехе № 1808 завода ИМ, цехах №1508, 1530, 1531 завода СК ПАО «Нижнекамскнефтехим». Программное обеспечение зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ (Приложение 3).

Компьютерные тренажеры соответствуют «Общим правилам взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утвержденным приказом Ростехнадзора № 96 от 11.03.2013.

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ДЕБУТАНИЗАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭТИЛЕНА

В данной главе сформулирована задача математического моделирования программного управления технологическими параметрами установки разделения на основе модели автоматизированного управления. Получены математические модели и алгоритмы управления программных регуляторов технологическими параметрами установки разделения углеводородов.

Для построения программы управления процессом приведены результаты экспериментальных исследований процесса пуска установки дебутанизации углеводородов. На основе полученных экспериментальных данных построены уравнения регрессии в зависимости от времени и параметров пуска. Полученные уравнения регрессии, описывающие изменение технологических параметров от времени пуска, служат программой в задаче программного управления процессом.

4.1. Распределенная система программного управления

Задача управления процессом пуска – типичная задача программного управления [177], когда требуется найти управляющее воздействие $U(t)$, которое переводит систему из начального состояния $X(t_0)$ в заданное (конечное) $X(t_k)$ за заданное или минимальное время (задача о максимальном быстродействии).

В рассматриваемой ХТС дебутанизации углеводородов 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 ХТС из заданного начального состояния, характеризуемого начальными условиями $G_{F_0}, G_{ГП_0}, G_{ЗВ_0}, G_{ХВ_0}, L, P_0, T_{1_0}$ в состояние нормального функционирования при котором $P_k = 9 - 10 \text{ кгс / см}^2$, $T_1 = 85^\circ\text{C}$, $G_{C_3-C_4} = 50 \text{ т / ч}$ за заданное или минимальное время по заданной технологическим регламентом траектории пуска.

Управляющие параметры $G_F, G_{ГП}, G_{ЗВ}, L$ можно задать, например, в виде линейных функций в зависимости от технологических требований, например, в виде функций $G_F = \frac{G_{Fк}}{\tau} t, G_{ГП} = \frac{G_{ГПк}}{\tau} t$ или любых других, где $G_{Fк}, G_{ГПк}$ - значения расходов в конце процесса $t = \tau$.

Траектория пуска $[P(t), G_F(t), G_{C_3-C_4}(t), G_{ЗВ}(t), G_{ХВ}(t), T_1(t)]$ может быть задана также табличными данными в соответствии с требованиями регламента или представлена уравнениями, полученными в результате эксперимента. Эти уравнения или функции являются программой управления, однако они не учитывают влияние внешних и внутренних возмущений в виде изменения конструкции, регламентных параметров на технологический процесс.

Пуск ХТС проводится через определенные временные промежутки после ремонта или останова. Состав поступающего на переработку сырья, теплофизические и гидродинамические параметры сырья, теплоносителей могут изменяться, с течением времени возможны внутренние возмущения в виде отложений (коррозии) на стенках аппаратов. Чтобы учесть влияние возмущающих факторов на управляющие воздействия здесь рассматривается задача синтеза программного управления с обратной связью, с коррекцией управляющих воздействий по измеренным значениям технологических параметров процесса.

Система управления технологическим объектом состоит из нескольких уровней: уровень датчиков и исполнительных механизмов, уровень контроллера и уровень диспетчерского управления. При моделировании процесса автоматизированного управления изменение технологических параметров происходит в строгом соответствии с программой управления, установленной в памяти контроллера. На рис. 4.1 приведена структурная схема распределенной системы программного управления (РСПУ).

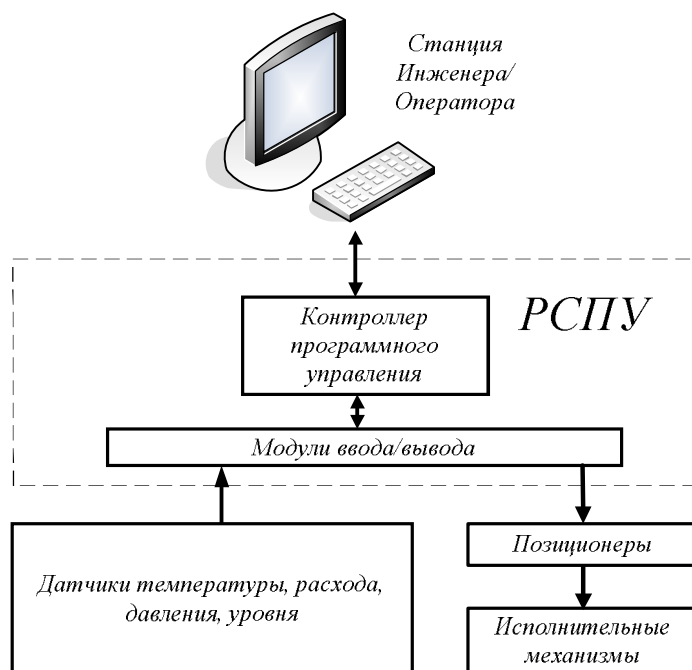


Рис. 4.1. Структурная схема системы программного управления с обратной связью.

Информация о состоянии технологического процесса во времени с первичных преобразователей-датчиков поступает в контроллер распределенной системы программного управления (РСПУ), где сравнивается с программным значением, а полученное отклонение передается для компенсации на исполнительный механизм, установленный на линии технологического потока.

Для реализации сформулированной задачи синтеза далее разрабатываются алгоритмы программного управления технологическими параметрами в период пуска и нормального функционирования установки.

4.1.1. Построение программы управления процессом пуска установки дебутанизации углеводородов

Путем обработки экспериментальных данных в процессе пуска установки дебутанизации углеводородов получены характерные значения параметров пуска в различные моменты времени. По этим данным с помощью экспериментально-статистических методов моделирования [178-179] построены уравнения регрессии (4.1)-(4.7): зависимости расхода питания G_F (т/ч), температуры питания колонны T_1 ($^{\circ}C$), расхода фракции C_3-C_4 на пиролиз

$G_{C_3-C_4}$ (т/ч), уровня жидкости в флегмовой емкости H_L (%), расхода флегмы L (т/ч), давления в колонне P (кгс/см²), уровня жидкости в кубе колонны H_K (%), в процессе пуска от времени t . Эти зависимости принимаем в виде программы управления установкой.

Заданная траектория пуска представленная уравнениями регрессии, является жесткой программой управления процессом пуска. Однако она не учитывает влияние внешних и внутренних возмущений на технологический процесс.

4.1.2. Программа управления расходом питания в колонну от времени пуска

Для определения зависимости расхода питания от времени в процессе пуска получена выборка экспериментальных данных (Приложение 1), значения которых сведены в таблицу 4.1 и представлены на рис. 4.2. Экспериментальные данные по расходу питания в колонну аппроксимированы уравнением квадратичной регрессии:

$$\hat{y} = ax^2 + bx + c.$$

Таблица 4.1 – Вспомогательные величины для определения параметров уравнения.

i	x_i	y_i	x_i^2	x_i^3	x_i^4	$x_i y_i$	$x_i^2 y_i$
1	4	3.7866	16	64	256	15.1464	60.5856
2	9	11.795	81	729	6561	106.155	955.395
3	25	34.435	625	15625	390625	860.875	21521.875
4	49	53.291	2401	117649	5764801	2611.259	127951.691
Σ	87	103.3076	3123	134067	6162243	3593.4354	150489.5466

Здесь x_i - время измерения расхода (ч), y_i - расход питания в i -й момент времени (т/ч).

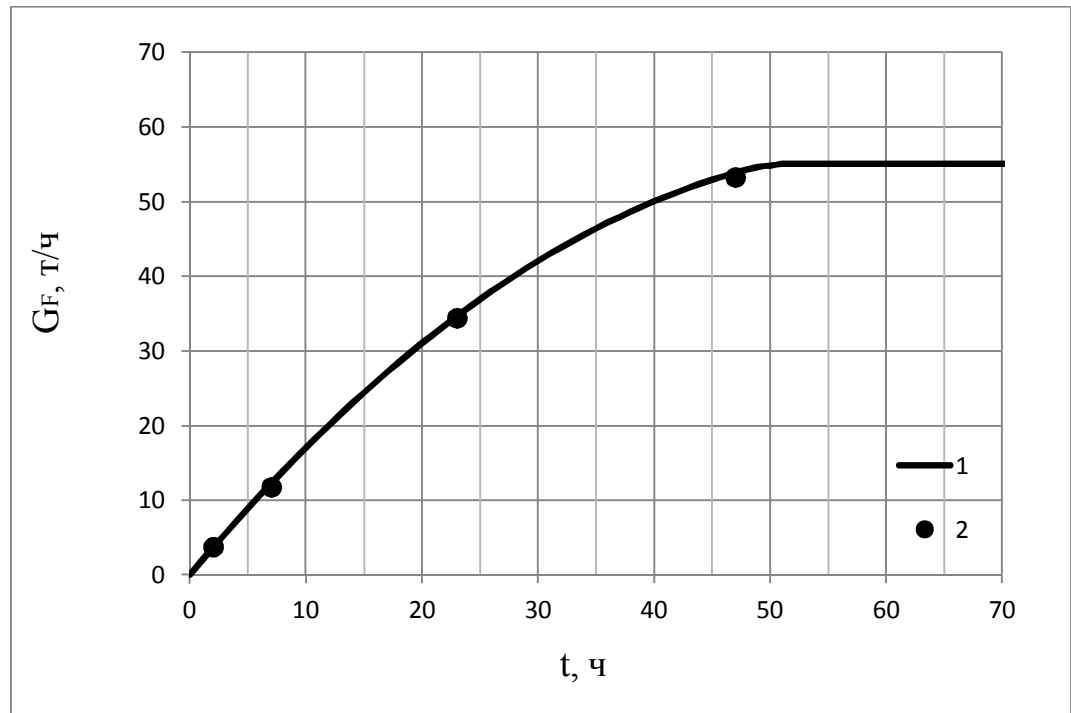


Рис. 4.2. Зависимость расхода питания в колонну поз. E-DA-105 от времени в период пуска. 1 – данные по уравнению регрессии; 2 – экспериментальные значения.

Для определения параметров уравнения регрессии составляется система линейных уравнений:

$$\begin{cases} a \sum x_i^2 + b \sum x_i + nc = \sum y_i, \\ a \sum x_i^3 + b \sum x_i^2 + c \sum x_i = \sum x_i y_i, \Leftrightarrow \\ a \sum x_i^4 + b \sum x_i^3 + c \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i; \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} 3123a + 87b + 4c = 103.3076, \\ 134067a + 3123b + 87c = 3593.4354, \\ 6162243a + 134067b + 3123c = 150489.5466, \end{cases}$$

Система линейных уравнений решается методом Крамера:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 3123 & 87 & 4 \\ 134067 & 3123 & 87 \\ 6162243 & 134067 & 3123 \end{vmatrix} = -834134400; \Rightarrow$$

$$\Delta a = \begin{vmatrix} 103.3076 & 87 & 4 \\ 3593.4354 & 3123 & 87 \\ 150489.5466 & 134067 & 3123 \end{vmatrix} = 12454554.24; \Rightarrow$$

$$a = \frac{\Delta a}{\Delta} = \frac{12454554.24}{-834134400} \approx -0.0149;$$

$$\Delta b = \begin{vmatrix} 3123 & 103.3076 & 4 \\ 134067 & 3593.4354 & 87 \\ 6162243 & 150489.5466 & 3123 \end{vmatrix} = -1581900382.08; \Rightarrow$$

$$b = \frac{\Delta b}{\Delta} = \frac{-1581900382.08}{-834134400} \approx 1.8965;$$

$$\Delta c = \begin{vmatrix} 3123 & 87 & 103.3076 \\ 134067 & 3123 & 3593.4354 \\ 6162243 & 134067 & 150489.5466 \end{vmatrix} = 3139334352; \Rightarrow$$

$$c = \frac{\Delta c}{\Delta} = \frac{3139334352}{-834134400} \approx -3.7636;$$

Искомое уравнение регрессии имеет вид:

$$\hat{y} = -0.0149t^2 + 1.8965t - 3.7636$$

Проанализируем адекватность полученного уравнения регрессии. Найдём среднее значение измеряемой величины:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i = \frac{103.3076}{4} = 25.8269$$

Таблица 5.2 – Вспомогательные величины для анализа уравнения.

i	x _i	y _i	\hat{y}_i	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$y_i - \hat{y}_i$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
1	4	3.7866	3.5833	-22.0403	485.7748	0.2033	0.0413
2	9	11.795	12.0951	-14.0319	196.8942	-0.3001	0.0901
3	25	34.435	34.3159	8.6081	74.0994	0.1191	0.0142
4	49	53.291	53.3132	27.4641	754.2768	-0.0222	0.0005
Σ	—	—	—	—	1511.0452	—	0.1461

Индекс корреляции:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}} = \sqrt{1 - \frac{0.1461}{1511.0452}} \approx 0.9999$$

Индекс детерминации:

$$R^2 \approx 0.9999^2 = 0.9999$$

По t-критерию Стьюдента все параметры уравнения регрессии являются значимыми. F-критерии Фишера:

– критический (табличный) $F_{\text{табл}} = F(\alpha, k_1, k_2) = F(0.05, 2, 1) \approx 199.5$

– фактический $F_{\text{факт}} = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{k_2}{k_1} = \frac{0.9999}{1 - 0.9999} \cdot \frac{1}{2} \approx 5172.3113$

где $k_1 = m = 2$, $k_2 = n - m - 1 = 4 - 2 - 1 = 1$, $\alpha = 0.05$, m – число параметров при переменных уравнения регрессии.

Так как фактическое значение критерия Фишера больше табличного,

можно сделать вывод об адекватности данного уравнения регрессии.

Таким образом, в процессе пуска расход питания описывается уравнением:

$$G_F = -3.7636 + 1.8965t - 0.0149t^2, \quad (4.1)$$

где t - время (ч), G_F - расход питания (т/ч).

4.1.3. Программа управления расходом пара в кипятильник колонны от времени пуска

Как и в предыдущем случае на основе полученной выборки из экспериментальных данных (Приложение 1), значения которых сведены в таблицу 4.3 и представлены на рис. 4.3, построим уравнение регрессии для расхода пара. Уравнение регрессии примем в виде:

$$\hat{y} = ax^3 + bx^2 + cx + d$$

Таблица 4.3 – Вспомогательные величины для определения параметров уравнения.

i	x_i	y_i	x_i^2	x_i^3	x_i^4	x_i^5	x_i^6	$x_i y_i$	$x_i^2 y_i$	$x_i^3 y_i$
1	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	10	0.1	100	1000	10000	100000	1000000	1	10	100
3	18	0.3209	324	5832	104976	1889568	34012224	5.7762	103.9716	1871.4888
4	24	0.7618	576	13824	331776	7962624	191102976	18.2832	438.7968	10531.1232
5	33	3.1017	1089	35937	1185921	39135393	1291467969	102.3561	3377.7513	111465.7929
6	40	5.0958	1600	64000	2560000	102400000	4096000000	203.832	8153.28	326131.2
7	50	5.7012	2500	125000	6250000	312500000	15625000000	285.06	14253	712650
8	57	5.6713	3249	185193	10556001	601692057	34296447248.999996	323.2641	18426.0537	1050285.060
Σ	232	20.8527	9438	430786	20998674	1065679642	55535030417.9	939.5716	44762.8534	2213034.665

Здесь x_i - время измерения расхода (ч), y_i - расход пара в i -й момент времени (т/ч).

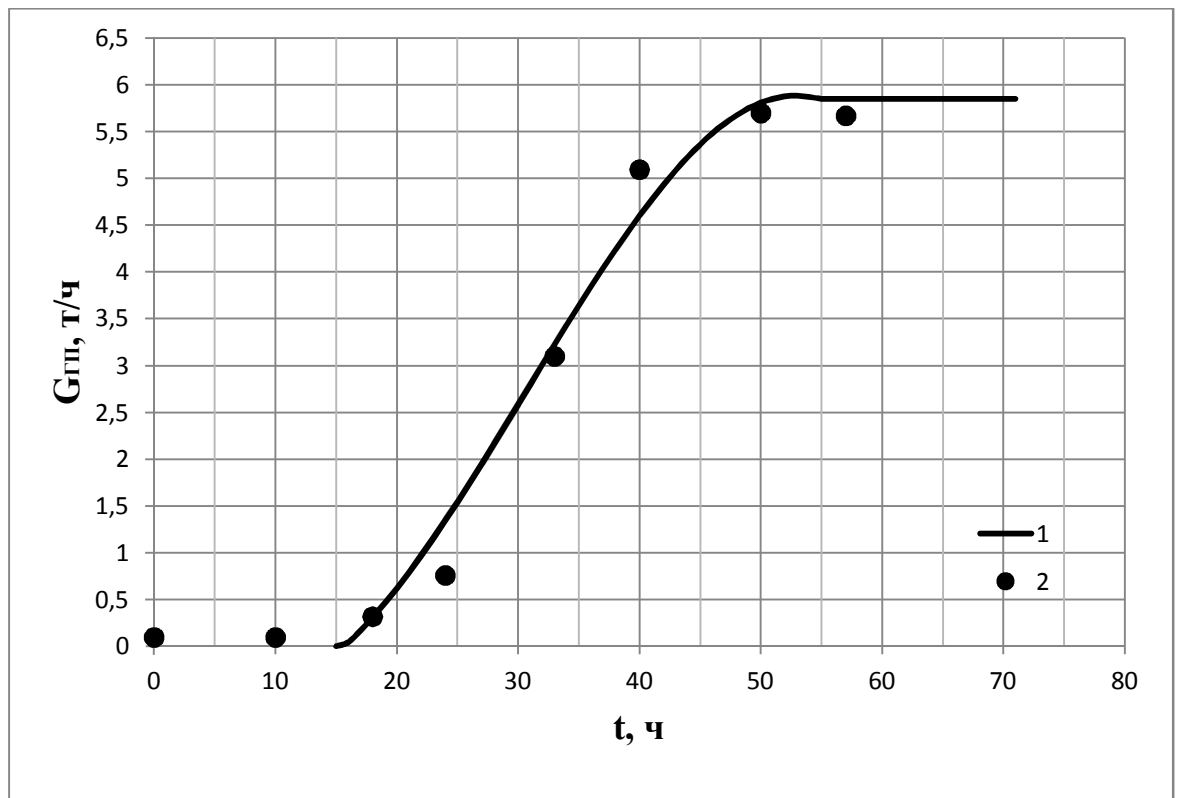


Рис. 4.3. Зависимость расхода пара в кипятильник поз. Е-ЕА-131 от времени в период пуска. 1 – данные по уравнению регрессии; 2 – экспериментальные значения.

Для определения параметров уравнения регрессии составляется система линейных уравнений:

$$\begin{cases}
 a \sum x_i^3 + b \sum x_i^2 + c \sum x_i + nd = \sum y_i, \\
 a \sum x_i^4 + b \sum x_i^3 + c \sum x_i^2 + d \sum x_i = \sum x_i y_i, \\
 a \sum x_i^5 + b \sum x_i^4 + c \sum x_i^3 + d \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i, \\
 a \sum x_i^6 + b \sum x_i^5 + c \sum x_i^4 + d \sum x_i^3 = \sum x_i^3 y_i;
 \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases}
 430786a + 9438b + 232c + 8d = 20.8527, \\
 20998674a + 430786b + 9438c + 232d = 939.5716, \\
 1065679642a + 20998674b + 430786c + 9438d = 44762.8534, \\
 55535030417.99999a + 1065679642b + 20998674c + 430786d = 2213034.6658.
 \end{cases}$$

Система линейных уравнений решается методом Крамера:

$$\Delta = \begin{vmatrix}
 430786 & 9438 & 232 & 8 \\
 20998674 & 430786 & 9438 & 232 \\
 1065679642 & 20998674 & 430786 & 9438 \\
 55535030417.99999 & 1065679642 & 20998674 & 430786
 \end{vmatrix} =$$

$$= 2830892089355477000; \Rightarrow$$

$$\Delta a = \begin{vmatrix} 20.8527 & 9438 & 232 & 8 \\ 939.5716 & 430786 & 9438 & 232 \\ 44762.8534 & 20998674 & 430786 & 9438 \\ 2213034.6658 & 1065679642 & 20998674 & 430786 \end{vmatrix} = -406806346868509; \Rightarrow$$

$$a = \frac{\Delta a}{\Delta} = \frac{-406806346868509}{2830892089355477000} \approx -0.0001437;$$

$$\Delta b = \begin{vmatrix} 430786 & 20.8527 & 232 & 8 \\ 20998674 & 939.5716 & 9438 & 232 \\ 1065679642 & 44762.8534 & 430786 & 9438 \\ 55535030417.99999 & 2213034.6658 & 20998674 & 430786 \end{vmatrix} =$$

$$= 37341179438372930; \Rightarrow$$

$$b = \frac{\Delta b}{\Delta} = \frac{37341179438372930}{2830892089355477000} \approx 0.01319061;$$

$$\Delta c = \begin{vmatrix} 430786 & 9438 & 20.8527 & 8 \\ 20998674 & 430786 & 939.5716 & 232 \\ 1065679642 & 20998674 & 44762.8534 & 9438 \\ 55535030417.99999 & 1065679642 & 2213034.6658 & 430786 \end{vmatrix} =$$

$$= -537841554259787800; \Rightarrow$$

$$c = \frac{\Delta c}{\Delta} = \frac{-537841554259787800}{2830892089355477000} \approx -0.18999013;$$

$$\Delta d = \begin{vmatrix} 430786 & 9438 & 232 & 20.8527 \\ 20998674 & 430786 & 9438 & 939.5716 \\ 1065679642 & 20998674 & 430786 & 44762.8534 \\ 55535030417.99999 & 1065679642 & 20998674 & 2213034.6658 \end{vmatrix} =$$

$$= 828926432838361100; \Rightarrow$$

$$d = \frac{\Delta d}{\Delta} = \frac{828926432838361100}{2830892089355477000} \approx 0.29281456;$$

Искомое уравнение регрессии имеет вид:

$$\hat{y} = -0.0001437 t^3 + 0.01319061 t^2 - 0.18999013 t + 0.29281456$$

Проанализируем адекватность полученного уравнения регрессии. Найдём среднее значение измеряемой величины:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i = \frac{20.8527}{8} = 2.6065875$$

Индекс корреляции:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}} = \sqrt{1 - \frac{0.93127177}{46.60397455}} \approx 0.98995825$$

Индекс детерминации: $R^2 \approx 0.98995825^2 = 0.98001733$

Таблица 4.4 – Вспомогательные величины для анализа уравнения.

i	x_i	y_i	\hat{y}_i	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$y_i - \hat{y}_i$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
1	0	0.1	0.29281456	-2.5065875	6.2829809	-0.19281456	0.03717745454
2	10	0.1	-0.43172875	-2.5065875	6.2829809	0.53172875	0.28273546357
3	18	0.3209	0.30867513	-2.2856875	5.22436735	0.01222487	0.00014944744
4	24	0.7618	1.34429622	-1.8447875	3.40324092	-0.58249622	0.33930184631
5	33	3.1017	3.22347146	0.4951125	0.24513639	-0.12177146	0.01482828847
6	40	5.0958	4.60121571	2.4892125	6.19617887	0.49458429	0.24461361991
7	50	5.7012	5.8070048	3.0946125	9.57662653	-0.1058048	0.0111946557
8	57	5.6713	5.70695086	3.0647125	9.39246271	-0.03565086	0.00127098381
Σ	—	—	—	—	46.60397455	—	0.93127177

По t-критерию Стьюдента все параметры уравнения регрессии являются значимыми. F-критерии Фишера:

– критический (табличный)

$$F_{\text{tabl}} = F(\alpha, k_1, k_2) = F(0.05, 3, 4) \approx 6.59138211$$

– фактический

$$F_{\text{факт}} = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{k_2}{k_1} = \frac{0.98001733}{1 - 0.98001733} \cdot \frac{4}{3} \approx 65.39115555$$

где $k_1 = m = 3$, $k_2 = n - m - 1 = 8 - 3 - 1 = 4$, $\alpha = 0.05$, m – число параметров при переменных уравнения регрессии.

Так как фактическое значение критерия Фишера больше табличного, можно сделать вывод об адекватности данного уравнения регрессии.

Полученное уравнение расхода пара в кипятильник колонны в процессе пуска от времени имеет вид:

$$G_{\text{ГП}} = 0.29281456 - 0.18999013 t + 0.01319061 t^2 - 0.0001437 t^3 \quad (3.2)$$

где t - время (ч), $G_{\text{ГП}}$ - расход пара (т/ч).

4.1.4. Программа управления расходом фракции C_3 - C_4 на печи пиролиза от времени пуска

Выборка экспериментальных данных по расходу фракции C_3 - C_4 в процессе пуска приведена в таблице 4.5 и на рис. 4.4. Экспериментальные данные аппроксимированы уравнением кубической регрессии:

$$\hat{y} = ax^3 + bx^2 + cx + d$$

Таблица 4.5 – Вспомогательные величины для расчета параметров уравнения.

i	x_i	y_i	x_i^2	x_i^3	x_i^4	x_i^5	x_i^6	$x_i y_i$	$x_i^2 y_i$	$x_i^3 y_i$
1	18	16.544989	324	5832	104976	1889568	34012224	297.809802	5360.576436	96490.37584
2	24	24.577037	576	13824	331776	7962624	191102976	589.848888	14156.373312	339752.9594
3	29	32.77783	841	24389	707281	20511149	594823321	950.55707	27566.15503	799418.4958
4	51	50.756727	2601	132651	6765201	345025251	17596287801	2588.593077	132018.24692	6732930.593
5	54	49.990338	2916	157464	8503056	459165024	24794911296	2699.478252	145771.82560	7871678.582
Σ	176	174.646921	7258	334160	16412290	834553616	43211137618	7126.287089	324873.17731	15840271.00

Здесь x_i - время измерения расхода (ч), y_i - расход фракции C_3 - C_4 в i -й момент времени (т/ч).

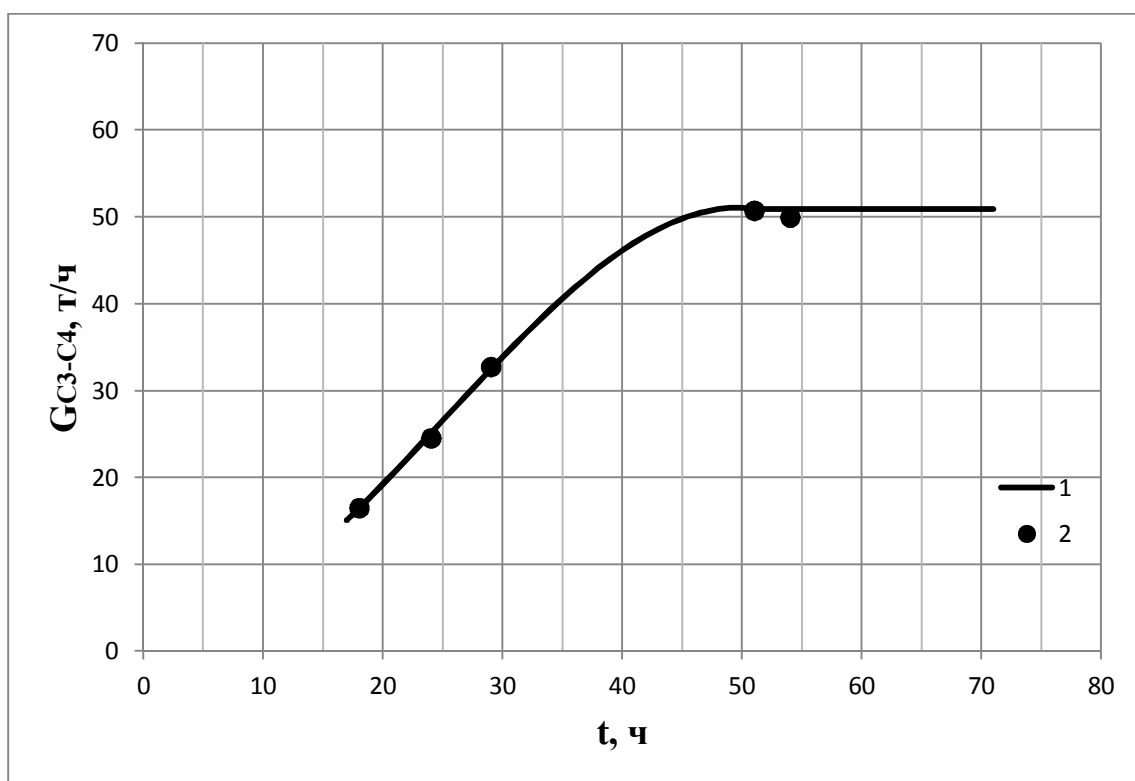


Рис. 4.4. Зависимость расхода фракции C_3 - C_4 на печи пиролиза от времени в период пуска. 1 – данные по уравнению регрессии; 2 – экспериментальные значения.

Для определения параметров уравнения регрессии составляется система линейных уравнений:

$$\begin{cases} a \sum x_i^3 + b \sum x_i^2 + c \sum x_i + nd = \sum y_i, \\ a \sum x_i^4 + b \sum x_i^3 + c \sum x_i^2 + d \sum x_i = \sum x_i y_i, \\ a \sum x_i^5 + b \sum x_i^4 + c \sum x_i^3 + d \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i, \\ a \sum x_i^6 + b \sum x_i^5 + c \sum x_i^4 + d \sum x_i^3 = \sum x_i^3 y_i; \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} 334160a + 7258b + 176c + 5d = 174.646921, \\ 16412290a + 334160b + 7258c + 176d = 7126.287089, \\ 834553616a + 16412290b + 334160c + 7258d = 324873.177313, \\ 43211137618a + 834553616b + 16412290c + 334160d = 15840271.007315. \end{cases}$$

Система линейных уравнений решается методом Крамера:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 334160 & 7258 & 176 & 5 \\ 16412290 & 334160 & 7258 & 176 \\ 834553616 & 16412290 & 334160 & 7258 \\ 43211137618 & 834553616 & 16412290 & 334160 \end{vmatrix} = 930834385516544;$$

$$\Delta a = \begin{vmatrix} 174.646921 & 7258 & 176 & 5 \\ 16412290 & 7126.287089 & 7258 & 176 \\ 834553616 & 324873.177313 & 334160 & 7258 \\ 43211137618 & 15840271.007315 & 16412290 & 334160 \end{vmatrix} = -765845808924.5 \Rightarrow$$

$$a = \frac{\Delta a}{\Delta} = \frac{-765845808924.5}{930834385516544} \approx -0.00082275;$$

$$\Delta b = \begin{vmatrix} 334160 & 174.646921 & 176 & 5 \\ 16412290 & 7126.287089 & 7258 & 176 \\ 834553616 & 324873.177313 & 334160 & 7258 \\ 43211137618 & 15840271.007315 & 16412290 & 334160 \end{vmatrix} = 57754902949216; \Rightarrow$$

$$b = \frac{\Delta b}{\Delta} = \frac{57754902949216}{930834385516544} \approx 0.06204638;$$

$$\Delta c = \begin{vmatrix} 334160 & 7258 & 174.646921 & 5 \\ 16412290 & 334160 & 7126.287089 & 176 \\ 834553616 & 16412290 & 324873.177313 & 7258 \\ 43211137618 & 834553616 & 15840271.007315 & 334160 \end{vmatrix} = -67714625489920; \Rightarrow$$

$$c = \frac{\Delta c}{\Delta} = \frac{-67714625489920}{930834385516544} \approx -0.07274616;$$

$$\Delta d = \begin{vmatrix} 334160 & 7258 & 176 & 174.646921 \\ 16412290 & 334160 & 7258 & 7126.287089 \\ 834553616 & 16412290 & 334160 & 324873.177313 \\ 43211137618 & 834553616 & 16412290 & 15840271.007315 \end{vmatrix}$$

$$= 2243016096505856; \Rightarrow$$

$$d = \frac{\Delta d}{\Delta} = \frac{2243016096505856}{930834385516544} \approx 2.40968332;$$

Искомое уравнение регрессии имеет вид:

$$\hat{y} = -0.0008227 t^3 + 0.06204638 t^2 - 0.07274616 t + 2.40968332$$

Проанализируем адекватность полученного уравнения регрессии.

Найдём среднее значение измеряемой величины:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i = \frac{174.646921}{5} = 34.9293842$$

Таблица 4.6 – Вспомогательные величины для анализа уравнения.

i	x _i	y _i	ŷ _i	y _i - ȳ	(y _i - ȳ) ²	y _i - ŷ _i	(y _i - ŷ _i) ²
1	18	16.544989	16.40498984	-18.3843952	337.98598687	0.13999916	0.0195997648
2	24	24.577037	25.02876675	-10.3523472	107.17109255	-0.45172975	0.20405976703
3	29	32.77783	32.41495198	-2.1515542	4.62918548	0.36287802	0.13168045739
4	51	50.756727	50.94339133	15.8273428	250.50478011	-0.18666433	0.03484357209
5	54	49.990338	49.85481798	15.0609538	226.83232937	0.13552002	0.01836567582
Σ	—	—	—	—	927.12337437	—	0.40854924

Индекс корреляции:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}} = \sqrt{1 - \frac{0.40854924}{927.12337437}} \approx 0.99977964$$

Индекс детерминации:

$$R^2 \approx 0.99977964^2 = 0.99955934$$

По t-критерию Стьюдента все параметры уравнения регрессии являются значимыми. F-критерии Фишера: – критический (табличный)

$$F_{\text{tabl}} = F(\alpha, k_1, k_2) = F(0.05, 3, 1) \approx 215.70735049$$

– фактический

$$F_{\text{факт}} = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{k_2}{k_1} = \frac{0.99955934}{1 - 0.99955934} \cdot \frac{1}{3} \approx 756.10210141$$

где $k_1 = m = 3$, $k_2 = n - m - 1 = 5 - 3 - 1 = 1$, $\alpha = 0.05$, m – число параметров при переменных уравнения регрессии.

Так как фактическое значение критерия Фишера больше табличного, можно сделать вывод об адекватности данного уравнения регрессии.

Уравнение расхода фракции C₃-C₄ на печи пиролиза в процессе пуска от времени принимает вид:

$$G_{C_3-C_4} = 2.40968332 - 0.07274616 t + 0.06204638 t^2 - 0.0008227 t^3 \quad (3.3)$$

где t - время (ч), $G_{C_3-C_4}$ - расход фракции C₃-C₄ (т/ч).

4.1.5. Программа управления температурой питания колонны от времени пуска

Выборка экспериментальных данных по температуре питания колонны в процессе пуска приведена в таблице 4.7 и на рис. 4.5. Экспериментальные данные аппроксимированы уравнением логарифмической регрессии:

$$\hat{y} = a + b \ln x$$

Таблица 4.7. – Вспомогательные величины для определения параметров уравнения.

i	x_i	y_i	$\ln x_i$	$\ln^2 x_i$	$y_i \ln x_i$
1	0.1	10	-2.30258509	5.30189811	-23.02585093
2	1	30	0	0	0
3	5	51.909	1.60943791	2.59029039	83.5443126
4	8	64.083	2.07944154	4.32407713	133.25685232
5	11	68.02	2.39789527	5.74990174	163.10483646
6	48	85.164	3.87120101	14.98619727	329.68696289
7	54	84.811	3.98898405	15.91199372	338.30972597
Σ	127.1	393.987	11.64437469	48.86435836	1024.8768393

Здесь x_i - время измерения температуры (ч), y_i - температура питания колонны в i -й момент времени ($^{\circ}\text{C}$).

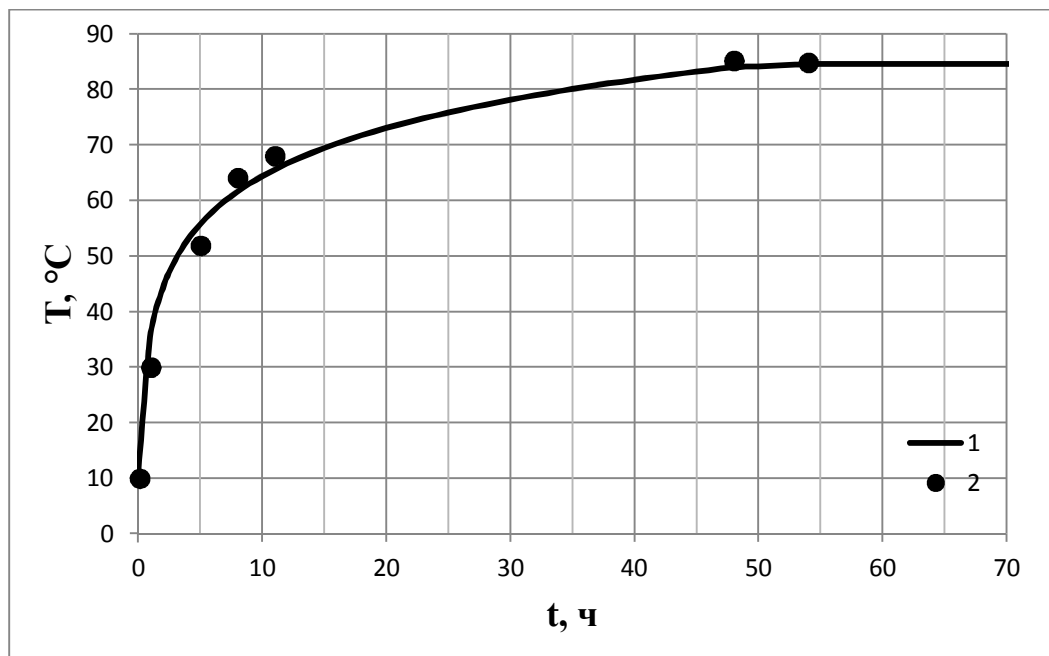


Рис. 4.5. Зависимость температуры питания на выходе из подогревателя поз. Е-ЕА-132 от времени в период пуска. 1 – данные по уравнению регрессии; 2 - экспериментальные значения.

Производится расчет параметров уравнения регрессии:

$$b = \frac{n \sum (y_i \ln x_i) - \sum \ln x_i \cdot \sum y_i}{n \sum \ln^2 x_i - (\sum \ln x_i)^2} = \frac{7 \cdot 1024.87684 - 11.644375 \cdot 393.987}{7 \cdot 48.86435836 - 11.64437469^2} \approx 12.52745117$$

$$a = \frac{1}{n} \sum y_i - \frac{b}{n} \sum \ln x_i = \frac{1}{7} \cdot 393.987 - \frac{12.52745117}{7} \cdot 11.644337469 \approx 35.44466639$$

Искомое уравнение регрессии имеет вид:

$$\hat{y} = 35.44466639 + 12.52745117 \ln t$$

Проанализируем адекватность полученного уравнения регрессии. Найдём среднее значение измеряемой величины:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i = \frac{393.987}{7} = 56.28385714$$

Таблица 4.8 – Вспомогательные величины для анализа уравнения.

i	x_i	y_i	\hat{y}_i	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$y_i - \hat{y}_i$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
1	0.1	10	6.59914408	-46.28385714	2142.19543202	3.40085592	11.5658209885
2	1	30	35.44466639	-26.28385714	690.84114631	-5.44466639	29.6443920983
3	5	51.909	55.60682124	-4.37485714	19.13937502	-3.69782124	13.6738819229
4	8	64.083	61.49476875	7.79914286	60.82662931	2.58823125	6.69894100347
5	11	68.02	65.48418232	11.73614286	137.73704916	2.53581768	6.4303713062
6	48	85.164	83.940948	28.88014286	834.06265145	1.223052	1.4958561947
7	54	84.811	85.41646923	28.52714286	813.79787959	-0.60546923	0.36659298847
Σ	—	—	—	—	4698.60016286	—	69.87585646

Индекс корреляции:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}} = \sqrt{1 - \frac{69.87585646}{4698.60016286}} \approx 0.99253633$$

Индекс детерминации: $R^2 \approx 0.99253633^2 = 0.98512837$

По t-критерию Стьюдента все параметры уравнения регрессии являются значимыми. F-критерии Фишера:

– критический (табличный)

$$F_{\text{tabl}} = F(\alpha, k_1, k_2) = F(0.05, 1, 5) \approx 6.60789098$$

– фактический

$$F_{\text{fakt}} = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{k_2}{k_1} = \frac{0.98512837}{1 - 0.98512837} \cdot \frac{5}{1} \approx 331.21055976$$

где $k_1 = m = 1, k_2 = n - m - 1 = 7 - 1 - 1 = 5, \alpha = 0.05, m$ – число параметров при переменных уравнения регрессии.

Так как фактическое значение критерия Фишера больше табличного, можно сделать вывод об адекватности данного уравнения регрессии.

Уравнение температуры питания колонны в процессе пуска от времени принимает вид:

$$T = 35.44466639 + 12.52745117 \ln t \quad (4.4)$$

где t - время (ч), T - температура питания колонны ($^{\circ}\text{C}$).

4.1.6. Программа управления уровнем жидкости в флегмовой емкости от времени пуска

Выборка экспериментальных данных по уровню жидкости в флегмовой емкости в процессе пуска приведена в таблице 4.9 и на рис. 4.6. Экспериментальные данные аппроксимированы уравнением логарифмической регрессии:

$$\hat{y} = a + b \ln x$$

Таблица 4.9 – Вспомогательные величины для расчета параметров уравнения.

i	x_i	y_i	$\ln x_i$	$\ln^2 x_i$	$y_i \ln x_i$
1	0.1	1.2456	-2.30258509	5.30189811	-2.86809999
2	4	29.718	1.38629436	1.92181206	41.19789582
3	16	41.784	2.77258872	7.68724822	115.84984717
4	18	43	2.89037176	8.3542489	124.28598559
5	23	42.989	3.13549422	9.83132398	134.79176085
Σ	61.1	158.7366	7.88216396	33.09653127	413.25738944

Здесь x_i - время измерения уровня (ч), y_i - уровень во флегмовой емкости в i -й момент времени (%).

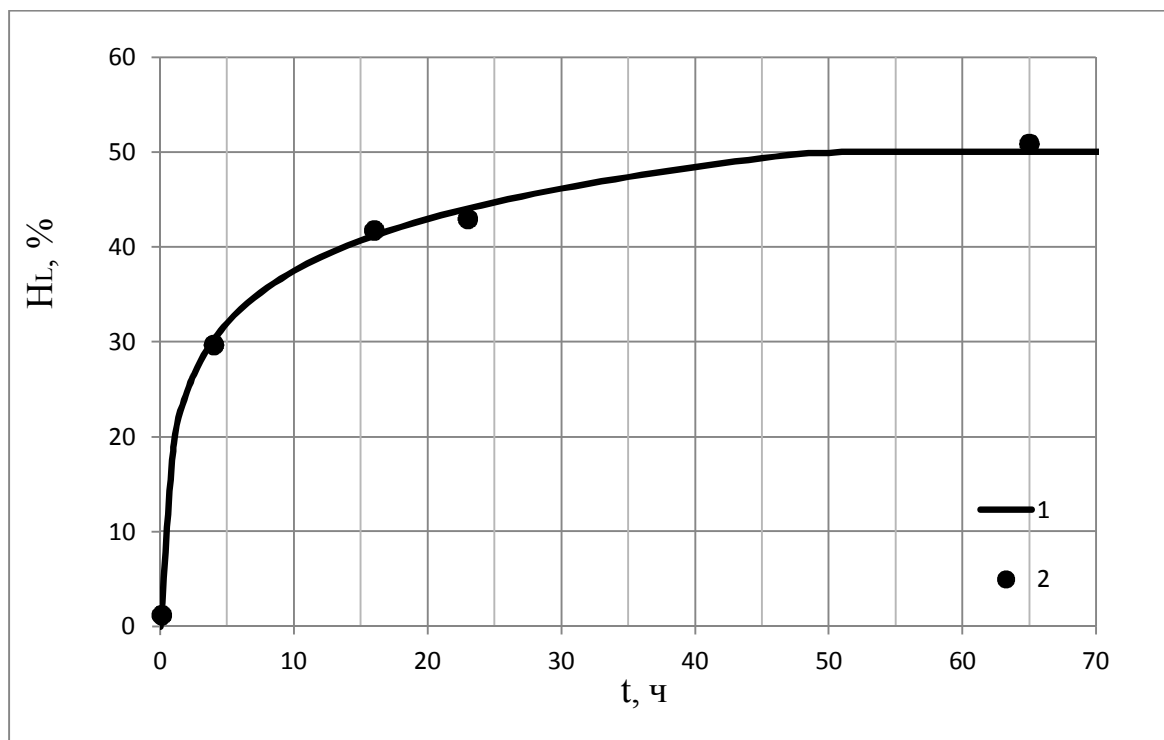


Рис. 4.6. Зависимость уровня жидкости в флегмовой ёмкости поз. Е-FA-130 от времени в период пуска. LICSA3. 1 – данные по уравнению регрессии; 2 – экспериментальные значения.

Производится расчет параметров уравнения.

$$b = \frac{n \sum (y_i \ln x_i) - \sum \ln x_i \cdot \sum y_i}{n \sum \ln^2 x_i - (\sum \ln x_i)^2} = \frac{5 \cdot 413.257389 - 7.88216396 \cdot 158.7366}{5 \cdot 33.09653127 - 7.88216396^2} \approx 7.88646666$$

$$a = \frac{1}{n} \sum y_i - \frac{b}{n} \sum \ln x_i = \frac{1}{5} \cdot 158.7366 - \frac{7.88646666}{5} \cdot 7.88216396 \approx 19.31483534$$

Искомое уравнение регрессии имеет вид:

$$\hat{y} = 19.31483 + 7.88646 \ln t$$

Проанализируем адекватность полученного уравнения регрессии.

Найдём среднее значение измеряемой величины:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i = \frac{158.7366}{5} = 31.74732$$

Таблица 4.10 – Вспомогательные величины для анализа уравнения.

i	x_i	y_i	\hat{y}_i	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$y_i - \hat{y}_i$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
1	0.1	1.2456	1.15557477	-30.50172	930.35492296	0.09002523	0.00810454203
2	4	29.718	30.2477996	-2.02932	4.11813966	-0.5297996	0.28068761616
3	16	41.784	41.18076386	10.03668	100.73494542	0.60323614	0.3638938406
4	18	43	42.10965584	11.25268	126.62280718	0.89034416	0.79271272324
5	23	42.989	44.04280593	11.24168	126.37536922	-1.05380593	1.1105069381
Σ	—	—	—	—	1288.20618445	—	2.55590567

Индекс корреляции:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}} = \sqrt{1 - \frac{2.55590567}{1288.20618445}} \approx 0.99900747$$

Индекс детерминации: $R^2 \approx 0.99900747^2 = 0.99801592$

По t-критерию Стьюдента все параметры уравнения регрессии являются значимыми. F-критерии Фишера:

– критический (табличный)

$$F_{\text{tabl}} = F(\alpha, k_1, k_2) = F(0.05, 1, 3) \approx 10.12796449$$

– фактический

$$F_{\text{факт}} = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{k_2}{k_1} = \frac{0.99801592}{1 - 0.99801592} \cdot \frac{3}{1} \approx 1509.03489355$$

где $k_1 = m = 1, k_2 = n - m - 1 = 5 - 1 - 1 = 3, \alpha = 0.05, m$ – число параметров при переменных уравнения регрессии.

Так как фактическое значение критерия Фишера больше табличного, можно сделать вывод об адекватности данного уравнения регрессии.

Уравнение уровня жидкости в флегмовой емкости в процессе пуска от времени принимает вид:

$$H_L = 19.315 + 7.886 \ln(t + 0.3) \quad (4.5)$$

где t - время (ч), H_L - уровень жидкости в флегмовой емкости (%).

4.1.7. Программа управления давлением в колонне от времени и параметров пуска

Составим уравнение регрессии для давления в колонне в зависимости от 5 параметров: время (t), расход питания (G_F), расход пара ($G_{ГП}$), расход фракции C_3-C_4 ($G_{C_3-C_4}$), уровень во флегмовой емкости (H_L). Уравнение регрессии запишем с использованием единичных, линейных коэффициентов и коэффициентов бинарного взаимодействия.

Введём следующие обозначения: $x_0 = 1, x_1 = t, x_2 = G_F, x_3 = G_{ГП}, x_4 = H_L, x_5 = G_{C_3-C_4}, x_6 = x_1x_2, x_7 = x_1x_3, x_8 = x_1x_4, x_9 = x_1x_5, x_{10} = x_2x_3,$

$$x_{11} = x_2x_4, x_{12} = x_2x_5, x_{13} = x_3x_4, x_{14} = x_3x_5, x_{15} = x_4x_5.$$

Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$P(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = P_0x_0 + P_1x_1 + P_2x_2 + P_3x_3 + P_4x_4 + P_5x_5 + P_6x_6 + P_7x_7 + P_8x_8 + P_9x_9 + P_{10}x_{10} + P_{11}x_{11} + P_{12}x_{12} + P_{13}x_{13} + P_{14}x_{14} + P_{15}x_{15}$$

Для вычисления коэффициентов P_0, P_1, \dots, P_{15} составим X-матрицу условий эксперимента (Табл. 4.11) и Y-матрицу наблюдений (Табл. 4.12), перейдя в среду MathCAD.

Таблица 4.11 – X-матрица условий эксперимента.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	1.156	0	0	0	1.156	0	0	0	0	0	0	0
2	1	2	0	0	19.315	0	0	0	38.630	0	0	0	0	0	0	0
3	1	3	1.423	0	24.781	0	4.270	0	74.344	0	0	35.269	0	0	0	0
4	1	4	3.182	0	27.979	0	12.728	0	111.916	0	0	89.026	0	0	0	0
5	1	5	4.910	0	30.248	0	24.552	0	151.239	0	0	148.529	0	0	0	0
6	1	6	6.609	0	32.008	0	39.652	0	192.046	0	0	211.529	0	0	0	0
7	1	7	8.277	0	33.445	0	57.938	0	234.118	0	0	276.822	0	0	0	0
8	1	8	9.915	0	34.661	0	79.318	0	277.290	0	0	343.655	0	0	0	0
9	1	9	11.522	0	35.714	0	103.702	0	321.429	0	0	411.514	0	0	0	0
10	1	10	13.100	0	36.643	0	130.999	0	366.432	0	0	480.022	0	0	0	0
11	1	11	14.647	0	37.474	0	161.119	0	412.215	0	0	548.891	0	0	0	0
12	1	12	16.164	0	38.226	0	193.972	0	458.709	0	0	617.893	0	0	0	0
13	1	13	17.651	0	38.912	0	229.466	0	505.856	0	0	686.843	0	0	0	0
14	1	14	19.108	0	39.543	0	267.511	0	563.605	0	0	755.588	0	0	0	0
15	1	15	20.534	0	40.128	0	308.016	0	601.915	0	0	823.998	0	0	0	0
16	1	16	21.931	0	40.672	0	350.891	0	650.749	0	0	891.961	0	0	0	0
17	1	17	23.297	0.041	41.18	0	396.046	0.700	700.073	0	0.959	959.380	0	1.696	0	0
18	1	18	24.633	0.169	41.659	16.405	443.389	3.043	749.860	295.290	4.165	1.026*10 ³	404.0999	7.043	2.774	683.414
19	1	19	25.938	0.309	42.110	17.783	492.830	5.865	800.083	337.877	8.007	1.092*10 ³	461.263	12.999	5.489	748.836
20	1	20	27.214	0.459	42.536	19.191	544.278	9.183	850.721	383.826	12.496	1.158*10 ³	522.270	19.531	8.812	816.323
21	1	21	28.459	0.620	42.941	20.625	597.643	13.013	901.752	433.125	17.635	1.222*10 ³	586.970	26.608	12.780	885.649
22	1	22	29.674	0.789	43.325	22.179	652.835	17.364	953.158	485.740	23.421	1.286*10 ³	655.181	34.196	17.426	956.584
23	1	23	30.859	0.967	43.692	23.549	709.762	22.245	1.005*10 ³	541.619	29.846	1.348*10 ³	726.693	42.258	22.776	1.029*10 ³

Таблица 4.12 – Y-матрица наблюдений.

	0
0	0
1	0.459
2	1.955
3	3.273
4	4.423
5	5.417
6	6.267
7	6.982
8	7.574
9	8.055
10	8.435
11	8.726
12	8.938
13	9.083
14	9.171
15	9.215

Транспонируем X-матрицу и создадим матрицу X_0 .

Таблица 4.13 – Матрица X_0 .

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0	0	0	1.423	3.182	4.910	6.609	8.277	9.915	11.522	13.100	14.647	16.164	17.651	19.108
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1.156	19.315	24.781	27.979	30.248	32.008	33.445	34.661	35.714	36.643	37.474	38.226	38.912	39.543
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	4.270	12.728	24.552	39.652	57.938	79.318	103.702	130.999	161.119	193.972	229.466	267.511
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	1.156	38.63	74.344	111.916	151.239	192.046	234.118	277.290	321.429	366.432	412.215	458.709	505.856	553.605
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	35.269	89.026	148.529	211.529	276.822	343.655	411.514	480.022	548.891	617.893	686.843	755.588
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Умножим слева X-матрицу и Y-матрицу на матрицу X_0 .

Таблица 4.14 – Матрица $X_0 * X$.

	0	1	2	3	4	5	6
0	51	$1.275 * 10^3$	$1.53 * 10^3$	103.32	$1.999 * 10^3$	$1.232 * 10^3$	$5.034 * 10^4$
1	$1.275 * 10^3$	$4.293 * 10^4$	$5.034 * 10^4$	$4.074 * 10^3$	$5.491 * 10^4$	$4.536 * 10^4$	$1.866 * 10^6$
2	$1.53 * 10^3$	$5.034 * 10^4$	$5.951 * 10^4$	$4.661 * 10^3$	$6.598 * 10^4$	$5.292 * 10^4$	$2.156 * 10^6$
3	103.32	$4.074 * 10^3$	$4.661 * 10^3$	429.184	$4.547 * 10^3$	$4.514 * 10^3$	$1.883 * 10^5$
4	$1.999 * 10^3$	$5.491 * 10^4$	$6.598 * 10^4$	$4.547 * 10^3$	$8.288 * 10^4$	$5.412 * 10^4$	$2.201 * 10^6$
5	$1.232 * 10^3$	$4.536 * 10^4$	$5.292 * 10^4$	$4.514 * 10^3$	$5.412 * 10^4$	$5.015 * 10^4$	$2.026 * 10^6$
6	$5.034 * 10^4$	$1.866 * 10^6$	$2.156 * 10^6$	$1.883 * 10^5$	$2.201 * 10^6$	$2.026 * 10^6$	$8.419 * 10^7$
7	$4.074 * 10^3$	$1.667 * 10^5$	$1.883 * 10^5$	$1.803 * 10^4$	$1.794 * 10^5$	$1.842 * 10^5$	$7.851 * 10^6$
8	$5.491 * 10^4$	$1.878 * 10^6$	$2.201 * 10^6$	$1.794 * 10^5$	$2.376 * 10^6$	$1.995 * 10^6$	$8.196 * 10^7$
9	$4.536 * 10^4$	$1.767 * 10^6$	$2.026 * 10^6$	$1.842 * 10^5$	$1.995 * 10^6$	$1.954 * 10^6$	$8.127 * 10^7$
10	$4.661 * 10^3$	$1.883 * 10^5$	$2.137 * 10^5$	$2.019 * 10^4$	$2.052 * 10^5$	$2.084 * 10^5$	$8.808 * 10^6$
11	$6.598 * 10^4$	$2.201 * 10^6$	$2.599 * 10^6$	$2.052 * 10^5$	$2.854 * 10^6$	$2.327 * 10^6$	$9.466 * 10^7$
12	$5.292 * 10^4$	$2.026 * 10^6$	$2.336 * 10^6$	$2.084 * 10^5$	$2.327 * 10^6$	$2.242 * 10^6$	$9.231 * 10^7$
13	$4.547 * 10^3$	$1.794 * 10^5$	$2.052 * 10^5$	$1.890 * 10^4$	$2.001 * 10^5$	$1.988 * 10^5$	$8.291 * 10^6$
14	$4.514 * 10^3$	$1.842 * 10^5$	$2.084 * 10^5$	$1.990 * 10^4$	$1.988 * 10^5$	$2.039 * 10^5$	$8.660 * 10^6$
15	$5.412 * 10^4$	$1.995 * 10^6$	$2.327 * 10^6$	$1.988 * 10^5$	$2.377 * 10^6$	$2.206 * 10^6$	$8.915 * 10^7$

Таблица 4.15 – Матрица $X_0 * Y$.

	0
0	421.826
1	$1.165 * 10^4$
2	$1.402 * 10^4$
3	957.571
4	$1.759 * 10^4$
5	$1.141 * 10^4$
6	$4.653 * 10^5$
7	$3.776 * 10^4$
8	$5.038 * 10^5$
9	$4.203 * 10^5$
10	$4.320 * 10^4$
11	$6.062 * 10^5$
12	$4.903 * 10^5$
13	$4.214 * 10^4$
14	$4.184 * 10^4$
15	$5.013 * 10^5$

Находим матрицу $(X_0 * X)^{-1}$, обратную матрице $(X_0 * X)$:

Таблица 4.16 – Матрица $(X_0 * X)^{-1}$.

	0	1	2	3	4	5	6
0	2.796	-1.621	-5.15	101.148	-1.802	16.205	-0.344
1	-1.621	2.375	2.012	-25.076	0.592	-7.964	0.138
2	-5.15	2.012	20.368	-258.325	5.353	-56.912	1.111
3	101.148	-25.076	-258.325	$1.522 * 10^5$	-104.817	$-2.859 * 10^3$	-18.476
4	-1.802	0.592	5.353	-104.817	1.809	-15.513	0.34
5	16.205	-7.964	-56.912	$-2.859 * 10^3$	-15.513	295.382	-3.224
6	-0.344	0.138	1.111	-18.476	0.34	-3.224	0.067
7	-30.905	9.338	81.456	$-3.558 * 10^4$	31.523	601.782	5.619
8	0.895	-0.37	-2.631	49.669	-0.87	7.667	-0.166
9	4.463	-1.354	-11.755	$5.279 * 10^3$	-4.55	-90.329	-0.811
10	17.688	-5.185	-46.688	$2.261 * 10^4$	-18.102	-402.352	-3.227
11	-0.283	0.099	0.708	-17.507	0.279	-2.099	0.05
12	-3.171	0.938	8.384	$-3.856 * 10^3$	3.243	65.882	0.579
13	0.396	-0.375	-1.936	$-1.787 * 10^3$	-0.326	54.773	-0.086
14	0.169	-0.066	-0.477	-851.137	-0.168	25.163	-0.032
15	-0.442	0.222	1.492	72.808	0.421	-7.189	0.086

Определяем коэффициенты P_0, P_1, \dots, P_{15} :

Таблица 4.17 – Матрица $(X_0 * X)^{-1} * (X_0 * Y)$.

	0
0	-0.099
1	0.471
2	0.902
3	-6.95
4	0.099
5	-0.793
6	-0.01
7	0.548
8	-0.021
9	-0.077
10	-0.069
11	-0.00556
12	0.038
13	0.061
14	-0.077
15	0.03

Таким образом, уравнение регрессии примет вид:

$$P(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = -0.099 x_0 + 0.471 x_1 + 0.902 x_2 - 6.95 x_3 + \\ + 0.099 x_4 - 0.793 x_5 - 0.01 x_6 + 0.548 x_7 - 0.021 x_8 - 0.077 x_9 - \\ - 0.069 x_{10} - 0.00556 x_{11} + 0.038 x_{12} + 0.061 x_{13} - 0.077 x_{14} + 0.03 x_{15}$$

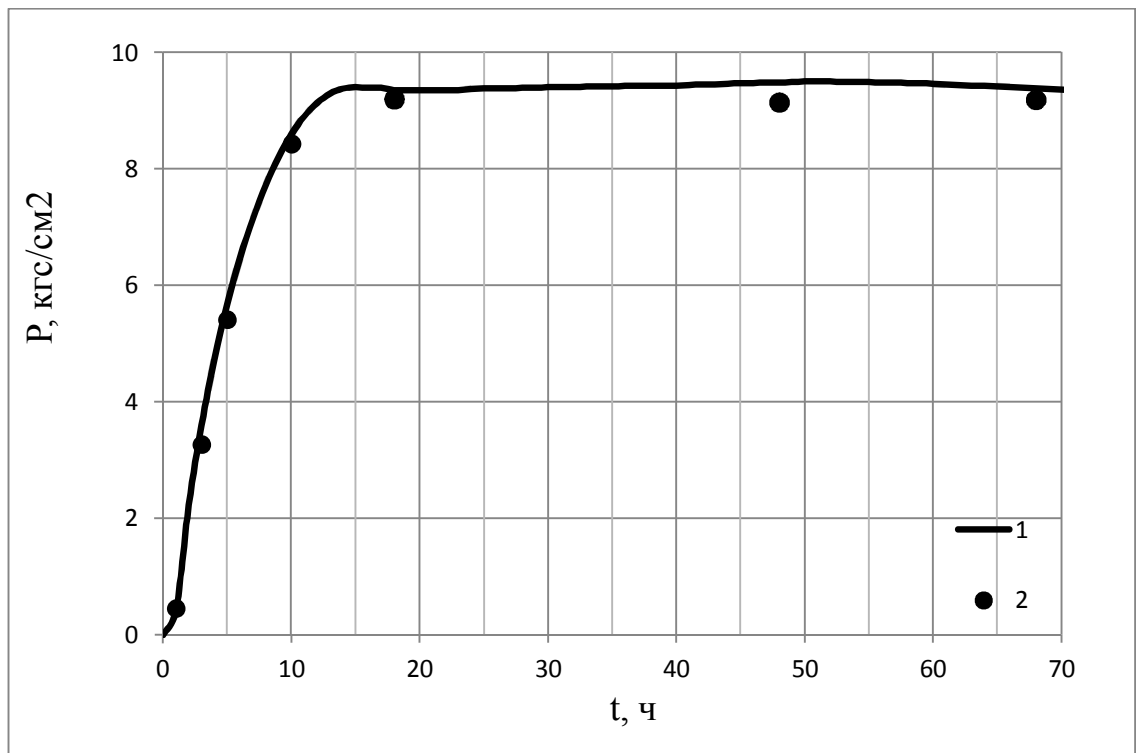


Рис. 4.7. Зависимость изменения давления в колонне поз. E-DA-105 от времени в период пуска. 1 – данные по уравнению регрессии; 2 – экспериментальные значения.

Проанализируем адекватность полученного уравнения регрессии.

По t-критерию Стьюдента все параметры уравнения регрессии являются значимыми.

Вычислим остаточную дисперсию:

$$S_{\text{ост}^*}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{N - L} = 0.197384$$

Вычислим дисперсию относительно среднего:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{N - 1} = 5.365262$$

Определим фактическое значение критерия Фишера:

$$F = \frac{S_y^2}{S_{\text{ост}^*}^2} = 27.18184$$

Определим табличное значение критерия Фишера:

$$F_p(f_1, f_2),$$

где $p=0.05$ – уровень значимости; $f_1=N-L$ – число степеней свободы остаточной дисперсии; f_2 – число степеней свободы дисперсии относительно среднего; N – число опытов в матрице планирования; L – число коэффициентов в уравнении регрессии.

$$F_t = 2.301$$

Так как фактическое значение критерия Фишера больше табличного, можно сделать вывод об адекватности данного уравнения регрессии.

Изменение давления в колонне (кгс/см^2) в зависимости от времени пуска, расходов питания в колонну, пара в кипятильник, фракции C_3-C_4 на печи пиролиза и уровня во флегмовой емкости в период пуска записывается в виде:

$$\begin{aligned} P = & -0.099 + 0.471t + 0.902 G_F - 6.95 G_{\text{ГП}} + 0.099 L - 0.793 G_{C_3-C_4} - \\ & - 0.01t \cdot G_F + 0.548 t \cdot G_{\text{ГП}} - 0.021t \cdot L - 0.077 t \cdot G_{C_3-C_4} - \\ & - 0.069 G_F \cdot G_{\text{ГП}} - 0.00556 G_F \cdot L + 0.038 G_F \cdot G_{C_3-C_4} + \\ & + 0.061 G_{\text{ГП}} \cdot L - 0.077 G_{\text{ГП}} \cdot G_{C_3-C_4} + 0.03 L \cdot G_{C_3-C_4}, \end{aligned} \quad (4.6)$$

где t - время (с), G_F - расход питания в колонну (т/ч), $G_{\text{ГП}}$ - расход пара в кипятильник (т/ч), $G_{C_3-C_4}$ - расход фракции C_3-C_4 на печи пиролиза (т/ч), H_L - уровень во флегмовой емкости (%).

4.1.8. Программа управления уровнем в кубе колонны от времени и параметров пуска

Составим уравнение регрессии для уровня в кубе колонны (L_k) в зависимости от 3 параметров: время (t), расход питания (G_F), расход пара ($G_{\text{ГП}}$). Уравнение регрессии запишем с использованием единичных, линейных коэффициентов и коэффициентов бинарного взаимодействия.

Введём следующие обозначения: $x_0 = 1$, $x_1 = t$, $x_2 = G_F$, $x_3 = G_{\text{ГП}}$, $x_4 = x_1 x_2$, $x_5 = x_1 x_3$, $x_6 = x_2 x_3$.

Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$L(x_1, x_2, x_3) = L_0x_0 + L_1x_1 + L_2x_2 + L_3x_3 + L_4x_4 + L_5x_5 + L_6x_6$$

Для вычисления коэффициентов L_0, L_1, \dots, L_6 составим X-матрицу условий эксперимента (табл 4.18) и Y-матрицу наблюдений (табл 4.19), перейдя в среду MathCAD.

Таблица 4.18 – Матрица условий эксперимента X.

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	1	0	0	0	0	0	0	8.399
1	1	1	0	0	0	0	0	8.222
2	1	2	0	0	0	0	0	8.603
3	1	3	1.423	0	4.270	0	0	9.484
4	1	4	3.182	0	12.728	0	0	10.809
5	1	5	4.910	0	24.552	0	0	12.520
6	1	6	6.609	0	39.652	0	0	14.560
7	1	7	8.277	0	57.938	0	0	16.872
8	1	8	9.915	0	79.318	0	0	19.398
9	1	9	11.522	0	103.702	0	0	22.082
10	1	10	13.100	0	130.999	0	0	24.866
11	1	11	14.647	0	161.119	0	0	27.693
12	1	12	16.164	0	193.972	0	0	30.506
13	1	13	17.651	0	229.466	0	0	33.248
14	1	14	19.108	0	267.511	0	0	35.860

Таблица 4.19 – Матрица наблюдений Y.

	0
0	8.570
1	8.146
2	7.722
3	9.076
4	10.985
5	13.005
6	15.133
7	17.363
8	19.693
9	22.118
10	24.635
11	27.2339
12	29.927
13	32.694
14	35.538
15	38.453

Транспонируем X-матрицу и создадим матрицу X_0 .

Таблица 4.20 – Матрица X_0 .

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	1	2	3	4	5	6	7
2	0	0	0	1.423	3.182	4.910	6.609	8.277
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	4.270	12.728	24.552	39.652	57.938
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	8.399	8.222	8.603	9.484	10.809	12.520	14.560	16.872

Умножим слева X-матрицу и Y-матрицу на матрицу X_0 :

$$x_0 \cdot x = \begin{pmatrix} 51 & 1.275 \times 10^3 & 1.53 \times 10^3 & 103.32 & 5.034 \times 10^4 & 4.074 \times 10^3 & 4.661 \times 10^3 & 1.897 \times 10^3 \\ 1.275 \times 10^3 & 4.293 \times 10^4 & 5.034 \times 10^4 & 4.074 \times 10^3 & 1.866 \times 10^6 & 1.667 \times 10^5 & 1.883 \times 10^5 & 5.529 \times 10^4 \\ 1.53 \times 10^3 & 5.034 \times 10^4 & 5.951 \times 10^4 & 4.661 \times 10^3 & 2.156 \times 10^6 & 1.883 \times 10^5 & 2.137 \times 10^5 & 6.647 \times 10^4 \\ 103.32 & 4.074 \times 10^3 & 4.661 \times 10^3 & 429.184 & 1.883 \times 10^5 & 1.803 \times 10^4 & 2.019 \times 10^4 & 4.677 \times 10^3 \\ 5.034 \times 10^4 & 1.866 \times 10^6 & 2.156 \times 10^6 & 1.883 \times 10^5 & 8.419 \times 10^7 & 7.851 \times 10^6 & 8.808 \times 10^6 & 2.251 \times 10^6 \\ 4.074 \times 10^3 & 1.667 \times 10^5 & 1.883 \times 10^5 & 1.803 \times 10^4 & 7.851 \times 10^6 & 7.741 \times 10^5 & 8.594 \times 10^5 & 1.844 \times 10^5 \\ 4.661 \times 10^3 & 1.883 \times 10^5 & 2.137 \times 10^5 & 2.019 \times 10^4 & 8.808 \times 10^6 & 8.594 \times 10^5 & 9.577 \times 10^5 & 2.11 \times 10^5 \\ 1.897 \times 10^3 & 5.529 \times 10^4 & 6.647 \times 10^4 & 4.677 \times 10^3 & 2.251 \times 10^6 & 1.844 \times 10^5 & 2.11 \times 10^5 & 7.908 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

$$x_0 \cdot y = \begin{pmatrix} 1.894 \times 10^3 \\ 5.516 \times 10^4 \\ 6.633 \times 10^4 \\ 4.664 \times 10^3 \\ 2.245 \times 10^6 \\ 1.839 \times 10^5 \\ 2.104 \times 10^5 \\ 7.892 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

Находим матрицу $(X_0 * X)^{-1}$, обратную матрице $(X_0 * X)$:

$$(x_0 \cdot x)^{-1} = \begin{pmatrix} 10.044 & -0.86 & 1.442 & -29.366 & 0.048 & -0.446 & 0.617 & -1.077 \\ -0.86 & 0.315 & -0.259 & 0.905 & -1.937 \times 10^{-3} & -0.016 & 1.493 \times 10^{-3} & 0.053 \\ 1.442 & -0.259 & 0.306 & -3.262 & 5.056 \times 10^{-3} & -0.028 & 0.054 & -0.14 \\ -29.366 & 0.905 & -3.262 & 106.157 & -0.165 & 1.903 & -2.494 & 3.459 \\ 0.048 & -1.937 \times 10^{-3} & 5.056 \times 10^{-3} & -0.165 & 2.765 \times 10^{-4} & -2.971 \times 10^{-3} & 3.816 \times 10^{-3} & -5.382 \times 10^{-3} \\ -0.446 & -0.016 & -0.028 & 1.903 & -2.971 \times 10^{-3} & 0.039 & -0.049 & 0.056 \\ 0.617 & 1.493 \times 10^{-3} & 0.054 & -2.494 & 3.816 \times 10^{-3} & -0.049 & 0.062 & -0.075 \\ -1.077 & 0.053 & -0.14 & 3.459 & -5.382 \times 10^{-3} & 0.056 & -0.075 & 0.125 \end{pmatrix}$$

Определяем коэффициенты L_0, L_1, \dots, L_6 :

$$(x_0 \cdot x)^{-1} \cdot (x_0 \cdot y) = \begin{pmatrix} 8.57 \\ -0.424 \\ 1.12 \\ -27.617 \\ 0.043 \\ -0.45 \\ 0.602 \\ -6.112 \times 10^{-10} \end{pmatrix}$$

Таким образом, уравнение регрессии примет вид:

$$L(x_1, x_2, x_3) = 8.57x_0 - 0.424x_1 + 1.12x_2 - 27.617x_3 + 0.0434x_4 - 0.045x_5 + 0.602x_6$$

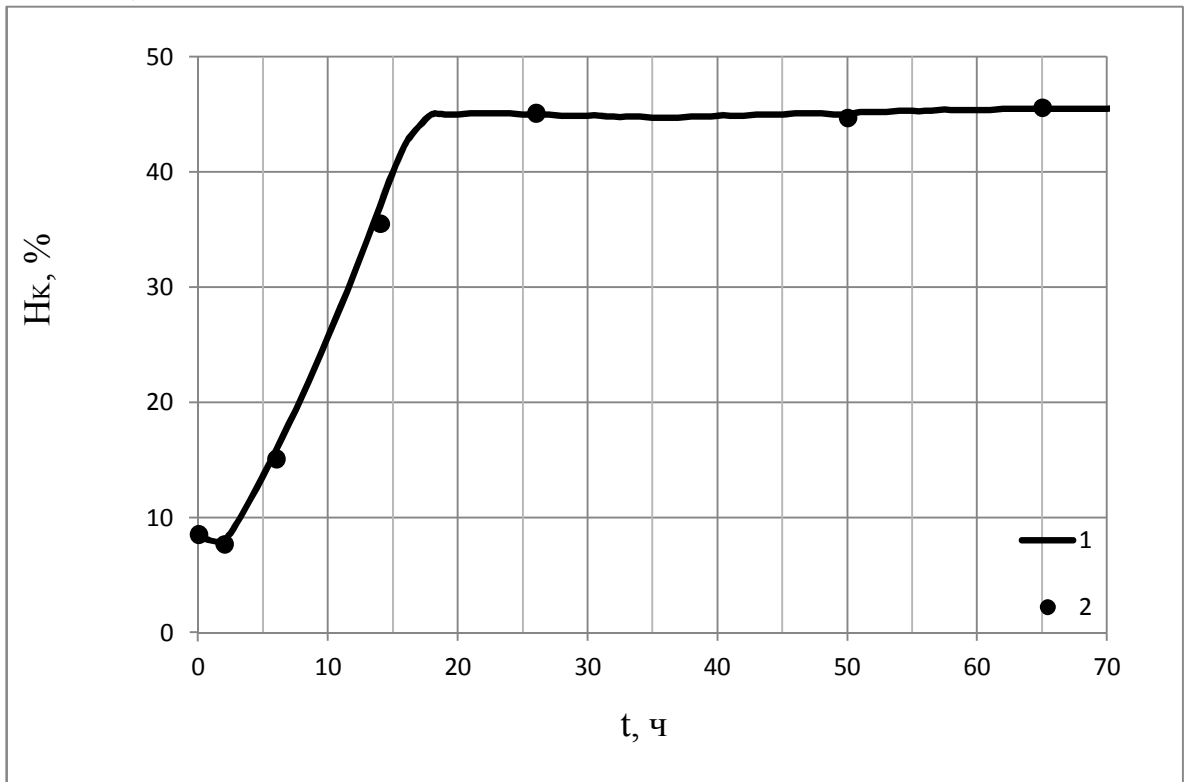


Рис. 3.7. Зависимость изменения уровня в кубе колонны поз. Е-DA-105 от времени в период пуска. 1 – данные по уравнению регрессии; 2 – экспериментальные значения.

Проанализируем адекватность полученного уравнения регрессии.

По t-критерию Стьюдента все параметры уравнения регрессии являются значимыми.

Вычислим остаточную дисперсию:

$$S_{\text{ост}^*}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{N - L} = 0.236535$$

Вычислим дисперсию относительно среднего:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{N - 1} = 166.2847$$

Определим фактическое значение критерия Фишера:

$$F = \frac{S_y^2}{S_{\text{ост}^*}^2} = 703.0039$$

Определим табличное значение критерия Фишера: $F_p(f_1, f_2)$,

где $p=0.05$ – уровень значимости; $f_1=N-L$ – число степеней свободы остаточной дисперсии; f_2 – число степеней свободы дисперсии относительно среднего; N – число опытов в матрице планирования; L – число коэффициентов в уравнении регрессии.

$$F_t = 1.76$$

Так как фактическое значение критерия Фишера больше табличного, можно сделать вывод об адекватности данного уравнения регрессии.

Изменение уровня в кубе колонны (%) в зависимости от времени пуска, расходов питания в колонну и пара в кипятильник в период пуска записывается в виде:

$$H_k = 8.57 - 0.424 t + 1.12 G_F - 27.617 G_{\Gamma\Pi} + 0.0434 t \cdot G_F - 0.045 t \cdot G_{\Gamma\Pi} + 0.602 G_F \cdot G_{\Gamma\Pi} \quad (4.7)$$

где t - время (с), G_F - расход питания в колонну (т/ч), $G_{\Gamma\Pi}$ - расход пара в кипятильник (т/ч).

4.2. Алгоритмы программного управления установкой разделения углеводородов

4.2.1. Программное управление расходом питания в колонну

Уравнение программы подачи питания в колонну в принимаем в виде функции $G_F^P(t)$, а для установки дебутанизации в период пуска в виде полученного ранее уравнения регрессии (4.1):

$$G_F^P = 1.85t - 0.015t^2, \quad (4.8)$$

Программное управление расходом питания в колонну в период пуска представим в виде алгоритма (рис. 4.9). В алгоритме подачи питания в колонну реализована система программного управления с обратной связью. Изменение расхода во времени подчиняется программе (4.8) и корректируется в зависимости от возможных возмущений по величине текущего измеренного значения расхода G_F .

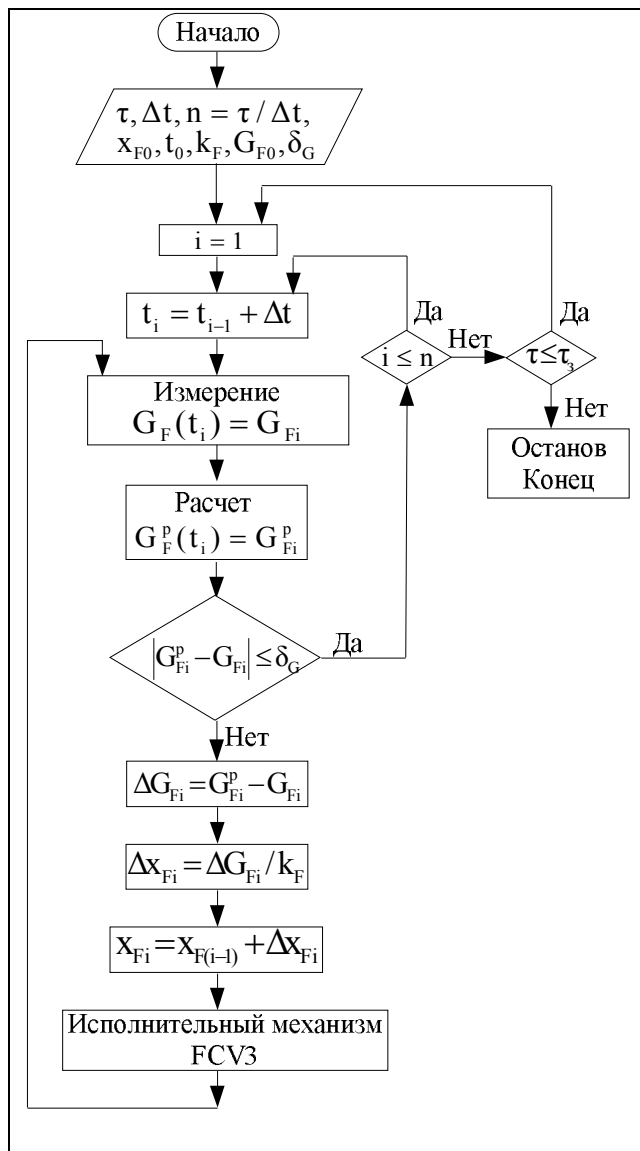


Рис. 4.9. Алгоритм управления программным регулятором расхода питания FIC3.

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 $x_{Fi} = x_{F(i-1)} + \Delta x_{Fi}$. Электрический сигнал о изменении степени открытия регулирующего органа через модуль вывода передается на позиционер исполнительного механизма, который изменяет степень открытия регулирующего органа.

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 FCV3; 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 (4.8); x_{Fi} - значение степени открытия регулирующего органа в i -й момент времени.

В момент времени t_i измеренное значение расхода G_{Fi} сравнивается с программным значением G_{Fi}^p . Если отклонение измеренного значения G_{Fi}

Проверяется условие окончания работы программного регулятора. Если время управления не окончено ($i \leq n$), то в следующий момент времени t_{i+1} повторяется расчет и вывод управляющего воздействия на исполнительный механизм FCV3. По окончании времени управления ($i > n$) программный регулятор поддерживает величину расхода на заданном программой значении G_F^3 .

4.2.2. Программное управление температурой питания на входе в колонну

Уравнение программы подогрева питания в теплообменнике E-EA-132 принимаем в виде $T_1^P(t)$, а для установки дебутанизации в период пуска в виде полученного ранее уравнения регрессии (4.4):

$$T_1^P = 35.445 + 12.527 \ln(t + 0.15) \quad (4.9)$$

$$\text{и программы расхода питания } G_F^P = 1.85t - 0.015t^2,$$

Здесь, как и в предыдущем случае реализована система программного управления с обратной связью. Изменение температуры питания по уравнению (4.9) происходит по программе расхода исходной смеси G_F в зависимости от расхода закалочной воды в теплообменник E-EA-132. Программное управление температурой питания в колонну представим в виде алгоритма (рис. 4.10).

В момент времени t_i измеряются значения температуры питания на выходе теплообменника T_{1i} , расхода G_{Fi} , определяется программное значение температуры питания T_{1i}^P по уравнению (4.9). Определяется отклонение измеренной температуры T_{1i} от программного значения T_{1i}^P и проверяется условие $|T_{1i}^P - T_{1i}| \leq \delta_T$, где δ_T - допустимое отклонение температуры. Если условие выполняется, то происходит измерение и расчет температуры при $t_i = t_{i-1} + \Delta t$. При невыполнении условия рассчитывается отклонение расхода закалочной воды ΔG_{3Bi} как отношение отклонения температуры к коэффициенту усиления k_{03} . Коэффициент усиления k_{03} определяется по номинальным значениям параметров, соответствующих режиму нормального

функционирования по каналу: отклонение температуры питания на выходе теплообменника к расходу закалочной воды:

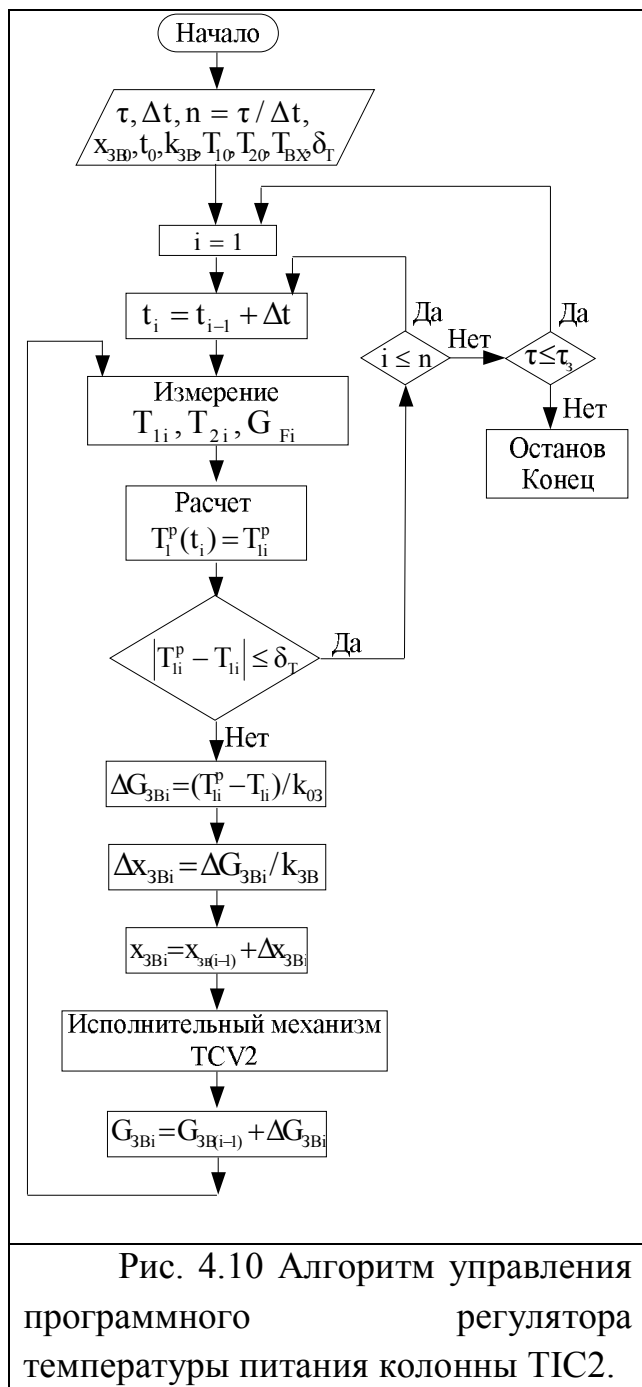


Рис. 4.10 Алгоритм управления программного регулятора температуры питания колонны TIC2.

на позиционер исполнительного механизма, который изменяет степень открытия регулирующего органа, изменяя расход закалочной воды.

После вывода процесса на режим ($i > n$) программный регулятор TIC2 поддерживает температуру питания на заданном программой значении $T_{1i}^p = T_3 = 85^\circ\text{C}$ до окончания времени управления установкой $\tau = \tau_3$.

Здесь: $x_{зв0}$ - начальное положение регулирующего органа, t_0 - начало

$$k_{03} = \frac{T_{\text{ИНОМ}}}{G_{\text{ЗВНОМ}}}$$

Например, в процессе пуска установки дебутанизации углеводородов коэффициент равен:

$$k_{03} = \frac{85^\circ\text{C}}{30\text{Т/ч}} = 2,83 \frac{\text{град} \cdot \text{ч}}{\text{Т}}$$

В режиме нормального функционирования коэффициент усиления k_{03} подбирается из условия устойчивости и времени протекания процесса, удовлетворяя неравенству $|T_{1i}^p(t) - T_{1i}| \leq \delta_T$, где $\delta_T \rightarrow 0$.

Затем по отклонению расхода закалочной воды $\Delta G_{звi}$ рассчитывается изменение степени открытия регулирующего органа $\Delta x_{звi}$ и его новое положение $x_{звi} = x_{зв(i-1)} + \Delta x_{звi}$. Электрический сигнал о изменении степени открытия регулирующего органа через модуль вывода передается

подачи закалочной воды, T_{10} , T_{20} - начальные значения температуры в трубном и межтрубном пространствах, $T_{вх}$ - температура исходной смеси на входе, δ_T - допустимое отклонение температуры от программного значения.

4.2.3. Программное управление расходом флегмы

Уравнение программы подогрева расхода флегмы принимаем в виде $L^P(t)$, а для установки дебутанизации в период пуска в виде полученного ранее уравнения регрессии:

$$L^P = 22.1586 - 87.9795/t \quad (4.10)$$

Программное управление расходом флегмы в колонну в период пуска представим в виде алгоритма (рис. 4.11). В алгоритме подачи флегмы в колонну реализована система программного управления с обратной связью. Изменение расхода во времени подчиняется программе (4.10) и корректируется в зависимости от возможных возмущений по величине текущего измеренного значения расхода флегмы L .

Входными параметрами алгоритма являются:

τ - время управления; Δt - период опроса расходомера FIC4; n - количество итераций; x_{L0} - начальное положение регулирующего органа на трубопроводе подачи флегмы FCV4; t_0 - начало отсчета времени; L_i - измеренное значение расхода в i -й момент времени; L_i^P - программное значение расхода в i -й момент времени, полученное по уравнению (4.10); x_{Li} - значение степени открытия регулирующего органа в i -й момент времени.

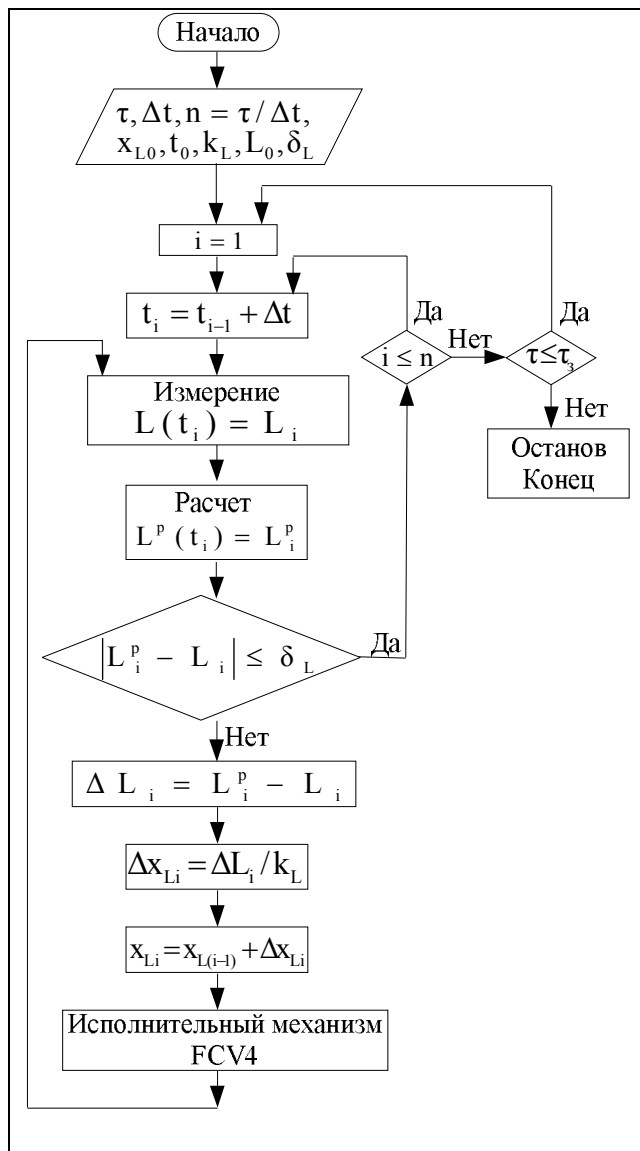


Рис. 4.11. Алгоритм управления программным регулятором расхода флегмы FIC4.

исполнительного механизма, который изменяет степень открытия регулирующего органа.

Проверяется условие окончания работы программного регулятора. Если время управления не окончено ($i \leq n$), то в следующий момент времени t_{i+1} повторяется расчет и вывод управляющего воздействия на исполнительный механизм FCV4. По окончании времени управления ($i > n$) программный регулятор поддерживает величину расхода на заданном программой значении $L^3 = 20 \text{ т/ч}$.

В момент времени t_i измеренное значение расхода L_i сравнивается с программным значением L_i^p . Если отклонение измеренного значения L_i и программного L_i^p не превышает допустимую погрешность δ_L , то в следующий момент времени $t_i + \Delta t$ снова измеряется L_i и рассчитывается L_i^p и т.д. до выполнения условия по δ_L . Если отклонение стало больше δ_L , то в зависимости от отклонения ΔL_i определяется изменение степени открытия регулирующего органа Δx_{Li} и его новое положение $x_{Li} = x_{L(i-1)} + \Delta x_{Li}$. Электрический сигнал о изменении степени открытия регулирующего органа через модуль вывода передается на позиционер

4.2.4. Программное управление расходом фракции С3-С4

Уравнение программы подогрева расхода фракции С3-С4 принимаем в виде $G_{C3-C4}^P(t)$, а для установки дебутанизации в период пуска в виде полученного ранее уравнения регрессии (4.3):

$$G_{C3-C4}^P = 2.41 - 0.073t + 0.062t^2 - 0.000823t^3 \quad (4.12)$$

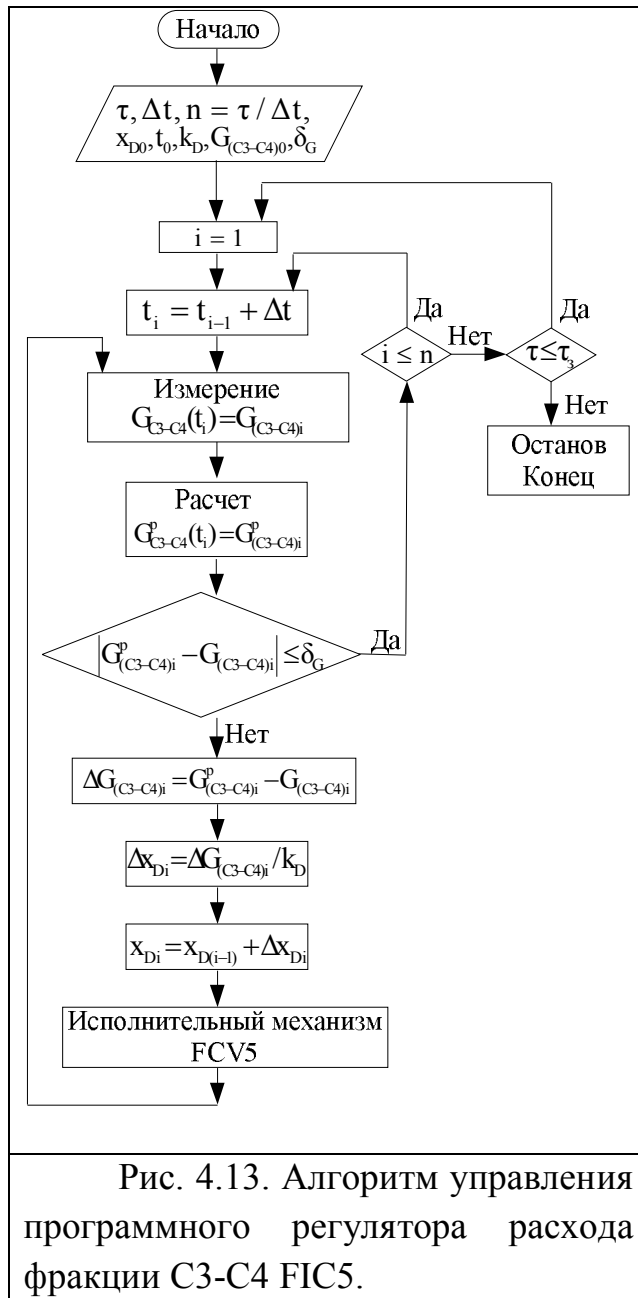


Рис. 4.13. Алгоритм управления программного регулятора расхода фракции С3-С4 FIC5.

t_0 – начало отсчета времени; $G_{(C3-C4)i}$ – измеренное значение расхода в i -й момент времени; $G_{(C3-C4)i}^P$ – программное значение расхода в i -й момент

Программное управление расходом фракции С3-С4 на пиролиз в период пуска представим в виде алгоритма (рис. 4.13). В алгоритме подачи фракции С3-С4 на пиролиз реализована система программного управления с обратной связью. Изменение расхода во времени подчиняется программе (4.12) и корректируется в зависимости от возможных возмущений по величине текущего измеренного значения расхода G_{C3-C4} .

Входными параметрами алгоритма являются:

τ – время управления; Δt – период опроса расходомера FIC5; n – количество итераций; x_{D0} – начальное положение регулирующего органа на трубопроводе подачи питания FCV5;

времени, полученное по уравнению (4.12); x_{Di} – значение степени открытия регулирующего органа в i -й момент времени.

В момент времени t_i измеренное значение расхода $G_{(C3-C4)i}$ сравнивается с программным значением $G_{(C3-C4)i}^p$. Если отклонение измеренного значения $G_{(C3-C4)i}$ и программного $G_{(C3-C4)i}^p$ не превышает допустимую погрешность δ_G , то в следующий момент времени $t_i + \Delta t$ снова измеряется $G_{(C3-C4)i}$ и рассчитывается $G_{(C3-C4)i}^p$ и т.д. до выполнения условия по δ_G . Если отклонение стало больше δ_G , то в зависимости от отклонения $\Delta G_{(C3-C4)i}$ определяется изменение степени открытия регулирующего органа Δx_{Di} и его новое положение $x_{Di} = x_{D(i-1)} + \Delta x_{Di}$. Электрический сигнал о изменении степени открытия регулирующего органа через модуль вывода передается на позиционер исполнительного механизма, который изменяет степень открытия регулирующего органа.

Проверяется условие окончания работы программного регулятора. Если время управления не окончено ($i \leq n$), то в следующий момент времени t_{i+1} повторяется расчет и вывод управляющего воздействия на исполнительный механизм FCV5. По окончании времени управления ($i > n$) программный регулятор поддерживает величину расхода на заданном программой значении G_{C3-C4}^3 .

4.2.5. Программное управление давлением в колонне

Уравнение программы набора давления принимаем в виде $P^p(t)$, а для установки дебутанизации в период пуска в виде полученного ранее уравнения регрессии (4.6):

$$\begin{aligned}
P^P(t, G_F^P, G_{ГП}^P, H_L^P, G_{C_3-C_4}^P) = & -0.099 + 0.471t + 0.902 G_F^P - \\
& - 6.95 G_{ГП}^P + 0.099 H_L^P - 0.793 G_{C_3-C_4}^P - 0.01t \cdot G_F^P + \\
& + 0.548 t \cdot G_{ГП}^P - 0.021 t \cdot H_L^P - 0.077 t \cdot G_{C_3-C_4}^P - 0.069 G_F^P \cdot G_{ГП}^P - (3.13) \\
& - 0.00556 G_F^P \cdot H_L^P + 0.038 G_F^P \cdot G_{C_3-C_4}^P + 0.061 G_{ГП}^P \cdot H_L^P - \\
& - 0.077 G_{ГП}^P \cdot G_{C_3-C_4}^P + 0.03 H_L^P \cdot G_{C_3-C_4}^P ;
\end{aligned}$$

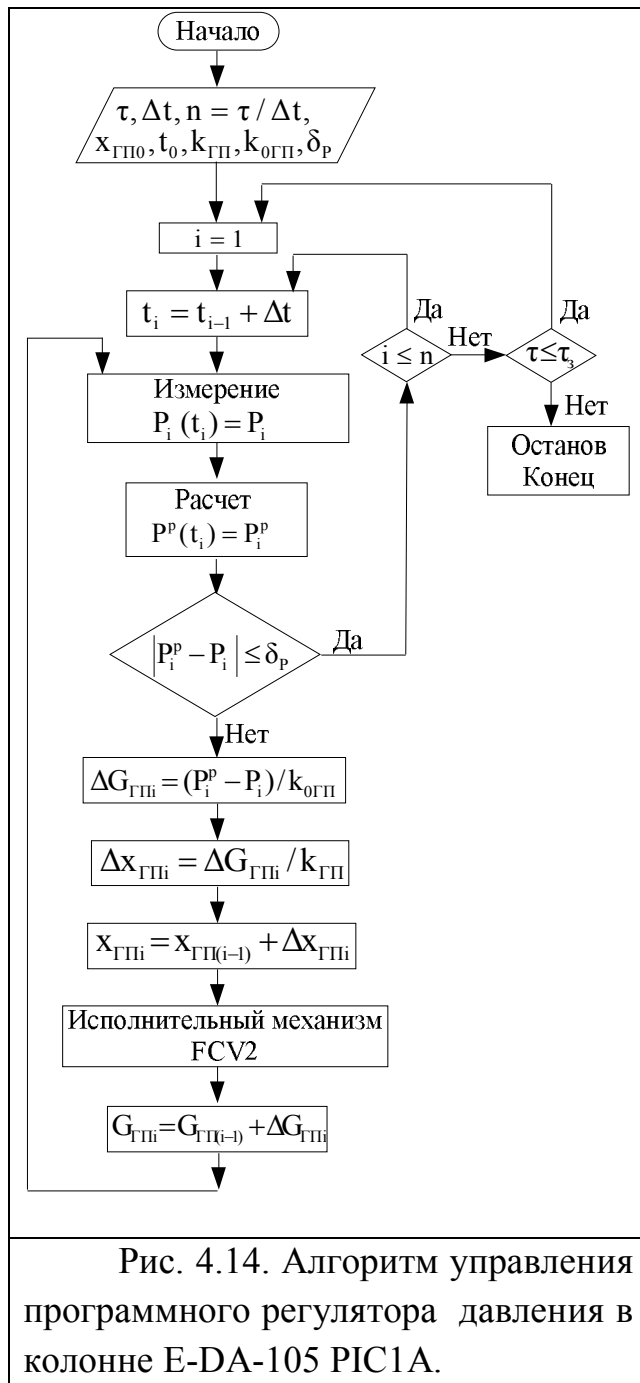


Рис. 4.14. Алгоритм управления программного регулятора давления в колонне E-DA-105 PIC1A.

Программное управление давлением в колонне в период пуска представим в виде алгоритма (рис. 4.13). В алгоритме регулирования давления реализована система программного управления с обратной связью. Изменение давления во времени подчиняется программе (4.14). Возможные возмущения, поступающие на установку в процессе пуска, приводят к изменению программы набора давления, поэтому здесь реализуется обратная связь по отклонению текущего (наблюдаемого) давления от программного, которое компенсируется изменением расхода греющего пара в кипятильник колонны.

Входными параметрами алгоритма являются:

τ - время управления; Δt - период опроса датчика давления

PIC1A; n – количество итераций; $x_{ГП0}$ – начальное положение регулирующего органа на трубопроводе подачи греющего пара FCV2; t_0 – начало отсчета

времени; P_i – измеренное значение давления в i -й момент времени; P_i^p – программное значение давления в i -й момент времени, полученное по уравнению (4.13); $x_{ГПi}$ – значение степени открытия регулирующего органа в i -й момент времени, $k_{ГП}$ – коэффициент расхода РО, $k_{0ГП}$ – коэффициент усиления по каналу: давление – расход греющего пара.

В момент времени t_i измеренное значение давления P_i сравнивается с программным значением P_i^p . Если отклонение измеренного значения P_i и программного P_i^p не превышает допустимую погрешность δ_p , то в следующий момент времени $t_i + \Delta t$ снова измеряется P_i и рассчитывается P_i^p и т.д. до выполнения условия по δ_p . Если отклонение стало больше δ_p , то в зависимости от отклонения ΔP_i определяется изменение степени открытия регулирующего органа $\Delta x_{ГПi}$ и его новое положение $x_{ГПi} = x_{ГП(i-1)} + \Delta x_{ГПi}$. Электрический сигнал о изменении степени открытия регулирующего органа через модуль вывода передается на позиционер исполнительного механизма, который изменяет степень открытия регулирующего органа.

Проверяется условие окончания работы программного регулятора. Если время управления не окончено ($i \leq n$), то в следующий момент времени t_{i+1} повторяется расчет и вывод управляющего воздействия на исполнительный механизм FCV3. По окончании времени управления ($i > n$) программный регулятор поддерживает величину давления на заданном программой значении $P^3 = 9 \text{ кгс} / \text{см}^2$.

4.2.6. Программное управление уровнем жидкости в флегмовой емкости

С верха колонны в дефлегматор поступает пар – многокомпонентная смесь легких углеводородов. Количество пара $G_{П}$ определяется как доля потока исходной смеси $G_{П} = G_F \cdot \varepsilon$, где ε – доля бутановой фракции в составе питания.

Уровень жидкости в флегмовой емкости определяется по величине

расхода парового конденсата. Количество парового конденсата, получаемого в дефлегматоре (рис. 4.15), зависит от расхода охлаждающей воды. Расход парового конденсата и охлаждающей воды связаны уравнением теплового баланса.

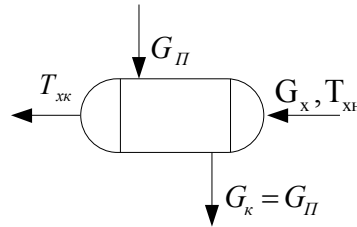


Рис. 4.15. Схема потоков в дефлегматоре колонны.

Из уравнения теплового баланса определяется расход охлаждающей воды в дефлегматор колонны:

$$G_{\Pi} \cdot r_{\Pi} + G_{\text{х}} (T_{\text{хк}} - T_{\text{хн}}) c_{\text{рх}} - G_{\text{к}} \cdot T_{\text{к}} c_{\text{рк}} = 0, \quad (4.14)$$

где r_{Π} - теплота конденсации пара, определяется через удельную теплоту конденсации компонентов паровой смеси $r_{\Pi} = \sum_{i=1}^n r_i y_i$ и их концентрацию y_i ; $T_{\text{к}}$ - температура конденсации пара, $T_{\text{к}} = T_{\text{к}}(P)$ - зависит от давления в колонне P и определяется по известным корреляциям [66]; $c_{\text{рк}}, c_{\text{рх}}$ - теплоемкости конденсата пара и холодного теплоносителя.

Расход холодного теплоносителя запишется в виде:

$$G_{\text{х}} = \frac{G_{\Pi} (r_{\Pi} - T_{\text{к}} c_{\text{рк}})}{c_{\text{рх}} (T_{\text{хк}} - T_{\text{хн}})}, \quad T_{\text{хк}} = T_{\text{к}} + \Delta T. \quad (4.15)$$

В флегмовую емкость Е-ФА-130 в период пуска поступает конденсат парового потока $G_{\text{к}} = G_{\Pi}$ из дефлегматора Е-ЕА-130. В период пуска идет накопление жидкости в емкости по уравнению:

$$S \frac{dH}{dt} = G_{\Pi}(t), \quad (4.16)$$

где S - сечение емкости (м^2); H_L - уровень жидкости (м); $G_{\Pi}(t) = G_{\text{к}}(t)$ - объемный расход конденсата парового потока из дефлегматора, который

составляет часть потока питания в колонну: $G_{\Pi}(t) = G_F(t) \cdot \varepsilon$.

На дискретном отрезке времени dt уравнение (4.16) в отклонениях принимает вид:

$$\Delta H_L = \Delta G_{\Pi} \cdot dt / S, \quad (4.17)$$

а уравнение (4.15) в отклонениях на дискретном отрезке времени запишется в виде:

$$\Delta G_x = \Delta G_{\Pi} \frac{r_{\Pi} - T_k c_{pk}}{c_{px} (T_{xk} - T_{xn})}. \quad (4.18)$$

Объединяя уравнения (4.17), (4.18), получим зависимость отклонения расхода охлаждающей воды от отклонения уровня в флегмовой емкости на i -м отрезке времени:

$$\Delta G_{xi} = \Delta H_i \frac{S}{dt} \frac{(r_{\Pi} - T_k c_{pk})_i}{c_{px} (T_{xk} - T_{xn})_i} = \Delta H_{Li} \gamma_i, \quad (4.19)$$

$$\text{где } \gamma(t_i) = \frac{S}{dt} \frac{r_{\Pi} - T_{ki} c_{pki}}{c_{pxi} (T_{xki} - T_{xni})}.$$

Уравнение программного изменения уровня в флегмовой емкости принимаем в виде, полученного ранее уравнения регрессии (4.5):

$$H_L^p = 19.315 + 7.886 \ln(t + 0.3) \quad (4.20)$$

Отклонение уровня в емкости от программного значения (4.20) составляет: $\Delta H(t) = H(t) - H^p(t)$, где $H(t)$ - измеренное (наблюдаемое) значение уровня в емкости.

Программное управление уровнем жидкости в флегмовой емкости представим в виде алгоритма (рис. 4.16).

В алгоритме регулирования давления реализована система программного управления с обратной связью. Изменение уровня во времени подчиняется программе (4.20). Возможные возмущения, поступающие на установку в процессе пуска, приводят к изменению программы набора уровня, поэтому здесь реализуется обратная связь по отклонению текущего (наблюдаемого)

уровня от программного, которое компенсируется изменением расхода охлаждающей воды в дефлегматор.

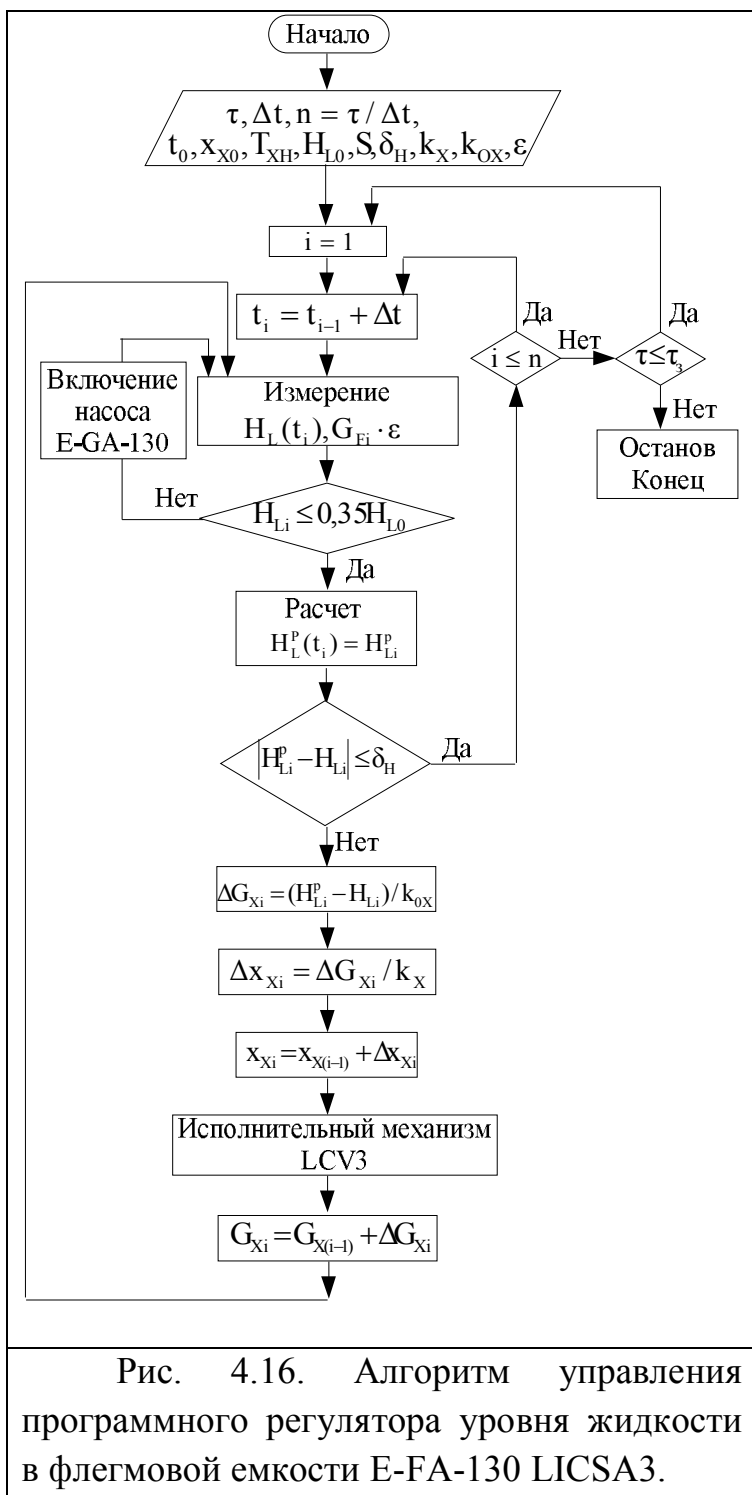


Рис. 4.16. Алгоритм управления программного регулятора уровня жидкости в флегмовой емкости E-FA-130 LICSA3.

Входными параметрами алгоритма являются: Δt - период опроса датчика уровня LICSA3; n - количество итераций; t_0 - начало отсчета времени; x_{X0} - начальное положение РО на холодной воде, H_{L0} - высота аппарата, S - сечение емкости, ε - доля отбора дистиллята, k_X - коэффициент расхода РО, k_{OX} - коэффициент усиления по каналу: уровень в емкости - расход холодной воды в дефлегматор, δ_H - допустимое отклонение уровня от программного значения.

В момент времени t_i измеренное значение уровня H_{Li} сравнивается с программным значением H_{Li}^p . Если отклонение измеренного

значения H_{Li} и программного H_{Li}^p не превышает допустимую погрешность δ_H , то в следующий момент времени $t_i + \Delta t$ снова измеряется H_{Li} и рассчитывается H_{Li}^p и т.д. до выполнения условия по δ_H . Если отклонение стало больше δ_H , то в зависимости от отклонения ΔH_{Li} определяется

изменение степени открытия регулирующего органа Δx_{xi} и его новое положение $x_{xi} = x_{x(i-1)} + \Delta x_{xi}$. Электрический сигнал о изменении степени открытия регулирующего органа через модуль вывода передается на позиционер исполнительного механизма, который изменяет степень открытия регулирующего органа.

Проверяется условие окончания работы программного регулятора. Если время управления не окончено ($i \leq n$), то в следующий момент времени t_{i+1} повторяется расчет и вывод управляющего воздействия на исполнительный механизм LCV3. По окончании времени управления ($i > n$) программный регулятор поддерживает величину уровня на заданном программой значении $H_L^3 = 0.45H_{L0}$.

4.2.7. Программное управление уровнем жидкости в кубе колонны

Из графика (рис.1.12) видно, что изменение уровня в кубе колонны в период пуска до 18 часов происходит от 0% до 45%, а затем остается постоянным в течение дальнейшего времени до 70 часов. В это время возможные возмущения, способные оказать влияние на изменение уровня в кубе колонны, поступают только с расходом питания, поскольку расходы флегмы и греющего пара равны нулю. Это возможно при изменении состава фракции легких углеводородов, например, если тяжелых компонентов станет больше или меньше номинального. В этом случае компенсировать отклонение текущего уровня от программного необходимо отбором кубового остатка.

Наблюдаемые изменения уровня в кубе колонны в период пуска описываются уравнение материального баланса:

$$S \frac{dH}{dt} = G_F(1 - \varepsilon) - G_k, \quad (4.21)$$

где G_k - количество отбираемого кубового остатка (т/ч); ε - доля легких компонентов в составе питания; S - сечение куба (m^2); H - уровень жидкости в кубе (%).

Доля легких компонентов ε зависит от температуры кипения

компонентов широкой фракции легких углеводов.

Проинтегрируем уравнение (4.21) на отрезке времени dt :

$$\int_H^{H+\Delta H} S dH = \int_t^{t+\Delta t} G_F (1 - \varepsilon) d\theta - \int_t^{t+\Delta t} G_k d\theta.$$

На малом отрезке времени Δt на основании теоремы о среднем значении интеграла получим:

$$S\Delta H = \overline{G}_F (1 - \varepsilon) \Delta t - \overline{G}_k \Delta t, \quad (4.22)$$

где $\overline{G}_F, \overline{G}_k$ - средние значения функций на отрезке времени dt .

Среднее значение расхода \overline{G}_k найдем из уравнения (4.22) в виде:

$$\overline{G}_k = \overline{G}_F (1 - \varepsilon) - S \frac{\Delta H}{dt}. \quad (4.23)$$

Зависимость расхода кубового остатка G_k от степени открытия регулирующего органа имеет линейный характер $G_k = k_k x_k$. Среднему значению \overline{G}_k соответствует среднее значение \overline{x}_k : $\overline{x}_k = \overline{G}_k / k_k$,

а среднее значение $\overline{x}_k = (x_{k_{i-1}} + x_{k_i}) / 2$.

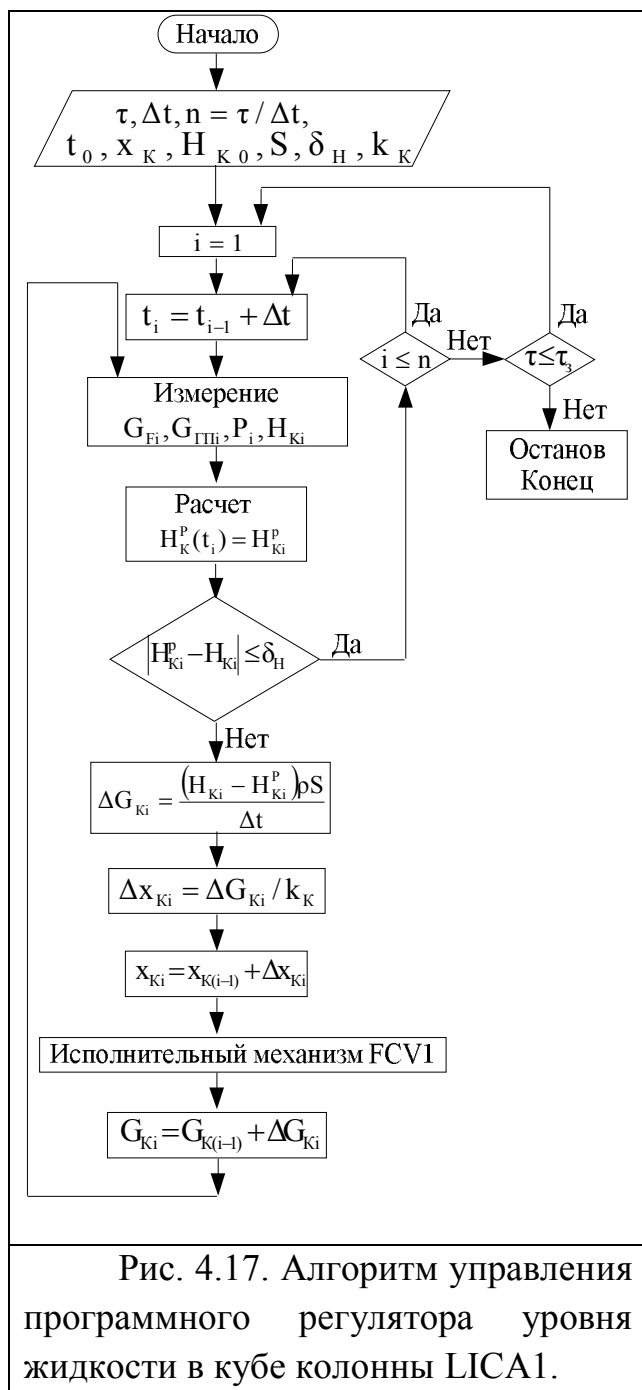
Отсюда $x_{k_i} = 2\overline{x}_k - x_{k_{i-1}}$.

Отклонению наблюдаемого значения уровня H_i от программного H_i^p : $\Delta H_i = H_i - H_i^p$ на i -м отрезке времени соответствует положение регулирующего органа:

$$x_{k_i} = 2 \frac{\overline{G}_k}{k_k} - x_{k_{i-1}} = \frac{2}{k_k} (\overline{G}_{Fi} (1 - \varepsilon) - S \frac{\Delta H_i}{dt}) - x_{k_{i-1}}. \quad (4.24)$$

Уравнения программы набора уровня в кубе колонны в период пуска принимаем в виде полученного ранее уравнения регрессии (4.7), полученного при обработке экспериментальных данных за период пуска.

$$H_k = 8.57 - 0.424 t + 1.12 G_F - 27.617 G_{\Gamma\Pi} + \\ + 0.0434 t \cdot G_F - 0.045 t \cdot G_{\Gamma\Pi} + 0.602 G_F \cdot G_{\Gamma\Pi}. \quad (4.25)$$



В алгоритме регулирования уровня реализована система программного управления с обратной связью. Изменение уровня во времени подчиняется программе (4.25). Возможные возмущения, поступающие на установку в процессе пуска, приводят к изменению программы набора уровня, поэтому здесь реализуется обратная связь по отклонению текущего (наблюдаемого) уровня от программного, которое компенсируется изменением отбора кубового продукта.

Программное управление уровнем жидкости в кубе колонны представим в виде алгоритма (рис. 4.17).

Входными параметрами алгоритма являются: Δt - период опроса датчика уровня LICA1; n - количество итераций; t_0 - начало

отсчета времени; x_{K0} - начальное положение РО на отборе кубового остатка, k_K - коэффициент расхода РО, H_{K0}, S - высота и сечение куба, H_{Ki}, H_{Ki}^P - измеренное и программное значение уровня, δ_H - допустимое отклонение уровня от программного значения, ΔG_{Ki} - изменение расхода кубовой жидкости

В момент времени t_i измеренное значение уровня H_{Ki} сравнивается с программным значением H_{Ki}^P . Если отклонение измеренного значения H_{Ki} и

программного N_{Ki}^p не превышает допустимую погрешность δ_H , то в следующий момент времени $t_i + \Delta t$ снова измеряется N_{Ki} и рассчитывается N_{Ki}^p и т.д. до выполнения условия по δ_H . Если отклонение стало больше δ_H , то в зависимости от отклонения ΔN_{Ki} определяется изменение степени открытия регулирующего органа Δx_{Ki} и его новое положение $x_{Ki} = x_{K(i-1)} + \Delta x_{Ki}$. Электрический сигнал о изменении степени открытия регулирующего органа через модуль вывода передается на позиционер исполнительного механизма, который изменяет степень открытия регулирующего органа.

Проверяется условие окончания работы программного регулятора. Если время управления не окончено ($i \leq n$), то в следующий момент времени t_{i+1} повторяется расчет и вывод управляющего воздействия на исполнительный механизм FCV1. По окончании времени управления ($i > n$) программный регулятор поддерживает величину уровня на заданном программой значении $N_K^3 = 0.45N_{K0}$.

4.3. Алгоритм программного управления пуском установки дебутанизации углеводородов

Перед началом автоматизированного пуска установки дебутанизации углеводородов ряд операций проводится вручную:

- 1) Произвести продувку узла дебутанизации азотом от кислорода (до содержания кислорода в отходящем азоте н. б. 0.5 %).
- 2) Принять оборотную воду в дефлегматор поз. Е-ЕА-130, стравить воздух через воздушник аппарата.
- 3) По согласованию с цехом № 2104 принять закалочную воду в подогреватель ШФЛУ поз. Е-ЕА-132.
- 4) По согласованию с цехом № 2104 принять пар низкого давления в кипятильник поз. Е-ЕА-131.

После проведения данных операций начинается непосредственно автоматизированный пуск установки дебутанизации углеводородов с помощью

распределенной системы программного управления (РСПУ) (рис. 4.8).

Алгоритм пуска установки реализован в контроллере РСПУ следующим образом:

0 часов: Программный регулятор FIC3 сравнивает текущее значение расхода питания в колонну E-DA-105 с программным и в соответствии со значением рассогласования вырабатывает управляющее воздействие на исполнительный механизм FCV3.

Программный регулятор TIC2 сравнивает текущее значение температуры питания на выходе из теплообменника E-FA-132 с программным и в соответствии со значением рассогласования вырабатывает управляющее воздействие на исполнительный механизм TCV2.

Программный регулятор LICSA3 сравнивает текущее значение уровня в флегмовой емкости с программным и в соответствии со значением рассогласования вырабатывает управляющее воздействие на исполнительный механизм LCV3 подачи холодной воды в конденсатор.

Отсечной клапан ОК-16 и исполнительный механизм PCV1 под управлением программного регулятора PICSA1B находятся в открытом положении до начала отбора фракции C₃-C₄ на печи пиролиза. К этому моменту давление в колонне достигнет 8 – 9 кгс/см².

18 часов: Программный регулятор FIC2 сравнивает текущее значение расхода пара в кипятильник E-EA-131 с программным и в соответствии со значением рассогласования вырабатывает управляющее воздействие на исполнительный механизм FCV2.

Программный регулятор FIC5 сравнивает текущее значение расхода пропан-бутановой фракции на печи пиролиза с программным и в соответствии со значением рассогласования вырабатывает управляющее воздействие на исполнительный механизм FCV5.

Программный регулятор FIC1 сравнивает текущее значение отбора кубового продукта из колонны E-DA-105 с программным и в соответствии со значением рассогласования вырабатывает управляющее воздействие на

исполнительный механизм FCV1.

Программный регулятор P1CSA1B в соответствии с программой пуска прекращает сброс фракции на факел, закрыв отсечной клапан ОК-16 и переводя исполнительный механизм PCV1 в закрытое состояние. Далее программные регуляторы FIC3 и FIC2 продолжают увеличение подачи питания и пара до тех пор пока отбор пропан-бутановой фракции не достигнет заданной мощности в 50 т/ч в соответствии с моделью программного регулятора FIC5, что произойдет через 70 часов после начала процесса пуска.

70 часов: Все программные регуляторы при достижении заданных значений переводятся в автоматический режим нормального функционирования.

На основе разработанных алгоритмов управления выполнен расчет управляющих параметров во времени $G_F(t), G_{ЗВ}(t), G_{ГП}(t), L(t)$, обеспечивающих перевод установки из предпускового состояния в заданное с выходом на производительность по бутановой фракции $G_{C_3-C_4}=50$ т/ч, при заданных выходных параметрах давления $P(t)=9$ кгс/см², температуры 85°C.

На рис. (4.18)-(4.25) приведены результаты расчета управляющих и выходных параметров установки во времени, их сравнение с программными и экспериментальными значениями.

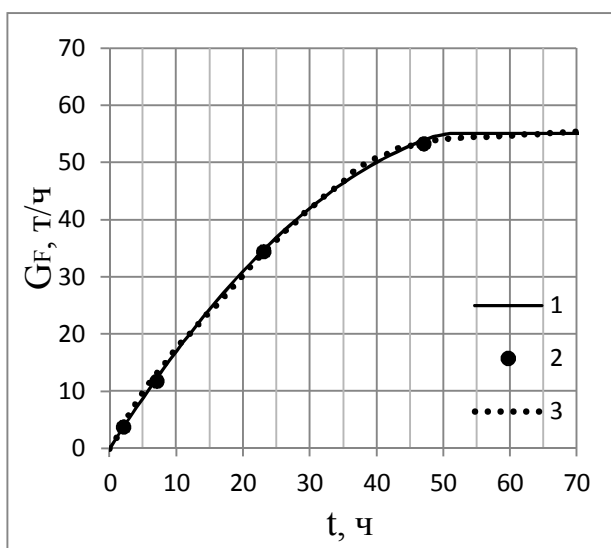


Рис. 4.18. Зависимость расхода питания в колонну от времени в период пуска. 1 – программное управление (12); 2 – экспериментальные значения; 3 – расчетные данные при возмущении $\Delta G_F(t) = \pm 0,015 G_{F\text{ном}}$.

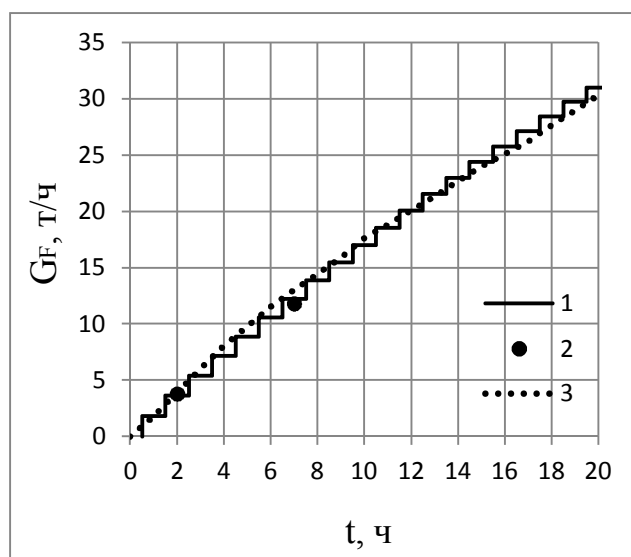


Рис. 4.19. Зависимость расхода питания в колонну от времени в период пуска. 1 – фрагмент ступенчатого программного управления (12) на отрезке от 0 до 20 ч.; 2 – экспериментальные значения; 3 – расчетные данные при возмущении $\Delta G_F(t) = \pm 0,015 G_{F\text{ном}}$.

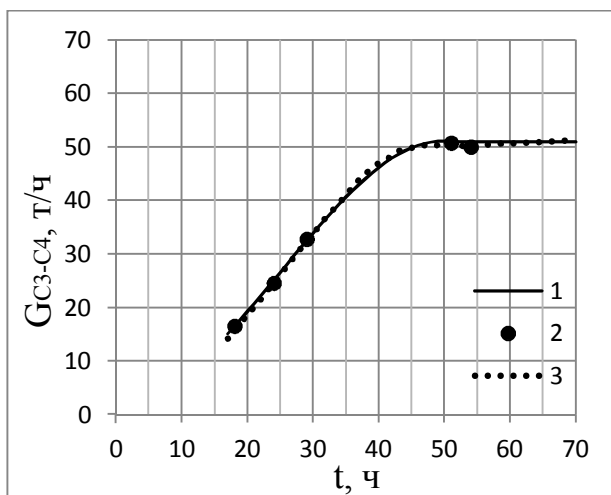


Рис. 4.20. Зависимость расхода фракции C_3-C_4 на пиролиз от времени в период пуска. 1 – программное управление (13); 2 – экспериментальные значения, 3 – расчетные данные при возмущении $\Delta G_{C_3-C_4}(t) = \pm 0,015 G_{C_3-C_4\text{ном}}$.

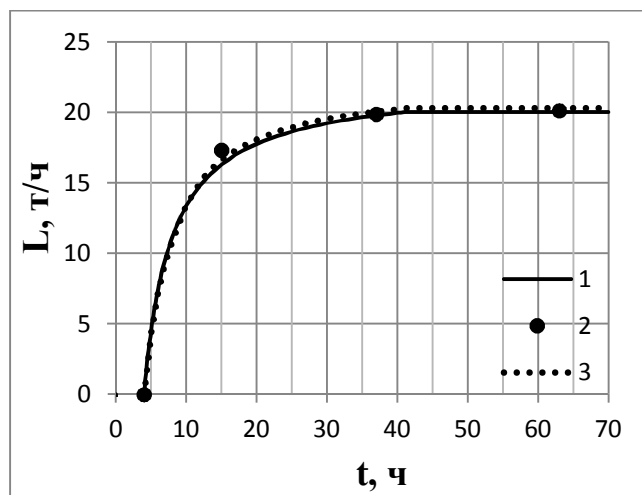


Рис. 4.21. Зависимость расхода флегмы от времени в период пуска. 1 – программное управление (14); 2 – экспериментальные значения, 3 – расчетные данные при возмущении $\Delta L(t) = \pm 0,015 L_{\text{ном}}$.

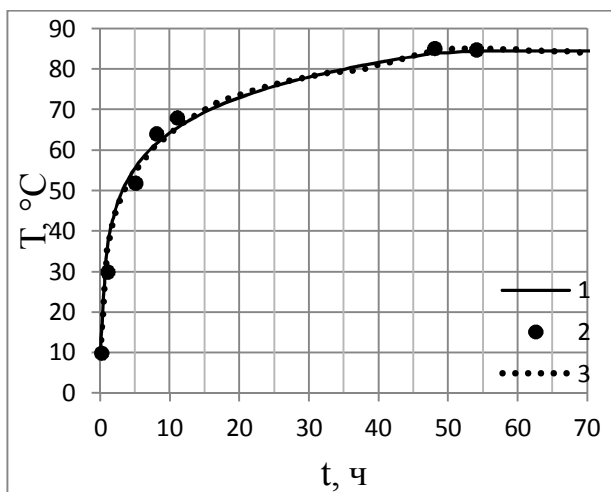


Рис. 4.22. Зависимость температуры питания на выходе из подогревателя от времени в период пуска. 1 – программное управление (15); 2 – экспериментальные значения, 3 – расчетные данные при программном управлении.

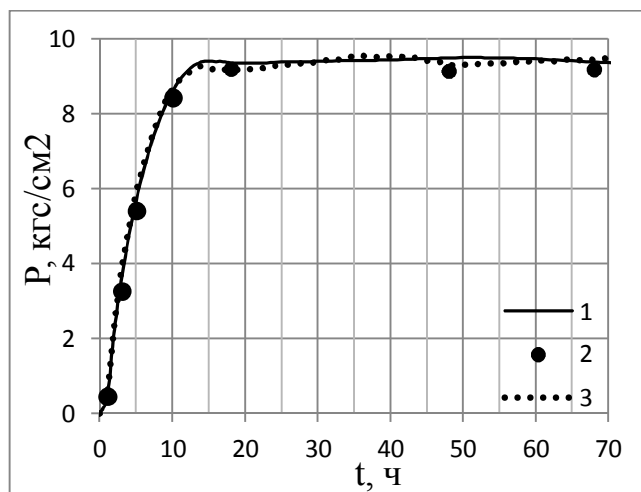


Рис. 4.23. Зависимость изменения давления в колонне от времени в период пуска. 1 – программное управление (16); 2 – экспериментальные значения, 3 – расчетные данные при программном управлении.

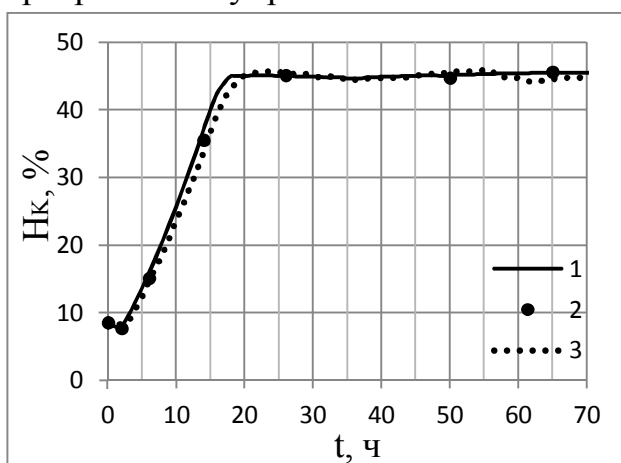


Рис. 4.24. Зависимость изменения уровня в кубе колонны от времени в период пуска. 1 – программное управление (17); 2 – экспериментальные значения, 3 – расчетные данные при программном управлении.

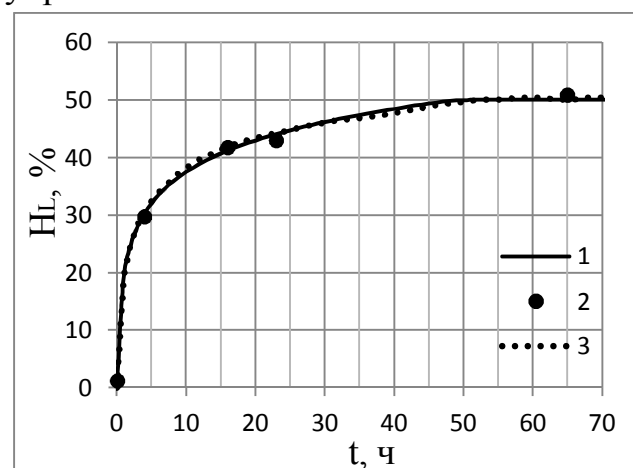


Рис. 4.25. Зависимость изменения уровня жидкости в флегмовой емкости от времени в период пуска. 1 – программное управление (18); 2 – экспериментальные значения, 3 – расчетные данные при программном управлении.

Выводы

1. На основе экспериментальных данных, полученных при пуске установки дебутанизации углеводородов в режиме ручного управления, и их обработки экспериментально-статистическими методами математического моделирования, получены уравнения регрессии в виде зависимостей управляющих параметров от времени и технологических параметров пуска.

2. Полученные уравнения регрессии служат программным управлением процесса, переводящим установку из начального состояния после останова в состояние нормального функционирования.

3. Для учета влияния внешних и внутренних возмущений процесса пуска установки в уравнениях программного управления предлагается реализовать систему программного управления с обратной связью.

4. Для реализации обратной связи в программном управлении предложена распределенная система программного управления, состоящая из первичных преобразователей и исполнительных устройств, программных контроллеров и диспетчерского управления пуском установки.

5. Разработаны алгоритмы программного управления с обратной связью: расходом питания в колонну, греющего пара в кипятильник, охлаждающей воды в дефлегматор, закалочной воды в подогреватель питания, фракции C_3 - C_4 на пиролиз, давлением в колонне, уровнем в кубе колонны и флегмовой емкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По аналогии с технологией конфигурирования контроллеров в АСУТП, обычно на языке функциональных блоков (FBD), разработана модель управления химико-технологическими системами (ХТС) на языке непрерывных функциональных схем (НФС), связывающих между собой функциональные блоки – математические модели динамических процессов пуска и останова технологических аппаратов, вспомогательного оборудования и управляющих органов ХТС.

2. Разработаны математические модели функциональных блоков в составе НФС установки разделения углеводородов в виде нестационарных уравнений термодинамики, материального и теплового балансов. Сравнение результатов моделирования функциональных блоков с экспериментальными данными в процессе пуска показало их удовлетворительное согласование.

3. На основе модели автоматизированного управления 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 ХТС 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 от 11.03.2013 № 96.

5. Для практической реализации модели автоматизированного управления предложена модель распределенной системы управления. Получены математические модели и алгоритмы программного управления с обратной связью и разработан алгоритм программного управления установкой разделения углеводородов.

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 автоматизированного управления в рабочие алгоритмы АСУТП в виде предложенных моделей и алгоритмов управления программными регуляторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ишмияров, М.Х. Технология, экономика и автоматизация процессов переработки нефти и газа / М.Х. Ишмияров, А.П. Веревкин, Е.С. Докучаев, Ю.М. Малышев, С.А. Ахметов. – М.: Химия, 2005. – 735 с.
2. Дозорцев, В.М. Усовершенствованное управление технологическими процессами (APC): 10 лет в России / В.М. Дозорцев, Э.Л. Ицкович, Д.В. Кнеллер // Автоматизация в промышленности. – 2013. – №1. – С. 12-19.
3. Blevins, Terrence. Advanced Control Foundation: Tools, Techniques and Applications / T. Blevins, W.K. Wojsznis, M. Nixon. – ISA, 2012. – 556 p.
4. Ansari, R.M. Multi variable control and advanced monitoring^ Application to hydrocracking process / R.M. Ansari, K.M. Bawardi // Saudi Aramco Journal of Technology. – 2006. – June. – P. 33-37.
5. Campos, M. Challenges and problems with advanced control and optimization technologies (Conference Paper) / M. Campos, H. Teixeira, F. Liporace, M. Gomes // 7th IFAC International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes, ADCHEM'09. – 2009. – May. – Volume 7. – Issue Part 1. – P. 1-8.
6. Aho, M. Closed loop dynamic optimization of a petroleum refinery process (Conference Paper) / M. Aho // IFAC Workshop on Control Application of Optimization, CAO'09. – 2009. – Volume 7. – Issue Part 1. – P. 257-262.
7. Веревкин, А.П. Реализуемость систем «продвинутого» управления и обеспечения безопасности на производствах ТЭК / А.П. Веревкин // Нефтегазовое дело. – 2014. – т.12. – №2. – С. 133-139.
8. Zhao, H. Improved closed-loop subspace identification technology for adaptive modeling and APC sustained value (Conference Paper) / H. Zhao, M. Harmse, Q. Zheng, J. Campbell // AIChE Spring Meeting and 8th Global Congress on Process Safety, Houston, TX, United States. – 2012.
9. Васильев, В.И. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учеб. пособие / В.И. Васильев, Б.Г. Ильясов. – М.: Радиотехника, 2009. – 329 с.

10. Веревкин, А.П. Оперативное управление процессом производства полиэтилена по показателю качества (индексу расплава) / А.П. Веревкин, Д.В. Калашник, М.Х. Хуснияров // Территория Нефтегаз. – 2013. – №5. – С. 12-16.
11. Веревкин, А.П. Автоматизация технологических процессов и производств в нефтепереработке и нефтехимии / А.П. Веревкин, О.В. Кирюшин. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2005. – 171 с.
12. Хоменко, А.А. Динамика химико-технологических систем (разработка компьютерных тренажеров) / А.А. Хоменко // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Казань: КГТУ, 2003.
13. Колмогоров, А.Г. Синтез имитационной модели для тренажера управления технологическим процессом ректификации / А.Г. Колмогоров // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Иркутск: АГТА, 2010.
14. Власов, С.С. Моделирование динамических режимов атмосферного блока установки первичной переработки нефти при исследовании алгоритмов компьютерных тренажерных комплексов / С.С. Власов, А.Г. Шумихин // Автоматизация в промышленности. – 2011. – №7. – С. 36-42.
15. Кафаров, В.В. Анализ и синтез химико-технологических систем: учебник для вузов / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин. – М.: Химия, 1991. – 432 с.
16. Островский, Г.М. Методы оптимизации химико-технологических процессов: учебное пособие / Г.М. Островский, Ю.М. Волин, Н.Н. Зиятдинов. – М.: КДУ, 2008. – 424 с.
17. Островский, Г.М. Оптимизация технических систем: учебное пособие / Г.М. Островский, Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева. – М.: Кнорус, 2012. – 432 с.
18. Лисицын, Н.В. Химико-технологические системы: Оптимизация и ресурсосбережение / Н.В. Лисицын, В.К. Викторов, Н.В. Кузичкин. – СПб.: Менделеев, 2007. – 312 с.

19. Островский, Г.М., Оптимизация в химической технологии / Г.М. Островский, Ю.М. Волин, Н.Н. Зиятдинов. – Казань: Изд-во «Фэн» Академии наук РТ, 2005. – 394 с.
20. Мешалкин, В.П., Многостадийный эвристическо-эволюционный метод синтеза ХТС и его применение для проектирования оптимальных технологических схем производств органических веществ. Сер.: Современные проблемы химии и химической промышленности / В.П. Мешалкин, В.В. Кафаров. – М.: НИИТЭХИМ. 1982. Вып.3 (124). – 67 с.
21. Бусленко, Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 399 с.
22. Закгейм, А.Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов / А.Ю. Закгейм. – М.: Химия, 1982. – 288 с.
23. Кафаров, В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии: учебник для вузов / В.В. Кафаров. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1985. – 448 с.
24. Кафаров, В.В. Основы автоматизированного проектирования химических производств / В.В. Кафаров, В.Н. Ветохин. – М.: Наука, 1986. – 624 с.
25. Кроу, К. Математическое моделирование химических производств / К. Кроу, А. Гамилец, Т. Хоффман и др.; перевод с англ. Э.П. Зиминой, Л.В. Стрельцовой, В.И. Чуприковой; под. ред. Г.М. Островского. – М.: Мир, 1973. – 1391 с.
26. Островский, Г.М. Моделирование сложных химических систем / Г.М. Островский, Ю.М. Волин. – М.: Химия, 1975. – 311 с.
27. Советов, Б.Я. Моделирование систем: учеб. для вузов по спец. «Автоматизир. системы обработки информ. и упр.» Б.Я. Советов, С.А. Яковлев – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.
28. Зиятдинов, Н.Н. Системный анализ химико-технологических процессов с использованием программы ChemCad: учебно-методическое

пособие / Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, Д.А. Рыжов, Н.Ю. Богула. – Казань: КГТУ, 2009. – 212 с.

29. Дорохов, И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Интеллектуальные системы и инженерное творчество в задачах интенсификации химико-технологических процессов и производств / И.Н. Дорохов, В.В. Меньшиков. – М.: Наука, 2005. – 582 с.

30. Кафаров, В.В. Принципы математического моделирования химико-технологических систем / В.В. Кафаров, В.Л. Перов, В.П. Мешалкин. – М.: Химия, 1974.

31. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / В.В. Кафаров, И.И. Дорохов. – М.: Наука, 1976. – 500 с.

32. Кристофидес, Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристофидес; пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 432 с.

33. Caballeroa, J.A. Optimal synthesis of thermally coupled distillation sequences using a novel MILP approach / J.A. Caballeroa, I.E. Grossmannb // Comp. & Chem. Eng. – 2014. – V. 61. – P. 118–135.

34. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон. – М: Мир, 1984. – 264 с.

35. Котов, В.Е. Сети Петри / В.Е. Котов. – М: Наука, 1984. – 160 с.

36. Слепцов, А. И. Автоматизация проектирования управляющих систем гибких автоматизированных производств / А.И. Слепцов, А.А. Юрасов, Б. Н. Малиновский. – Киев: Техніка, 1986. – 160 с.

37. Ачасова, С.М. Корректность параллельных вычислительных процессов / С.М. Ачасова, О.Л. Бандман. – Новосибирск: Наука, 1990. – 253 с.

38. Мараховский, В. Б. Моделирование параллельных процессов. Сети Петри. Курс для системных архитекторов, программистов, системных аналитиков, проектировщиков сложных систем управления / Л.Я. Розенблюм, А.В. Яковлев. – Санкт-Петербург: Профессиональная литература, АйТи-Подготовка, 2014. – 400 с.

39. Коротиков, С.В. Применение сетей Петри в разработке многопоточного программного обеспечения с ограниченными разделяемыми ресурсами на примере центров дистанционного управления и контроля: дис. канд. тех. наук. – Новосибирск: НГТУ, 2008.
40. Скородумов, П.В. Моделирование технологических процессов на базе вложенных гибридных сетей Петри: дис. канд. тех. наук. – Вологда: ВГТУ, 2009.
41. Смолин, Д. Введение в искусственный интеллект: конспект лекций / М.Ф. Смолин – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 264 с.
42. Степанов, М.Ф. Искусственные нейронные сети и их использование в интеллектуальных системах: учебное пособие / М.Ф. Степанов. – Саратов: Саратов. гос. технол. ун-т, 2000. – 128 с.
43. Беспалов, А.В. Системы управления химико-технологическими процессами: учебник для вузов / Н.И. Харитонов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 690 с. : ил.
44. Трахтенгерц, Э.А. Программное обеспечение автоматизированных систем управления / Э.А. Трахтенгерц. – М.: Статистика, 1974.
45. IEC 61131-7(2000) Programmable controllers. Part 7. Fuzzy control programming. 2000.
46. IEC 61131-3(2003). Programmable controllers - Part 3: Programming languages. 2003.
47. IEC /TR 61131-8(2000) Programmable controllers - Part 8: Guidelines for the application and implementation of programming languages. 2000.
48. CANopen interface and device profile for IEC 61131-3 programmable devices. - CiA draft standard 405, v. 2.0, 2002. - 41 p.
49. Петров, И.В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / И.В. Петров; под ред. проф. В. П. Дьяконова. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 256 с.

50. Анашкин, А.С. Техническое и программное обеспечение распределенных систем управления / А.С. Анашкин, Э.Д. Кадыров, В.Г. Харазов; под ред. В.Г. Харазова. – Санкт-Петербург: Изд-во "Р-2", 2004. – 367 с.
51. Денисенко, В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. – М.: Горячая линия - Телеком, 2008 г. – 608 с.
52. Браунли, К.А. Статистическая теория и методология в науке и технике / К.А. Браунли; пер. с англ. М.С. Никулина; под ред. Л.Н. Большева. – М.: Наука, 1977, – 408 с.
53. Демиденко, Е.З. Оптимизация и регрессия / Е.З. Демиденко. – М.: Наука, 1989. – 296 с.
54. Маринеску, И. Основы математической статистики и ее применение / И. Маринеску, Ч. Мойнягу, Р. Никулеску, Н. Ранку, В. Урсяну; пер. с рум. Л.С. Кучаева; под. ред. В. Урсяну. – М.: Статистика, 1970. – 224 с.
55. Химмельблау, Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау; пер. с англ. В.Д. Скаржинского; под ред. В.Г. Горского. – М.: Мир, 1973. – 957 с.
56. Shachama, M. Application of stepwise regression for dynamic parameter estimation / M. Shachama, N. Braunerb // *Comp. & Chem. Eng.* – 2014. – V. 69. – P. 26–38.
57. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / А.Г. Касаткин. – М.: ООО ИД «Альянс», 2008. – 753 с.
58. Кафаров, В.В. Основы массопередачи: учеб. для вузов / В.В. Кафаров. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1979. – 439 с.
59. Кафаров, В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов. – М.: Высш. школа, 1991.
60. Жаров, В.Т. Физико-химические основы дистилляции и ректификации / В.Т. Жаров, Л.А. Серафимов. – Л.: Химия, 1975. – 239 с.

61. Петлюк, Ф.Б. Многокомпонентная ректификация: теория и расчет / Ф.Б. Петлюк, Л.А. Серафимов. – М.: Химия, 1983. – 303 с.
62. Фрэнкс, Р. Математическое моделирование в химической технологии / Р. Фрэнкс; пер. с англ. Д.К. Бейлиной и Э.Ф. Ишмаевой; под ред. В.С. Тропцова. – М.: Химия, 1971. – 270 с.
63. Thomas, P. Simulation of industrial process for control engineers / Thomas P. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999. – 390 p.
64. Беспалов, А.В. Задачник по системам управления химико-технологическими процессами: учебное пособие для вузов / А.В. Беспалов, Н.И. Харитонов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 307 с.
65. Холоднов, В.А. Системный анализ и принятие решений. Компьютерные технологии моделирования химико-технологических систем с материальными и тепловыми рециклами. [Текст]: учебное пособие / В.А. Холоднов, К. Хартманн, В.Н. Чепикова, В.П. Андреева. – СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2006. – 160 с.
66. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей: справочное пособие / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
67. Гартман, Т.Н. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов: учебное пособие для вузов / Гартман Т.Н., Клушнин Д.В. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. – 416 с.
68. Востриков, Ф.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования: учебное пособие для вузов / Ф.С. Востриков, Г.А. Французова. – М.: Высшая школа, 2004. – 365 с.
69. Ерофеев, А.А. Теория автоматического управления / А.А. Ерофеев. – СПб.: Политехника, 2002. – 302 с.
70. Дианов, В.Г. Автоматическое регулирование и регуляторы в химической промышленности / В.Г. Дианов. – М.: Химия, 1978. – 376 с.
71. Иващенко, Н.И. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем: учебник для вузов / Н.И. Иващенко. – М.: Машиностроение, 1973. – 606 с.

72. Эрриот П. Регулирование производственных процессов / П. Эрриот. – М.: Энергия, 1967. – 489 с.
73. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник для вузов в 5-ти т. / Под ред. К.А. Пупкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – (Методы теории автоматического управления). – 2004. – 656 с.
74. Филлипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор. – М.: Лаборатория Базовых знаний, 2001. – 616 с.
75. Полоцкий, Л.М. Автоматизация химических производств. Теория, расчет и проектирование систем автоматизации / Л.М. Полоцкий, Г.И. Лапшенков. – М.: Химия, 1982. – 296 с
76. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. Красовского А.А. – М.: Наука. 1987. – 711 с.
77. Основы автоматизации управления процессов / Под ред. И.Н. Макарова – Л.: Высшая школа. 1983. – 504 с.
78. Жимерин, Д.Г. Автоматизированные и автоматические системы управления / Д.Г. Жимерин, В.А. Мясников. – М.: Энергия, 1975.
79. Тищенко, Н.М. Введение в проектирование сложных систем автоматики / Н.М. Тищенко. – М.: Энергия, 1976.
80. Jeng, J.-C. Simultaneous closed-loop tuning of cascade controllers based directly on set-point step-response data / J.-C. Jeng // Journal of Process Control. – 2014. – V. 24. – I. 5. – P. 652–662.
81. Zhang, J. Economic model predictive control with triggered evaluations: State and output feedback / J. Zhang, S. Liu, J. Liu // Journal of Process Control. – 2014. – V. 24. – I. 8. – P. 1197–1206.
82. Lia, J. Optimal disturbance rejection control approach based on a compound neural network prediction method / J. Lia, C. Wua, S. Lia, S. Lic // Journal of Process Control. – 2014. – V. 24. – I. 10. – P. 1516–1526.

83. Dinga, B. A synthesis approach for output feedback robust model predictive control based-on input-output model / B. Dinga, T. Zoub // *Journal of Process Control*. – 2014. – V. 24. – I. 3. – P. 60–72.
84. Astrom, K.J. The future of PID control / K.J. Astrom, T. Hagglund // *Control Engineering Practice*. – 2001. – V. 9. – I. 11. – P. 1163–1175.
85. Segovia, V.R. Measurement noise filtering for common PID tuning rules / V.R. Segovia, T. Hagglund, K.J. Astrom // *Control Engineering Practice*. – 2014. – V. 32. – P. 43–63.
86. Micic, A.D. Optimization of PID controller with higher-order noise filter / A.D. Micic, M.R. Matausek // *Journal of Process Control*. – 2014. – V. 24. – I. 5. – P. 694–700.
87. Matausek, M.R. Series PID controller tuning based on the SIMC rule and signal filtering / M.R. Matausek, B.T. Jevtovich, I.M. Jovanov // *Journal of Process Control*. – 2014. – V. 24. – I. 5. – P. 687–693.
88. Zhangda, R. Improved PI controller based on predictive functional control for liquid level regulation in a coke fractionation tower / R. Zhangda, S. Wua, F. Gaob // *Journal of Process Control*. – 2014. – V. 24. – I. 3. – P. 125–132.
89. Liua, T. Robust PID based indirect-type iterative learning control for batch processes with time-varying uncertainties / T. Liua, X.Z. Wangb, J. Chend // *Journal of Process Control*. – 2014. – V. 12. – I. 12. – P. 95–106.
90. Miccio, M. Control of a distillation column by type-2 and type-1 fuzzy logic PID controllers / M. Miccio, B. Cosenza // *Journal of Process Control*. – 2014. – V. 24. – I. 5. – P. 475–484.
91. Garpinger, O. Performance and robustness trade-offs in PID control / O. Garpinger, T. Hagglund, K.J. Astrom // *Journal of Process Control*. – 2014. – V. 24. – I. 5. – P. 568–577.
92. Салихов, З.Г. Системы оптимального управления сложными технологическими объектами / З.Г. Салихов, Г.Г. Арунянс, А.Л. Рутковский. – М.: Теплоэнергетик, 2004. – 496 с.

93. Qina, S.J. A survey of industrial model predictive control technology / S.J. Qina, T.A. Badgwell // *Control Engineering Practice*. – 2014. – V. 11. – I. 7. – P. 733–764.
94. Raimondia, A. Design of an adaptive predictive control strategy for crude oil atmospheric distillation process / A. Raimondia, A. Favela-Contrerasa, F. Beltran-Carbajalb, A. Pinon-Rubiona, J.L. de la Pena-Elizondo // *Control Engineering Practice*. – 2015. – V. 34. – P. 39–48.
95. Patela, N. Modified genetic algorithm using Box Complex method: Application to optimal control problems / N. Patela, N. Padhiyarb // *Journal of Process Control*. – 2015. – V. 26. – P. 35–50.
96. Betti, G. Realization issues, tuning, and testing of a distributed predictive control algorithm / G. Betti, M. Farina, R. Scattolini // *Journal of Process Control*. – 2014. – V. 24. – I. 4. – P. 424–434.
97. Real-time Process Optimization and Training Outlook. Five Year Market Analysis and Technology Forecast through 2013 – ARC Advisory Group, 2009.
98. Dechy, N. First lessons of the Toulouse ammonium nitrate disaster 21st September 2001, AZF plant, France / N. Dechy, T. Bourdeaux, N. Ayrault, M.-A. Kordek, J.-C. Le Coze // *Journal of Hazardous Materials*. – 2001. – V. 111. – I. 1-3. – P. 131–138.
99. Дозорцев, В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов / В.М. Дозорцев – М.: СИНТЕГ, 2009. – 372 с.
100. Дозорцев, В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов – теория, методология, построение и использование: дис. докт. тех. наук. – М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 1999.
101. Embrey, D. Refinery Operators: Competency, Procedures and Best Operating Practice / D. Embrey // *Proc. of the 1996 European Oil Refining Conference*. – Antwerp (Belgium). – 1996. – 230 P.

102. Rafael, C.L. Development and implementation of a training simulator for Mexican operators of petrochemical units. All about simulators / C.L. Rafael, A.G. Joaquin // The Society for Computer Simulation, 1984. – P. 18-20.
103. Park, J. The operators' non-compliance behavior to conduct emergency operating procedures-comparing with the work experience and the complexity of procedural steps / J. Park, W. Jung // Reliability engineering and system safety. – 2003. – V. 82. – P. 115–131.
104. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. 2-е изд. доп. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. – 126 с.
105. Рекомендации по разработке планов локализации и ликвидации аварий на взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектах. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. – 56 с.
106. Sheltout, Z. Capture the long-term benefits of operator training simulators / Z. Sheltout, R. Coupier, M. Valleur // Hydrocarbon Processing. – 2007. – V. 86. – No. 4. – P. 111–116.
107. Хафизов, Ф.Ш. Практические аспекты разработки технических средств обучения специалистов трубопроводного транспорта нефти / Ф.Ш. Хафизов, Д.И. Шевченко, А.А. Кудрявцев // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – №1. – С. 320-335.
108. Васильев, А.Н. Обучающий комплекс для операторов станции биохимической очистки / А.Н. Васильев, В.А. Немтинов // Вопросы современной науки и практики. – 2011. – №1. – С. 72-80.
109. Щербаков, М.А. Модели и алгоритмы системы управления аварийными ситуациями при производстве стекла / М.А. Щербаков, В.А. Кушников // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – № 2 (55). Выпуск 1. – С. 196–200.
110. Вех, В.В. Технология создания компьютерных тренажеров для персонала энергопредприятий: дис. канд. тех. наук. – Томск: НИИ АиЭ при ТГУСУР, 1999.

111. Чернаков, В.А. Опыт использования тренажерных моделирующих комплексов при внедрении АСТУП 3-го энергоблока Калининской АЭС / В.А. Чернаков // Автоматизация в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 31–35.

112. Чистякова, Т.Б. Система имитационного моделирования тренажерного комплекса для управления гибкими сорбционно-каталитическими производствами / Т.Б. Чистякова, Ю.И. Шляго, И.В. Новожилова // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 7. – С. 31–34.

113. Самарина, А.М. Архитектура программного обучающего комплекса для производственного персонала алюминиевой отрасли / А.М. Самарина, О.В. Ершова // Автоматизация в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 54–57.

114. Благодарный, Н.С. Использование тренажеров типовых технологических процессов в образовании / Н.С. Благодарный, А.Г. Колмогоров, В.Ю. Кобозев, М.В. Кривов, О.В. Смолянинова // Сб. тр. XXII Международ. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях». Международ. науч.-методич. симпозиум «Современные проблемы многоуровневого образования» - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ. – 2008. – С. 155-159.

115. Стефенсон, Г. За пределами тренинга операторов: другие области применения имитационного моделирования технологических процессов / Г. Стефенсон, П. Хендерсон, Г. Шиндлер, В. Дозорцев // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2009. – №6. – С. 22-26.

116. Гурдзибеева, А.Р. Исследование и разработка методов и алгоритмов имитационного моделирования для тренажеров операторов сложных объектов: дис. канд. тех. наук. – Владикавказ: СКГМИ, 2004.

117. Назин, В.А. Автоматизированные системы обучения персонала технологических установок // Автоматизация в промышленности. – 2006. – №6. – С. 10-14.

118. Абросимов, М.Б. О разработке и внедрении тренажера для установки дегидрирования изобутана / М.Б. Абросимов, Е.А. Гильман, А.А.

Кривонос, А.В. Ерхов // Автоматизация в промышленности. – 2010. – №7. – С. 66-68.

119. Гершберг, А.Ф. Компьютерный тренажер для обучения операторов установки каталитического реформинга ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез» / А.Ф. Гершберг, С.В. Подъяпольский, Л.Р. Соркин // Автоматизация в промышленности. – 2003. – №7. – С. 52-53.

120. Абызгильдин, А.Ю. Разработка компьютерных тренажеров технологических процессов / А.Ю. Абызгильдин, Е.О. Альмухаметов, Н.А. Руднев // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2004. URL: http://ogbus.ru/authors/Abyzgildin/Abyzgildin_2.pdf. Дата обращения 22.12.2014.

121. Дозорцев, В.М. Динамическое моделирование в оптимальном управлении и автоматизированном обучении операторов технологических процессов. Часть 1. Задачи оптимального управления / В.М. Дозорцев // Приборы и системы управления. – 1996. – №7. – С. 46-51.

122. Дозорцев, В.М. Динамическое моделирование в оптимальном управлении и автоматизированном обучении операторов технологических процессов. Часть 2. Компьютерные тренажеры реального времени / В.М. Дозорцев // Приборы и системы управления. – 1996. – №8. – С. 41-50.

123. Дозорцев, В.М. Компьютерные тренажеры для нефтехимии и нефтепереработки: опыт внедрения на российском рынке / В.М. Дозорцев, Н.В. Шестаков // Приборы и системы управления. – 1998. – №1. – С. 27-32.

124. Дозорцев, В.М. Современные компьютерные тренажеры для обучения операторов ТП: состояние и направления ближайшего развития / В.М. Дозорцев // Автоматизация в промышленности. – 2007. – №7. – С. 30-36.

125. Dozortsev, V.M. Diagnost: A Software for Developing Efficient Decision-Making Strategies / V.M. Dozortsev // In Processing of the 6th Euromedia Conference «Euromedia'2001». Valencia, Spain, 18-20 April. 2001.SCS, Delft, Netherlands: P. 261-268.

126. Dozortsev, V.M. The Cost Effectiveness Criterion-Based Approach to Development, Implementation and Support of Computer-Based Training Simulators

for Continuous Process Operators / V.M. Dozortsev, D.V. Kneller, N.V. Shestakov // Preprints of 4th Euromedia Conference. Munich, Germany. – 1999. – P. 197-201.

127. Колмогоров, А.Г. Компьютерный тренинг технологического персонала на ОАО «Ангарский завод полимеров» / А.Г. Колмогоров, Н.С. Благодарный, М.В. Кривов // Современные проблемы радиоэлектроники и связи / Материалы VIII Всероссийской науч.-технич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Иркутск: Изд-во ИрГТУ. – 2009. – С. 125-129.

128. Колмогоров, А.Г. Математическое моделирование термодинамических процессов для построения тренажера управления производством этилена / А.Г. Колмогоров, Н.С. Благодарный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск: Изд-во ИрГУПС. – 2010. – №2. – С. 51-56.

129. Колмогоров, А.Г. Опыт создания компьютерных тренажерных систем для обучения операторов установки ЭП-300 / А.Г. Колмогоров, Н.С. Благодарный, В.Ю. Кобозев // Вестник АГТА. – 2008. – Т.2. – №1. – С. 33-38.

130. Ковард, Э. Объединение и технология динамического моделирования и усовершенствованного управления ТП / Э. Ковард // Автоматизация в промышленности. – 2008. – №7. – С. 52-53.

131. Соркин, Л.Р. Использование имитационного моделирования для обучения операторов и оптимизации технологических процессов / Л.Р. Соркин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2008. – №8. – С. 15-20.

132. Smith, F.O. KPIs Made Easy / F.O. Smith // Control Engineering – 2007. – V. 1. – No. 1.

133. Venkatasubramanian, V. A review of process fault detection and diagnosis – Part I: Quantitative Model-Based Methods / V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, S.N. Kavuri // Computers and Chemical Engineering. – 2003. – V. 27. – I. 3. – P. 293–311.

134. Real-time process optimization and training worldwide outlook. Market analysis and forecast through 2010 – ARC Advisory Group, 2006.

135. Протасов, А.В. Интеллектуальная система обучения персонала – основа обеспечения безопасности технологических процессов / А.В. Протасов, П.Ю. Вильвер // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 6. – С. 32–36.
136. Абросимов, М.Б. Новые возможности инструментальных средств УТК для разработки тренажерных комплексов / М.Б. Абросимов, Е.А. Гильман // Автоматизация в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 58–59.
137. Дорохов, Б.Ф. Промышленные тренажеры на базе информационной технологии «АТЛАС» / Б.Ф. Дорохов, Д.В. Бушнев // Автоматизация в промышленности. – 2008. – №7. – С. 66-67.
138. Haburd, N. Managing training simulator project / N. Haburd // Petroleum Technology Quartely. – 2006. – Q. 4. – P. 85–92.
139. Самарский, А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. 2-е изд. испр. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
140. Колмогоров, А.Г. Математическая модель статики ректификационной колонны для разделения этан-этиленовой смеси / А.Г. Колмогоров, Н.С. Благодарный // Сб. тр. XIX Международ. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях». – Т. 9. – Воронеж: Изд-во ВГТА. 2006. – С. 76-78.
141. Власов, С.С. Моделирование динамических режимов атмосферного блока установки первичной переработки нефти при исследовании алгоритмов компьютерных тренажерных комплексов / С.С. Власов, А.Г. Шумихин, А.И. Мустафин // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 7. – С. 36–42.
142. Скрипников, Д.А. Построение системы и системообразующих сценариев имитационно-компьютерного обучения технологического персонала / Д.А. Скрипников, А.В. Скрипников // Датчики и системы. – 2003. – №12. – С. 10-14.

143. Дозорцев, В.М. Методики компьютерного тренинга операторов – ключевой элемент тренажерных систем (современные тенденции) / В.М. Дозорцев // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 7. – С. 3–9.

144. Казанцев, В.А. Новые направления развития тренажерных комплексов для обучения операторов промышленных установок / В.А.Казанцев, П. Ричмонд // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 7. – С. 13–17.

145. Глушков, И.В. Подготовка оперативного персонала технологических установок с помощью специальных компьютерных программ: инструментальные средства, методический и практический опыт / И.В. Глушков, А.Н. Донской, А.Г. Ярославцев, М.В. Вантеева, А.Л. Бирюков, В.А. Егоров // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 7. – С. 18–24.

146. Коцуба, Д.В. Эффективное обучение операторов с помощью высокоточного имитационного тренажера / Д.В. Коцуба, М.Г. Гарейшин, Д. Ставракас, Т. Паллис, В. Харисмиадис // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 7. – С. 10–12.

147. Дозорцев, В.М. Оператор в компьютеризированной системе управления: к проблеме построения человеко-машинного интерфейса / В.М. Дозорцев // Приборы и системы управления. – 1998. – №3. – С. 39-47.

148. Дозорцев, В.М. Структура человеко-машинного взаимодействия в компьютерных тренажерах операторов технологических процессов / В.М. Дозорцев // Приборы и системы управления. – 1998. – №5. С. – 57-65.

149. Дозорцев, В.М. Обучение операторов технологических процессов на базе компьютерных тренажеров / В.М. Дозорцев // Приборы и системы управления. – 1999. – №8. – С. 61-70.

150. Скрипников, Д.А. Интерфейсное обеспечение в компьютерных тренажерах / Д.А. Скрипников, В.Е. Кросовский // Научная сессия МИФИ-2006. – Т. 12. – 2006. – С. 99-100.

151. Дозорцев, В.М. О проблеме адекватности тренажерных моделей технологических процессов / В.М. Дозорцев и др. // Труды Междунар.

конференции «Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'2000)». – Москва. – 2000. – С. 51-61.

152. Сластенов, И.В. Идентификация тренажерных моделей по данным реального технологического процесса / И.В. Сластенов // Автоматизация в промышленности. – 2013. – № 7. – С. 29–36.

153. USNRC (United States Nuclear Regulatory Commission). Regulatory Guide 1.149 – Nuclear Power Plant Simulation Facilities for Use in Operator Training and License Examinations. Rev.3. Government Printing Office. – Washington, DC, Oct. 2001.

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

155. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 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.

156. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 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.

157. Мушнин, А.В. Алгоритм разработки математической модели емкости с регулятором уровня в компьютерном тренажере / А.В. Мушнин, 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.

158. 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.

159. 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.

160. 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.

161. Елизаров, Д.В. Разработка программного комплекса для моделирования технологических установок и систем управления / Д.В. Елизаров, А.В. Мушнин, 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.

162. Мушнин, А.В. Программная среда для разработки распределенного компьютерного тренажера / А.В. Мушнин // Технические и математические науки: актуальные проблемы и перспективы развития – 2013. Сборник материалов II Международной научно - практической конференции. – Киев: 2013. – С. 40–47.

163. 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.

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

165. 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.

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

167. Мушнин, А.В. Имитационная модель управления узлом предварительной дебутанизации 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.

168. 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.

169. 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.

170. Мушнин, А.В. Моделирование аварийных ситуаций в нефтеперерабатывающей отрасли для обучения персонала / А.В. Мушнин, 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.

171. 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.

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

173. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 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.

174. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 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.

175. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 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.

176. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Распределенный компьютерный тренажерный комплекс цеха выделения бутадиена из пиролизной фракции углеводородов C4 завода Этилен / В.В.

Елизаров, А.В. Мушнин и др., зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 10.09.2013, 2013618498.

177. Красовский И.Н. Теория управления движением / И.Н. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476 с.

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

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

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Режимные параметры в период пуска

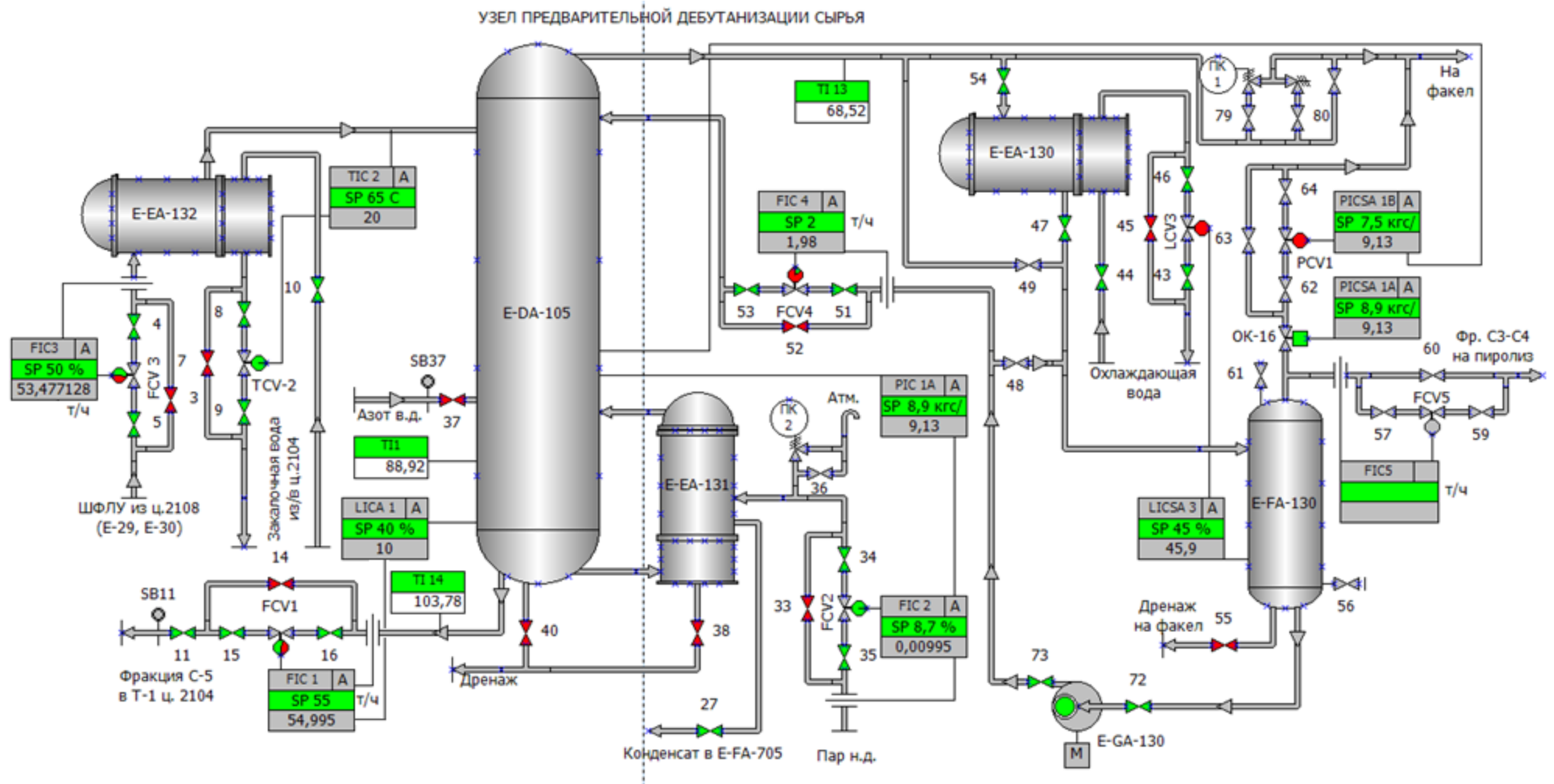
	FI3	FI5	FIC2	LICA1	LICSA3	PICSA1A	TI1	TIC2
Время	т/ч	т/ч	т/ч	%	%	КГ/CM2	ГР.С	ГР.С
0	0	0	0	-5,00579	-5,00012	0,433522	21,89457	8,88644
1	12,77056	0	0	-5,00237	-1,90564	1,942747	24,60358	41,47425
2	5,858062	0	0	-5,0007	29,71767	1,485259	29,65693	65,34516
3	3,78659	0	0	-5,00318	71,3788	1,522332	34,30179	63,57946
4	11,42655	0	0,144135	-5,00569	105,9277	5,53002	59,21164	73,75749
5	0	0	0,133342	-5,00596	57,79407	8,538729	82,04512	51,90861
6	0	0	0	-5,00752	43,55195	7,552165	77,57752	37,84262
7	0,40592	0	0	-5,00531	58,25537	5,945359	68,57787	31,60581
8	11,79451	0	0	-5,00131	52,62642	7,468819	75,06089	64,08277
9	7,055784	0	0	-1,04401	42,66181	7,957714	79,13044	59,27281
10	0	0	0	7,836812	63,13141	7,413752	76,72129	43,69361
11	0	0	0,04206	14,39219	70,72222	7,395846	75,52092	61,02019
12	0	0	0	20,56767	60,68113	8,344384	81,26902	80,5644
13	0	0	0	27,30894	55,6255	8,350993	81,32904	80,19453
14	0	0	0	33,52987	48,09238	8,248473	80,97913	79,27842
15	0	0	0	44,20603	41,784	8,215305	80,78189	79,15256
16	0	0	0	44,41935	37,64733	7,935069	79,46052	77,63525
17	11,95502	1,28859	0	44,35638	57,43903	7,690168	77,49484	78,24795
18	30,83667	16,54499	0,133342	44,20603	45,12729	9,202018	85,56741	84,19592
19	35,22943	18,81779	0,144135	44,41935	39,60327	9,265378	85,96634	84,72785
20	34,58644	19,11943	0,843764	44,35638	37,84768	9,256741	85,94735	85,02129
21	32,99048	19,50419	0,561836	45,16398	38,95694	9,250974	85,93051	85,1636
22	31,24611	19,25646	0,761836	45,28188	42,98911	9,251221	86,16859	85,34088
23	31,39751	19,21089	0,843764	45,40812	40,36229	9,257004	86,27205	85,4826
24	34,43523	24,57704	0,761836	45,39358	33,4671	9,116384	85,81982	85,13201

Время	FI3 т/ч	FI5 т/ч	FIC2 т/ч	LICA1 %	LICSA3 %	PICSA1A КГ/СМ2	TI1 ГР.С	TIC2 ГР.С
25	50,62448	32,90105	1,978243	45,53345	50,45979	9,209377	85,83875	85,10738
26	49,93297	32,09026	1,581367	45,13814	61,60132	9,076775	85,16987	85,08434
27	44,4455	31,6251	2,36114	44,74894	58,43617	9,196354	85,76592	85,49442
28	35,0472	32,77783	0,843764	48,42204	40,00836	9,123132	85,54889	84,77171
29	38,94	32,6048	1,853624	44,60795	46,49881	9,150623	85,85143	84,14882
30	39,22678	32,83966	0,983445	44,4517	54,47267	9,151588	85,83238	84,34162
31	39,48589	32,90725	2,133048	44,26331	63,50405	9,126798	85,6926	84,41674
32	39,49117	32,87408	2,999631	44,04643	75,37288	9,140999	85,7614	84,61261
33	38,62906	32,90728	3,101659	44,0622	70,24347	9,151462	85,80539	84,67882
34	38,69758	32,88338	2,932118	44,19454	55,01141	9,156308	85,84694	84,71498
35	38,33822	32,88011	2,636355	44,63949	36,58933	9,185658	85,99641	84,91168
36	39,35268	32,95988	1,934522	44,83795	26,47406	9,119687	85,8747	84,36235
37	39,91084	33,34144	2,853371	44,95534	31,32245	9,166692	85,92669	84,1939
38	39,47339	33,29749	2,432933	45,24577	44,30643	9,140153	85,9572	84,34825
39	40,38605	35,57775	3,446976	45,39978	58,33789	9,096045	85,74636	84,12539
40	56,95601	50,80785	5,990958	45,3124	56,47102	9,136344	86,15292	83,79003
41	56,12914	50,93981	6,050604	45,51158	52,45638	9,159307	86,11616	83,55376
42	56,39509	50,90796	6,4559	45,52572	49,8529	9,124354	86,09023	82,25599
43	55,06017	50,62911	6,4488	45,23458	46,23895	9,150269	86,24959	82,17433
44	54,7437	51,55914	6,644428	45,11841	47,54992	9,139899	86,41614	81,5649
45	55,1213	51,38468	6,679359	45,06134	50,01629	9,145373	86,53513	80,93883
46	54,11939	50,96651	6,701744	44,83887	46,29237	9,143138	86,65217	80,51977
47	58,26849	51,5732	7,478572	44,76278	42,40932	9,08607	87,08189	79,44278
48	58,45533	51,45363	7,002827	44,90896	38,72298	9,146496	87,08427	82,21286
49	55,37553	51,41425	5,820643	44,86043	31,73355	9,143414	87,07837	84,15746
50	54,13374	50,75673	5,761219	44,7347	37,3311	9,147038	87,19112	84,18955
51	54,32645	50,78309	5,476236	45,0413	38,34506	9,159405	87,34925	84,57731
52	53,6978	50,34796	5,125987	45,34871	31,15101	9,145615	87,5034	84,77466
53	54,05163	49,99034	4,956917	45,42674	31,99924	9,150039	87,29995	84,81143
54	52,99493	49,69432	4,865871	45,61249	29,99757	9,135205	87,45396	84,78934

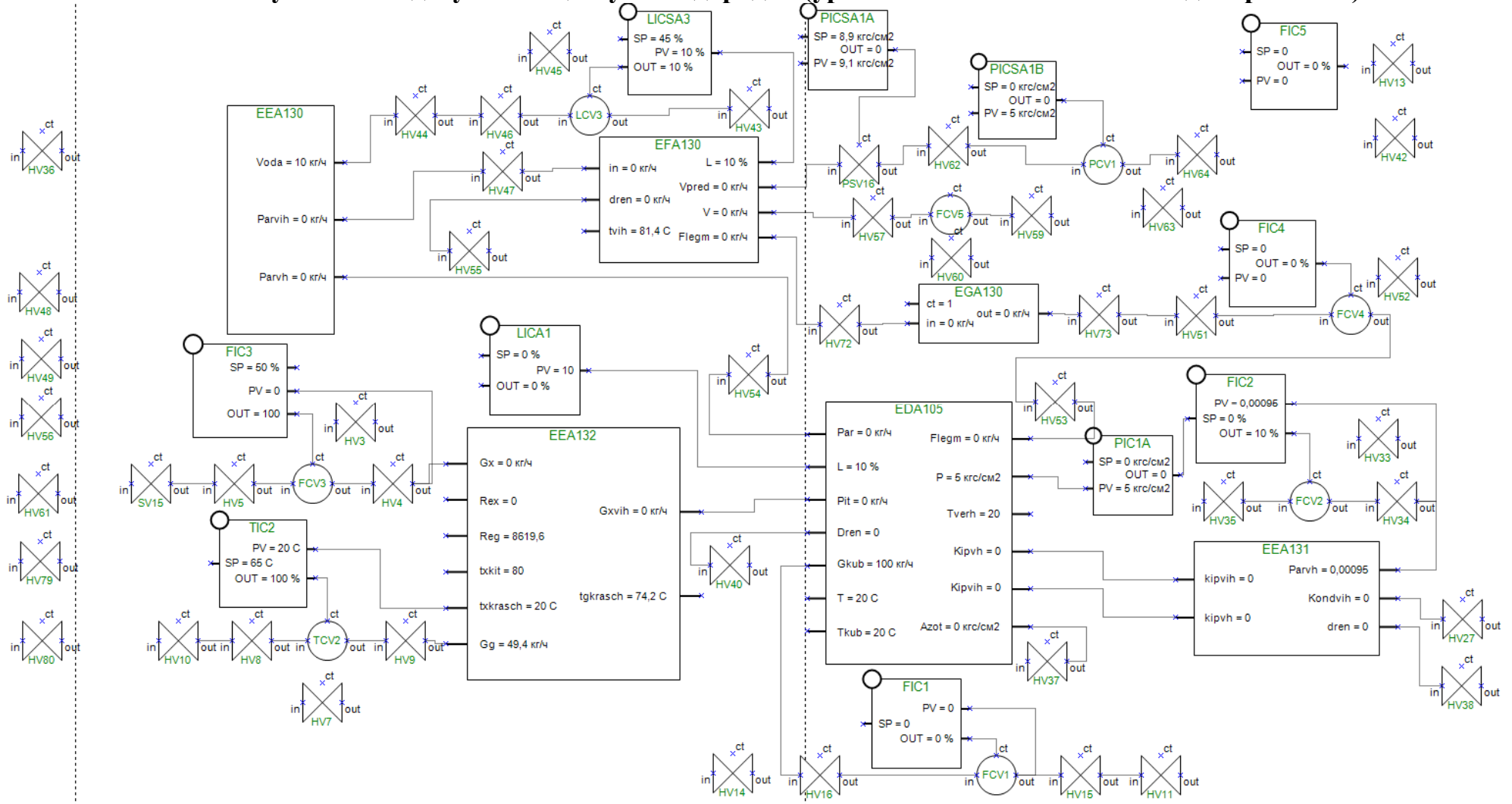
	FI3	FI5	FIC2	LICA1	LICSA3	PICSA1A	TI1	TIC2
Время	т/ч	т/ч	т/ч	%	%	КГ/СМ2	ГР.С	ГР.С
55	53,7772	49,85373	5,041626	45,63538	33,90751	9,128908	87,49434	84,58698
56	54,37621	50,6305	5,364779	45,5073	41,74649	9,131641	87,55992	84,43701
57	54,44859	50,59243	5,471334	45,52389	42,63059	9,136229	87,1466	83,89717
58	54,12896	51,12863	5,18336	50,35797	41,62883	9,14898	87,22959	83,8451
59	54,86922	50,61603	5,346529	57,29057	38,28069	9,124601	87,06978	83,36202
60	66,66353	49,54984	5,701744	40,20479	31,77374	8,827774	89,88855	75,48693
61	44,45244	48,63946	6,178572	53,14469	64,47129	8,862012	87,07969	70,91222
62	47,9166	50,0656	6,150095	51,37628	40,521	9,179971	86,3413	77,91222
63	50,82541	49,94436	5,207516	47,2522	33,15093	9,190136	88,17327	83,97133
64	54,11661	49,99394	4,86045	45,31454	33,21344	9,218173	88,03342	84,18009
65	53,97037	49,94524	4,501629	45,63151	31,34398	9,199832	88,1193	84,13511
66	54,18127	49,90563	4,507958	45,73324	33,8469	9,20178	88,11197	84,08456
67	53,63006	50,2174	4,510556	45,80566	31,06564	9,187115	88,08583	84,01507

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Мнемосхема установки дебутанизации (уровень визуализации)



НФС установки дебутанизации углеводородов (уровень математического моделирования)



Перечень действий для инициализации параметров установки дебутанизации углеводородов перед началом пуска установки (уровень разработки сценариев)

	Caption	Interval	Paramete	Type	Value
1		0	HV4_ct	0	0
2		0	HV5_ct	0	0
3		0	HV7_ct	0	0
4		0	HV3_ct	0	0
5		0	HV8_ct	0	0
6		0	HV9_ct	0	0
7		0	HV10_ct	0	0
8		0	HV13_ct	0	0
9		0	HV37_ct	0	0
10		0	HV11_ct	0	0
11		0	HV14_ct	0	0
12		0	HV15_ct	0	0
13		0	HV16_ct	0	0
14		0	HV38_ct	0	0
15		0	HV40_ct	0	0
16		0	HV27_ct	0	0
17		0	HV36_ct	0	0
18		0	HV33_ct	0	0
19		0	HV34_ct	0	0
20		0	HV35_ct	0	0
21		0	HV51_ct	0	0
22		0	HV52_ct	0	0
23		0	HV53_ct	0	0
24		0	HV54_ct	0	0
25		0	HV43_ct	0	0
26		0	HV44_ct	0	0
27		0	HV45_ct	0	0
28		0	HV66_ct	0	0
29		0	HV47_ct	0	0
30		0	HV48_ct	0	0

	Caption	Interval	Paramete	Type	Value
31		0	HV49_ct	0	0
32		0	HV55_ct	0	0
33		0	HV56_ct	0	0
34		0	HV57_ct	0	0
35		0	HV59_ct	0	0
36		0	HV60_ct	0	0
37		0	HV61_ct	0	0
38		0	HV62_ct	0	0
39		0	HV63_ct	0	0
40		0	HV64_ct	0	0
41		0	HV72_ct	0	0
42		0	HV73_ct	0	0
43		0	HV79_ct	0	0
44		0	HV80_ct	0	0
45		0	FCV3_ct	0	0
46		0	FIC3_auto	0	0
47		0	FIC3_SP	0	0
48		0	FIC3_PV	0	0
49		0	FIC3_OUT	0	0
50		0	TIC2_PV	0	20
51		0	TIC2_SP	0	0
52		0	TIC2_OUT	0	0
53		0	TIC2_auto	0	0
54		0	TCV2_ct	0	0
55		0	LICA1_SP	0	0
56		0	LICA1_auto	0	0
57		0	FCV1_ct	0	0
58		0	FIC1_SP	0	0
59		0	FIC1_PV	0	0
60		0	FIC1_auto	0	0

	Caption	Interval	Paramete	Type	Value
60		0	FIC1_auto	0	0
61		0	FCV4_ct	0	0
62		0	FIC4_SP	0	0
63		0	FIC4_PV	0	0
64		0	FIC4_auto	0	0
65		0	FCV2_ct	0	0
66		0	FIC2_SP	0	0
67		0	FIC2_PV	0	0
68		0	FIC2_auto	0	0
69		0	PIC1A_SP	0	0
70		0	PIC1A_aut	0	0
71		0	LCV3_ct	0	0
72		0	LICSA3_SP	0	0
73		0	LICSA3_aut	0	0
74		0	FCV5_ct	0	0
75		0	FIC5_SP	0	0
76		0	FIC5_PV	0	0
77		0	FIC5_auto	0	0
78		0	PCV1_ct	0	0
79		0	PICSA1B_S	0	0
80		0	PICSA1B_a	0	0
81		0	PSV16_ct	0	0
82		0	SV15_ct	0	0
83		0	EFA130_L	0	0
84		0	EDA105_L	0	0
85		0	EDA105_P	0	0
86		0	EDA105_T	0	20
87		0	EGA130_ct	0	0
88		0	LICA1_OUT	0	0
89		0	FIC1_OUT	0	0
90		0	FIC4_OUT	0	0
91		0	FIC2_OUT	0	0
92		0	PIC1A_OUT	0	0
93		0	LICSA3_OU	0	0
94		0	FIC5_OUT	0	0
95		0	PICSA1B_O	0	0

Перечень действий по пуску установки дебутизации углеводородов (уровень разработки сценариев)

	Caption	Interval	Paramete	Type	Value
1	Открыть ручную арматуру №37	100	HV37_ct	2	1
2	Произвести продувку узла предварительной	100		1	0
3	Закрыть ручную арматуру №37	100	HV37_ct	2	0
4	Принять оборотную воду в дефлегматор поз.	100		1	0
5	Открыть ручную арматуру №44	100	HV44_ct	2	1
6	Открыть ручную арматуру №46	100	HV46_ct	2	1
7	Открыть ручную арматуру №43	100	HV43_ct	2	1
8	Открыть ручную арматуру №42	100	HV42_ct	2	1
9	Стравить воздух с аппарата поз. E-EA-130	100		1	0
10	Закрыть ручную арматуру №42	100	HV42_ct	2	0
11	Принять закалочную воду в подогреватель сырья	100		1	0
12	Открыть ручную арматуру №10	100	HV10_ct	2	1
13	Открыть ручную арматуру №8	100	HV8_ct	2	1
14	Открыть ручную арматуру №9	100	HV9_ct	2	1
15	По согласованию с цехом № 2104 принять пар	100		1	0
16	Открыть ручную арматуру №35	100	HV35_ct	2	1
17	Открыть ручную арматуру №34	100	HV34_ct	2	1
18	Открыть ручную арматуру №27	100	HV27_ct	2	1
19	По согласованию с цехом №2108 принять сырье	100		1	0
20	Открыть ручную арматуру №5	100	HV5_ct	2	1
21	Открыть ручную арматуру №4	100	HV4_ct	2	1
22	Открыть регулирующий клапан FCV3 на 10%	100	FCV3_ct	2	10
23	Открыть регулирующий клапан TCV2 на 10%	100	TCV2_ct	2	10
24	Задать уставку регулятору TIC2 равную 65°C	100	TIC2_SP	2	65
25	Перевести регулятор TIC2 в автоматический режим	100	TIC2_auto	2	1
26	Дождаться повышения давления в аппарате до	0	EDA105_P	4	5
27	Открыть регулирующий клапан поз. LCV3 на 10%	100	LCV3_ct	2	10
28	Задать уставку регулятору PICA1B равную 9	100	PICA1B_S	2	9
29	Перевести регулятор PICA1B в автоматический	100	PICA1B_a	2	1
30	Дождаться появления уровня в кубе колонны поз.	0	EDA105_L	4	10
31	Подать пар н.д., открыв регулирующий клапан поз.	100	FCV2_ct	2	10

	Caption	Interval	Paramete	Type	Value
32	Дождаться появления уровня во флегмовой емкости	0	EFA130_L	4	10
33	Включить в работу насос поз. E-GA-130	100	EGA130_ct	2	1
34	Открыть регулирующий клапан FCV4 на 10%	100	FCV4_ct	2	10
35	По согласованию с цехом № 2104 подать фракцию	100	FCV5_ct	2	10
36	Открыть регулирующий клапан FCV1 на 5%	100	FCV1_ct	2	5
37	Задать уставку регулятору LICSA3 равную 45%	100	LICSA3_SP	2	45
38	Перевести регулятор поз. LICSA3 в автоматический	100	LICSA3_aut	1	1
39	Задать уставку регулятору PIC1A равную 8,9	100	PIC1A_SP	2	8,9
40	Перевести регулятор поз. PIC1A в автоматический	100	PIC1A_aut	2	1
41	Задать уставку регулятору FIC3 равную 35 т/ч	100	FIC3_SP	2	35
42	Перевести регулятор FIC3 в автоматический режим	100	FIC3_auto	2	1
43	Задать уставку регулятору FIC5 равную 32 т/ч	100	FIC5_SP	2	32
44	Перевести регулятор FIC5 в автоматический режим	100	FIC5_auto	2	1
45	Задать уставку регулятору FIC1 равную 3 т/ч	100	FIC1_SP	2	3
46	Перевести регулятор FIC1 в автоматический режим	100	FIC1_auto	2	1
47	Задать уставку регулятору FIC4 равную 3 т/ч	100	FIC4_SP	2	3
48	Перевести регулятор FIC4 в автоматический режим	100	FIC4_auto	2	1
49	Задать уставку регулятору FIC3 равную 55 т/ч	100	FIC3_SP	2	55
50	Задать уставку регулятору FIC5 равную 50 т/ч	100	FIC5_SP	2	50
51	Задать уставку регулятору FIC1 равную 5 т/ч	100	FIC1_SP	2	5
52	Задать уставку регулятору FIC4 равную 5 т/ч	100	FIC4_SP	2	5
53	Задать уставку регулятору LICA1 равную 40%	100	LICA1_SP	2	40
54	Перевести регулятор LICA1 в автоматический режим	100	LICA1_auto	2	1
55	Отстабилизировать режим по узлу предварительной	100		1	0

Перечень действий по пуску установки дебутанизации углеводородов (приложение для обучающегося персонала)

Действие	Тип действия	Значение действия
Открыть ручную арматуру №37	Действие равно	Открыть
Произвести продувку узла дебутанизации азотом от кислорода (до содержания кислорода в отходящем газе н.б. 0.5%)	Текстовое действие	
Закрыть ручную арматуру №37	Действие равно	Закрыть
Принять оборотную воду в дефлегматор поз. E-EA-130	Текстовое действие	
Открыть ручную арматуру №44	Действие равно	Открыть
Открыть ручную арматуру №46	Действие равно	Открыть
Открыть ручную арматуру №43	Действие равно	Открыть
Открыть ручную арматуру №42	Действие равно	Открыть
Стравить воздух с аппарата поз. E-EA-130	Текстовое действие	
Закрыть ручную арматуру №42	Действие равно	Закрыть
Принять закалочную воду в подогреватель сырья поз. E-EA-132	Текстовое действие	
Открыть ручную арматуру №10	Действие равно	Открыть
Открыть ручную арматуру №8	Действие равно	Открыть
Открыть ручную арматуру №9	Действие равно	Открыть
По согласованию с цехом № 2104 принять пар низкого давления в кипятильник поз. E-EA-131	Текстовое действие	
Открыть ручную арматуру №35	Действие равно	Открыть
Открыть ручную арматуру №34	Действие равно	Открыть
Открыть ручную арматуру №27	Действие равно	Открыть
По согласованию с цехом №2108 принять сырье (ШФЛУ) в колонну поз. E-DA-105	Текстовое действие	
Открыть ручную арматуру №5	Действие равно	Открыть
Открыть ручную арматуру №4	Действие равно	Открыть
Открыть регулирующий клапан FCV3 на 10%	Действие равно	10
Открыть регулирующий клапан TCV2 на 10%	Действие равно	10
Задать уставку регулятору TIC2 равную 65°C	Действие равно	65
Перевести регулятор TIC2 в автоматический режим работы	Действие равно	Открыть
Дождаться повышения давления в аппарате до величины 5 кгс/см ²	Ожидание значение больше	5
Открыть регулирующий клапан поз. LCV3 на 10%	Действие равно	10
Задать уставку регулятору PICSA1B равную 9 кгс/см ²	Действие равно	9

Действие	Тип действия	Значение действия
Перевести регулятор P1CSA1B в автоматический режим работы	Действие равно	Открыть
Дождаться появления уровня в кубе колонны поз. E-DA-105	Ожидание значение больше	10
Подать пар н.д., открыв регулирующий клапан поз. FCV2 на 10% и вести разогрев куба	Действие равно	10
Дождаться появления уровня во флегмовой емкости	Ожидание значение больше	10
Включить в работу насос поз. E-GA-130	Действие равно	Открыть
Открыть регулирующий клапан FCV4 на 10%	Действие равно	10
По согласованию с цехом № 2104 подать фракцию C3-C4 на газовые печи пиролиза, открыв регулирующий клапан поз. FCV5 на 10%	Действие равно	10
Открыть регулирующий клапан FCV1 на 5%	Действие равно	5
Задать уставку регулятору LICSA3 равную 45%	Действие равно	45
Перевести регулятор поз. LICSA3 в автоматический режим работы	Текстовое действие	
Задать уставку регулятору PIC1A равную 8,9 кгс/см ²	Действие равно	8,9
Перевести регулятор поз. PIC1A в автоматический режим работы	Действие равно	Открыть
Задать уставку регулятору FIC3 равную 35 т/ч	Действие равно	35
Перевести регулятор FIC3 в автоматический режим работы	Действие равно	Открыть
Задать уставку регулятору FIC5 равную 32 т/ч	Действие равно	32
Перевести регулятор FIC5 в автоматический режим работы	Действие равно	Открыть
Задать уставку регулятору FIC1 равную 3 т/ч	Действие равно	3
Перевести регулятор FIC1 в автоматический режим работы	Действие равно	Открыть
Задать уставку регулятору FIC4 равную 3 т/ч	Действие равно	3
Перевести регулятор FIC4 в автоматический режим работы	Действие равно	Открыть
Задать уставку регулятору FIC3 равную 55 т/ч	Действие равно	55
Задать уставку регулятору FIC5 равную 50 т/ч	Действие равно	50
Задать уставку регулятору FIC1 равную 5 т/ч	Действие равно	5
Задать уставку регулятору FIC4 равную 5 т/ч	Действие равно	5
Задать уставку регулятору LICA1 равную 40%	Действие равно	40
Перевести регулятор LICA1 в автоматический режим работы	Действие равно	Открыть
Отстабилизировать режим по узлу дебутанизации сырья с учетом лабораторных анализов	Текстовое действие	

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Акты внедрения в образовательный процесс, акты ввода в эксплуатацию, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора
НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ»
по учебно-методической работе



Н.И. Никифорова
2012 г.

Акт внедрения в образовательный процесс №1
результатов, полученных в ходе выполнения работ
по Соглашению от «17» августа 2012 г. № 14.В37.21.0591, I этап работ.
Тема НИР «Распределенные тренажерные системы взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств».
« 15 » _____ 2012 г.

Результаты выполнения работ по Соглашению от «17» августа 2012 г. № 14.В37.21.0591 (этап I) в НОЦ «Информационные технологии в нефтехимии» внедрены в образовательную программу бакалавриата для студентов 3, 4 курсов обучения факультета управления и автоматизации на кафедре автоматизации технологических процессов и производств Нижнекамского химико-технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Форма внедрения – дополнение тематических планов лекций и лабораторных занятий дисциплины «Моделирование систем» образовательной программы 230100 «Информатика и вычислительная техника». В планы включены разделы, направленными на изучение студентами математических моделей процессов взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. Кроме того, дополнена система контроля знаний. Объем внедрения – 8 академических часов.

Заведующий кафедрой
автоматизации технологических процессов и производств
НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ»


В.И. Елизаров

Профессор кафедры
автоматизации технологических процессов и производств
НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ»
руководитель НИР по Соглашению
от «17» августа 2012 г. № 14.В37.21.0591


В.В. Елизаров

Доцент кафедры автоматизации
технологических процессов и производств
НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ»,
преподаватель дисциплины «Моделирование систем»


Э.Р. Галеев

«УТВЕРЖДАЮ»
Заместитель директора
НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ»
по учебно-методической работе



Н.И. Никифорова
2013 г.

Акт внедрения в образовательный процесс №2

результатов, полученных в ходе выполнения работ
по Соглашению от «17» августа 2012 г. № 14.В37.21.0591, II этап работ.

Тема НИР «Распределенные тренажерные системы взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств».

« » 2013 г.

Результаты выполнения работ по Соглашению от «17» августа 2012 г. № 14.В37.21.0591 (этап II) в НОЦ «Информационные технологии в нефтехимии» внедрены в образовательные программы бакалавриата для студентов 3, 4 курсов обучения технологического факультета и факультета управления и автоматизации на кафедре автоматизации технологических процессов и производств Нижнекамского химико-технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Форма внедрения:

1) «Моделирование систем». Направление 220100 «Системный анализ и управление».

Дополнение тематических планов лекций и лабораторных занятий дисциплины. В планы включены разделы, направленными на изучение студентами математических моделей процессов и методов разработки тренажеров. Дополнена система контроля знаний. Объем внедрения – 8 академических часов.

2) «Моделирование систем управления». Направление 220400 «Управление в технических системах».

Создание нового курса лекций в объеме 36 академических часов. Разработана рабочая программа дисциплины для студентов 3, 4 курсов обучения на факультете управления и автоматизации.

3) «Моделирование химико-технологических процессов» направления 240100 «Химическая технология».

Дополнение тематических планов лекций и лабораторных занятий дисциплины. В планы включены разделы, направленными на изучение студентами математических моделей процессов и методов разработки тренажеров. Дополнена система контроля знаний. Объем внедрения – 12 академических часов.

4) «Моделирование энерго- и ресурсосберегающих процессов в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» направления 241000 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии».

Дополнение тематических планов лекций и лабораторных занятий дисциплины. В планы включены разделы, направленными на изучение студентами математических моделей процессов и методов разработки тренажеров. Дополнена система контроля знаний. Объем внедрения – 12 академических часов.

Заведующий кафедрой
автоматизации технологических процессов и производств
НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ»

 В.И. Елизаров

Профессор кафедры
автоматизации технологических процессов и производств
НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ»
руководитель НИР по Соглашению
от «17» августа 2012 г. № 14.В37.21.0591

 В.В. Елизаров

Утверждаю:
Главный инженер
ОАО «Нижнекамскнефтехим»

Кле...
У.Х. Гильманов

АКТ от 22.09.2011 г.

ввода в эксплуатацию компьютерного тренажера для приобретения практических навыков безопасного ведения работ, отработки действий персонала для цеха № 1423

Комиссия в составе

от **Заказчика:** заместитель главного инженера по ПКПБ и ОТ Надыршин Ш.Я., директор завода ДБиУВС Кутуев Л.Х., начальник цеха № 1423 Беляев Е.Н.;

от **Исполнителя:** научный руководитель, заведующий кафедрой АТПП Елизаров В.И., профессор кафедры АТПП Елизаров В.В., доцент кафедры АТПП Елизаров Д.В., доцент кафедры АТПП Галеев Э.Р., доцент кафедры АТПП Долганов А.В., аспирант кафедры АТПП Мерзляков С.С., аспирант кафедры АТПП Камалиев Т.С., аспирант кафедры АТПП Мушнин А.В., программист ИВЦ Валеев И.М., программист ИВЦ Смолин Н.Г.

рассмотрела компьютерный тренажер, разработанный по договору № 4600014785 от 13.07.2010 г. и установила:

1) Тренажер содержит математические модели процессов, средств управления и противоаварийной защиты цеха № 1423.

2) На компьютер цеха № 1423 загружен тренажер, содержащий следующий список упражнений:

Пуск узлов цеха	
1.	Пуск узла холодильных циклов минус 17 °С, минус 36 °С (схема № 13)
2.	Пуск узла опорожнения аппаратов (схема № 1)
3.	Пуск узла приема пара и системы тепловых узлов (схема № 2)
4.	Пуск узла приема, нагрева и циркуляции теплоносителя ТНК-1 (схема № 3)
5.	Пуск узла прогрева аппаратов азотом и узла подачи метанола (схема № 4)
6.	Пуск узла приема, хранения и откачки сырья ЦГФУ в резервуар поз. Е-52, н-бутана в резервуар поз. Е-51 (схема № 8)
7.	Пуск узла приема, хранения и откачки изобутановой фракции в резервуар поз. Е-53 (схема № 9)
8.	Пуск узла приема, хранения и откачки в резервуары поз. Е-151,2 (для ШФЛУ) (схема № 10)
9.	Пуск узла приема, хранения и откачки нормального бутана в резервуары поз. Е-25, Е-35 (схема № 5)
10.	Пуск узла приема, хранения и откачки бутилен-изобутиленовой фракции в резервуар поз. Е-45 (схема № 6)
11.	Пуск узла приема, хранения и откачки фракции бутилен-дивинильной фракции в резервуар поз. Е-55 (схема № 7)
12.	Пуск узла холодильного цикла минус 17 °С (схема № 13)
13.	Пуск узла холодильного цикла минус 36 °С (схема № 13)
Останов узлов цеха	
1.	Остановка узла приема, хранения и откачки сырья ЦГФУ на ремонт (схема №8)
2.	Остановка узла приема, хранения и откачки изобутановой фракции на ремонт (схема № 9)
3.	Остановка узла приема, хранения и откачки бутан-бутиленовой фракции на ремонт (схема № 10)
4.	Остановка узла приема, хранения и откачки нормального бутана на ремонт (схема № 5)
5.	Остановка узла приема, хранения и откачки бутилен-изобутиленовой фракции на ремонт (схема № 6)
6.	Остановка узла приема, хранения и откачки БДФ на ремонт (схема № 7)
7.	Остановка узла приема, нагрева и циркуляции теплоносителя ТНК-1 на ремонт (схема № 3)
8.	Остановка узла приема пара и системы тепловых узлов (схема № 2)
9.	Остановка узла опорожнения аппаратов на ремонт (схема № 1)
10.	Остановка узла прогрева аппаратов азотом и узла подачи метанола (схема № 4)
11.	Остановка на ремонт узлов получения холода минус 17 °С и минус 36 °С (схемы № 13, 14, 15, 16, 17)
Пуск, останов пропановой турбокомпрессорной установки АТКП-435-1600 поз. М-104 1-5	
1.	Подготовка к пуску
2.	Пуск турбокомпрессора
3.	Пуск турбокомпрессора после ремонта
4.	Останов на ремонт
5.	Кратковременный останов турбокомпрессора
Пуск, останов пропановой турбокомпрессорной установки АТКП-335-2000 поз. М-112 1,2	

1. Подготовка к пуску
2. Пуск турбокомпрессора
3. Пуск турбокомпрессора после ремонта
4. Останов на ремонт
5. Кратковременный останов турбокомпрессора

План ликвидации аварийных ситуаций цеха

1. ПЛАС (блок № 1)	6. ПЛАС (блок № 6)	11. ПЛАС (блок № 11)	16. ПЛАС (блок № 16)	21. ПЛАС (блок № 21)
2. ПЛАС (блок № 2)	7. ПЛАС (блок № 7)	12. ПЛАС (блок № 12)	17. ПЛАС (блок № 17)	22. ПЛАС (блок № 22)
3. ПЛАС (блок № 3)	8. ПЛАС (блок № 8)	13. ПЛАС (блок № 13)	18. ПЛАС (блок № 18)	23. ПЛАС (блок № 23)
4. ПЛАС (блок № 4)	9. ПЛАС (блок № 9)	14. ПЛАС (блок № 14)	19. ПЛАС (блок № 19)	24. ПЛАС (блок № 24)
5. ПЛАС (блок № 5)	10. ПЛАС (блок № 10)	15. ПЛАС (блок № 15)	20. ПЛАС (блок № 20)	25. ПЛАС (блок № 25)

3) Исполнитель провел обучение персонала цеха № 1423 работе на тренажере.

4) Тренажер введен в эксплуатацию и будет использован для обучения промпersonала цеха № 1423 действиям по нормальной эксплуатации технологического процесса, пуска, плановой и аварийной остановки в типовых и специфических нештатных и аварийных ситуациях.

от Заказчика:

Заместитель главного инженера по
ПКП и ОТ

 Ш.Я. Надыршин

Директор завода ДБиУВС

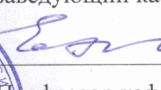
 Л.Х. Кутуев

Начальник цеха № 1423

 Е.Н. Беляев

от Исполнителя:

Научный руководитель,
заведующий кафедрой АТПП

 В.И. Елизаров

Профессор кафедры АТПП

 В.В. Елизаров

Доцент кафедры АТПП

 Д.В. Елизаров

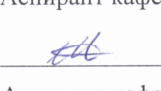
Доцент кафедры АТПП

 Э.Р. Галеев

Доцент кафедры АТПП

 А.В. Долганов

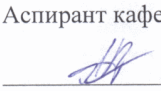
Аспирант кафедры АТПП

 С.А. Мерзляков

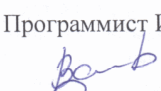
Аспирант кафедры АТПП

 Т.С. Камалиев

Аспирант кафедры АТПП

 А.В. Мушнин

Программист ИВЦ

 И.М. Валеев

Программист ИВЦ

 Н.Г. Смолин



Утверждаю:

Главный инженер

ОАО «Нижнекамскнефтехим»

Х.Х. Гильманов



АКТ

02.2013

ввода в эксплуатацию динамического компьютерного тренажера для приобретения практических навыков безопасного ведения работ, отработки действий персонала по ПЛАС для цеха 2107 завода этилена ОАО «Нижнекамскнефтехим»

Комиссия в составе:

от **Заказчика:** заместитель главного инженера по метрологии и АСУ Левков В.В., заместитель главного инженера по ПКПБ и ОТ Надыршин Ш.Я., директор завода этилена Шарифуллин И.Г., начальник цеха № 2107 Нырков А.И.;

от **Исполнителя:** научный руководитель, профессор кафедры АТПП Елизаров В.В., заведующий кафедрой АТПП Елизаров В.И., доцент кафедры АТПП Елизаров Д.В., доцент кафедры АТПП Галеев Э.Р., руководитель ИВЦ Валеев И.М., заведующий отделом ТО ИВЦ Смолин Н.Г., аспирант кафедры АТПП Мерзляков С.А., аспирант кафедры АТПП Камалиев Т.С., аспирант кафедры АТПП Мушнин А.В., аспирант кафедры АТПП Ибушева Н.В.

рассмотрела компьютерный тренажер, разработанный по договору № 4600017764 от 30.10.2011 г. и установила:

1) *тренажер содержит математические модели процессов, средств управления и противоаварийной защиты следующих узлов цеха № 2107:*

- узел первичной экстрактивной дистилляции;
- узел вторичной экстракции;
- узел ректификации бутадиена;
- секция регенерации ДМФА;
- секция гидрирования пиробензина, I стадия;
- секция выделения фракции C₅;
- секция выделения фракции C₆ – C₈;
- секция гидрирования фракции C₆ – C₈, II стадия;
- узел компрессора;
- узел гидродеалкилирования фракции C₆ – C₈;
- секция очистки бензола от легких углеводородов и полиароматики;
- секция выделения бензола;
- секция смолоотделения;
- секция очистки водородосодержащего газа.

2) *на компьютер цеха № 2107 загружен тренажер, содержащий следующий список упражнений:*

Пуск узлов цеха	
1.	Подготовка к пуску узла гидрирования пиробензина (I стадия) и выделения фракции C ₅
2.	Подготовка к пуску узла выделения и гидрирования фракции C ₆ – C ₈ (II стадия)
3.	Подготовка к пуску узла гидродеалкилирования и узла абсорбции бензола и очистки отходящих газов
4.	Подготовка к пуску узла ректификации бензола и смолоотделения
5.	Пуск в работу компрессора водорода поз. E-GB-302AB
6.	Пуск в работу компрессора циркуляции водорода поз. H-GB-201
7.	Пуск в работу компрессора циркуляции водорода поз. M-GB-101
8.	Пуск узла фракционирования пиробензина (схема А)
9.	Пуск узла гидрирования пиробензина (I стадия)
10.	Пуск узла I стадии гидрирования пиробензина (вариант Б)
11.	Пуск узла гидрирования фракции C ₆ – C ₈ (II стадия)
12.	Пуск узла гидродеалкилирования, узла абсорбции бензола и очистки отходящих газов
13.	Пуск узла ректификации бензола и смолоотделения
14.	Предварительные операции перед пуском узлов первичной и вторичной экстрактивной дистилляции
15.	Пуск узлов первичной и вторичной дистилляции на углеводородном сырье
16.	Пуск узла ректификации бутадиена колонн поз. G-DA-106 и поз. G-DA-107
17.	Пуск в работу компрессора поз. G-GB-101
18.	Пуск газодувки поз. G-GB-102AB компрессора поз. G-GB-101
19.	Пуск установки после кратковременной остановки
Останов узлов цеха	
1.	Остановка узла гидрирования фракции C ₆ – C ₈ (II стадия)
2.	Остановка узла гидродеалкилирования
3.	Остановка узла гидрирования пиробензина (I стадия)

4. Остановка депентанизатора поз. H-DA-101 5. Остановка колонны БТК (бензола, толуола, ксилола) поз. H-DA-102 6. Остановка узла абсорбции бензола и очистки отходящих газов 7. Остановка узла ректификации бензола и смолоотделения 8. Остановка колонны смолоотделения поз. M-DA-104 9. Остановка стабилизатора поз. M-DA-101 10. Остановка колонны предварительной ректификации поз. M-DA-102 11. Остановка адсорбера поз. M-DC-102AB 12. Остановка колонны отгона бензола поз. M-DA-103 13. Остановка узла первичной экстрактивной дистилляции и десорбции 14. Остановка компрессора поз. G-GB-101 15. Остановка узла вторичной экстрактивной дистилляции, десорбции и регенерации растворителя 16. Остановка узла ректификации	
План ликвидации аварийных ситуаций цеха	
1. Узел первичной экстрактивной дистилляции; 2. Узел вторичной экстракции; 3. Узел ректификации бутадиена; 4. Секция регенерации ДМФА; 5. Секция гидрирования пиробензина, I стадия; 6. Секция выделения фракции C ₅ ; 7. Секция выделения фракции C ₆ – C ₈ ; 8. Секция гидрирования фракции C ₆ – C ₈ , II стадия;	9. Узел компрессора; 10. Узел гидродеалкилирования фракции C ₆ – C ₈ ; 11. Секция очистки бензола от легких углеводородов и полиароматики; 12. Секция выделения бензола; 13. Секция смолоотделения; 14. Секция очистки водородосодержащего газа.

3) исполнитель провел обучение персонала цеха № 2107 работе на тренажере;

4) тренажер введен в эксплуатацию и будет использоваться для обучения промпersonала цеха № 2107 действиям по нормальной эксплуатации технологического процесса, пуска, плановой, аварийной остановки в типовых и специфических нестандартных и аварийных ситуациях.

от Заказчика:

Заместитель главного инженера по метрологии и АСУ

 В.В. Левков

Заместитель главного инженера по ПКПВ и ОТ

 И.И. Надыршин

Директор завода этилена

 И.Г. Шарифуллин

Начальник цеха № 2107

 А.И. Ныркoв



от Исполнителя:

Научный руководитель, профессор кафедры АТПП

 В.В. Елизаров

Заведующий кафедрой АТПП

 В.И. Елизаров

Доцент кафедры АТПП

 Д.В. Елизаров

Доцент кафедры АТПП

 Э.Р. Галеев

Руководитель ИВЦ

 И.М. Валеев

Заведующий отделом ТО ИВЦ

 Н.Г. Смолин

Аспирант кафедры АТПП

 С.А. Мерзляков

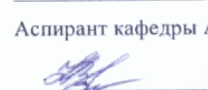
Аспирант кафедры АТПП

 Т.С. Камалиев

Аспирант кафедры АТПП

 А.В. Мушнин

Аспирант кафедры АТПП

 Н.В. Ибушева



Утверждаю:

Главный инженер
ОАО «Нижнекамскнефтехим»

Х.Х. Гильманов

АКТ

ввода в эксплуатацию компьютерного тренажера для приобретения практических навыков безопасного ведения работ, отработки действий персонала по ПЛАС цеха № 1808 ИФ-7, ИФ-8 завода ИМ ОАО «Нижнекамскнефтехим»

Комиссия в составе:

от **Заказчика:** заместитель главного инженера по метрологии и АСУ Левков В.В., заместитель главного инженера по ПКПБ и ОТ Надыршин Ш.Я., директор завода ИМ Гусамов Р.Р., начальник ПТО завода ИМ Градов А.А.;

от **Исполнителя:** научный руководитель, заведующий кафедрой АТПП Елизаров В.В., профессор кафедры АТПП Елизаров В.И., доцент кафедры АТПП Елизаров Д.В., доцент кафедры АТПП Галеев Э.Р., старший преподаватель кафедры АТПП Мушнин А.В.;

рассмотрела компьютерный тренажер, разработанный по договору № 4600022785 от «11» ноября 2013 г. и установила:

1) *тренажер содержит математические модели процессов, средств управления и противоаварийной защиты следующих узлов цеха № 1808 ИФ-7, ИФ-8:*

- узел испарения, перегрева, разложения технической пирановой фракции, диольной фракции и охлаждения контактного газа;
- узел охлаждения контактного газа аммиаком;
- узел приема и откачки ДМД;
- узел приема и откачки диольной фракции;
- узел приема и откачки товарного изопрен;
- узел приема и откачки технической пирановой фракции;
- узел приема и откачки шихты ТМК;
- узел приема и откачки ТМКФ загрязненной;
- узел приема и откачки зеленого масла.

2) *тренажер содержит упражнения:*

План ликвидации аварийных ситуаций цеха

- | |
|--|
| 1. Узел испарения, перегрева, разложения технической пирановой фракции, диольной фракции и охлаждения контактного газа. Блок №1. |
| 2. Узел охлаждения контактного газа аммиаком. Блок № 2. |
| 3. Узел приема и откачки ДМД. Блоки № 3,4. |
| 4. Узел приема и откачки диольной фракции. Блок № 5. |
| 5. Узел приема и откачки товарного изопрен. Блок №6. |
| 6. Узел приема и откачки технической пирановой фракции. Блок №7. |
| 7. Узел приема и откачки шихты ТМК. Блоки №8,9. |
| 8. Узел приема и откачки ТМКФ загрязненной. Блок № 10. |
| 9. Узел приема и откачки зеленого масла. Блок №11. |

3) *тренажер введен в эксплуатацию и будет использован для обучения промпersonала цеха № 1808 действиям по нормальной эксплуатации технологического процесса, плановой, аварийной остановке в типовых и специфических нештатных ситуациях.*

от **Заказчика:**

Заместитель главного инженера по метрологии и АСУ

В.В. Левков

Заместитель главного инженера по ПКПБ и ОТ

Ш.Я. Надыршин

Директор завода ИМ

Р.Р. Гусамов

Начальник ПТО завода ИМ

А.А. Градов

от **Исполнителя:**

Научный руководитель, зав. кафедрой АТПП

В.В. Елизаров

Профессор кафедры АТПП

В.И. Елизаров

Доцент кафедры АТПП

Д.В. Елизаров

Доцент кафедры АТПП

Э.Р. Галеев

Старший преподаватель кафедры АТПП

А.В. Мушнин

Утверждаю:

Главный инженер

ОАО «Нижнекамскнефтехим»

Х.Х. Гильманов



АКТ

ввода в эксплуатацию компьютерного тренажера для приобретения практических навыков безопасного ведения работ, отработки действий персонала для цеха № 2106 завода Этилена ОАО «Нижнекамскнефтехим»

Комиссия в составе:

от **Заказчика**: заместитель главного инженера по метрологии и АСУ Левков В.В., заместитель главного инженера по ПКПБ и ОТ Надыршин Ш.Я., директор завода этилена Шарифуллин И.Г.;

от **Исполнителя**: научный руководитель, заведующий кафедрой АТПП Елизаров В.В., профессор кафедры АТПП Елизаров В.И., доцент кафедры АТПП Елизаров Д.В., доцент кафедры АТПП Галеев Э.Р., доцент кафедры АТПП Мерзляков С.А., доцент кафедры АТПП Кириллов Д.А., заведующий лабораториями кафедры АТПП Камалиев Т.С., старший преподаватель кафедры АТПП Мушнин А.В.;
рассмотрела компьютерный тренажер, разработанный по договору № 4600022518 от «16» сентября 2013 г. и установила:

1) тренажер содержит математические модели процессов, средств управления и противоаварийной защиты следующих узлов цеха № 2106:

- компримирование и щелочная очистка пирогаза, отпарка межступенчатого конденсата;
- узел осушки и захлаживания пирогаза;
- узел деметанизации;
- узел деэтанализации;
- узел выделения пропиленовой фракции C₃;
- узел гидрирования этан-этиленовой фракции;
- узел фракционирования этилена;
- узел гидрирования и осушки пропан-пропиленовой фракции;
- узел выделения пропилена;
- пропиленовый холодильный цикл (ПХЦ);

2) на компьютер цеха № 2106 загружен тренажер, содержащий следующий список упражнений:

Пуск узлов цеха	
1.	Подготовка к пуску узла компримирования
2.	Подготовка к пуску узла осушки пирогаза и выделения этилена
3.	Подготовка к пуску узла деметанизации
4.	Подготовка к пуску узла деэтанализации и гидрирования ацетилена
5.	Подготовка к пуску узла выделения фракции C ₃
6.	Подготовка к пуску узла выделения этилена
7.	Подготовка к пуску узла выделения пропилена
8.	Подготовка к пуску узла гидрирования пропандиена
9.	Подготовка к пуску пропиленового холодильного цикла
10.	Пуск узла компримирования
11.	Пуск узла осушки пирогаза и выделения этилена
12.	Пуск узла деметанизации
13.	Пуск узла деэтанализации и гидрирования ацетилена
14.	Пуск узла выделения фракции C ₃
15.	Пуск узла выделения этилена
16.	Пуск узла выделения пропилена
17.	Пуск узла гидрирования пропандиена
18.	Пуск пропиленового холодильного цикла
Останов узлов цеха	
1.	Останов узла компримирования
2.	Останов узла осушки пирогаза и выделения этилена
3.	Останов узла деметанизации
4.	Останов узла деэтанализации и гидрирования ацетилена
5.	Останов узла выделения фракции C ₃
6.	Останов узла выделения этилена

10106

7. Останов узла выделения пропилена
8. Останов узла гидрирования пропадиена
9. Останов пропиленового холодильного цикла
План ликвидации аварийных ситуаций цеха
1. Блок №1. Компримирование и щелочная очистка пирогаза, отпарка межступенчатого конденсата;
2. Блок №2. Узел осушки и захлаживания пирогаза;
3. Блок №3. Узел дегметанизации;
4. Блок №4. Узел дестанизации;
5. Блок №5. Узел выделения пропиленовой фракции C ₃ ;
6. Блок №7. Узел гидрирования этан-этиленовой фракции;
7. Блок №8. Узел фракционирования этилена;
8. Блок №9. Узел гидрирования и осушки пропан-пропиленовой фракции;
9. Блок №11. Узел выделения пропилена;
10. Блок №12. Пропиленовый холодильный цикл (ПХЦ);

3) тренажер введен в эксплуатацию и будет использован для обучения промпersonала цеха № 2106 действиям по нормальной эксплуатации технологического процесса, пуску, плановой, аварийной остановке в типовых и специфических нештатных и аварийных ситуациях.

от Заказчика:

Заместитель главного инженера
по метрологии и АСУ

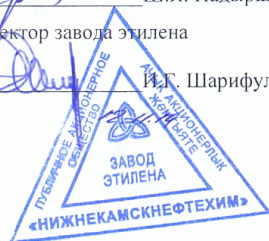

В.В. Левков

Заместитель главного инженера по ПКПБ и ОТ


Ш.Я. Надыршин

Директор завода этилена


И.Г. Шарифуллин



от Исполнителя:

Научный руководитель
заведующий кафедрой АТПП


В.В. Елизаров

Профессор кафедры АТПП


В.И. Елизаров

Доцент кафедры АТПП


Д.В. Елизаров

Доцент кафедры АТПП


Э.Р. Галеев

Доцент кафедры АТПП


С.А. Мерзляков


Доцент кафедры АТПП


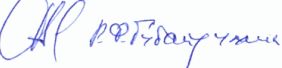

Д.А. Кириллов


Заведующий лабораториями кафедры АТПП



Т.С. Камалиев

Старший преподаватель кафедры АТПП


А.В. Мушинин


Нач. цеха 2106


Нач. бюро МСОБ и ОД


Нач. бюро ПСЛТ




Утверждаю

Первый заместитель генерального
директора – главный инженер
ПАО «Нижнекамскнефтехим»

И.Г. Шарифуллин

«01» сентября 2017 г.

**ввода в эксплуатацию компьютерного тренажера
для приобретения практических навыков безопасного ведения работ,
отработки действий персонала
цехов № 1508, 1530, 1531 завода СК ПАО «Нижнекамскнефтехим»**

Комиссия в составе:

от **Заказчика:** заместитель главного инженера по метрологии и АСУ Левков В.В., заместитель главного инженера по ПКПБ и ОТ Надыршин Ш.Я., директор завода СК Зайцев С.М.;

от **Исполнителя:** научный руководитель, заведующий кафедрой АТПП Елизаров В.В., профессор кафедры АТПП Елизаров В.И., доцент кафедры АТПП Елизаров Д.В., доцент кафедры АТПП Галеев Э.Р., доцент кафедры АТПП Мерзляков С.А., старший преподаватель кафедры АТПП Муцинин А.В., аспирант кафедры АТПП Шавалеев Р.Р.;

рассмотрела компьютерный тренажер, разработанный по договору № 4600030757 от 01.11.2016 г. и установила:

1) *тренажер содержит математические модели процессов, средств управления и противоаварийной защиты следующих узлов цехов № 1508, 1530, 1531:*

1508:

- схема №1 ТР изопрена (блоки №№7,8,9 ПЛА);
- схема №2 ТР СКДН (блок №11 ПЛА);
- схема №4 ТР СКДН (блоки №№ 12,14,15, 16,17,18 ПЛА);
- схема №12 ТР СКДН (блок №28 ПЛА);

1530:

производство СКИ:

- узел азеотропной осушки растворителя (инструкция 1530-Т-7) (блок № 12 ПЛА);
- узел приготовления, азеотропной осушки и захлаживания шихты (инструкция 1530-Т-7) (блок № 13 ПЛА);
- узел очистки ИИФ и приготовления шихты (инструкции 1530-Т-8) (блок №12 ПЛА);
- узел полимеризации изопрена (инструкция 1530-Т-1) (блок №29 ПЛА);
- узел водно-щелочной отмывки, конденсатного хозяйства, приема толуола (инструкция 1530-Т-4) (блоки №№ 8,31 ПЛА);
- узел приготовления каталитического комплекса при температуре минус 70 °С (инструкция 1530-Т-1) (блоки №№ 1,2,3,4,5,6 ПЛА);
- узел ректификации толуольной фракции и выделения осветленного толуола установки ИП-4а (инструкция 1530-Т-12) (блок № 25 ПЛА);
- узел ректификации изопентан-толуольной фракции и азеотропной осушки толуола (инструкция 1530-Т-14) (блоки №№ 23,24 ПЛА);

производство СКД-Л:

- узел очистки растворителя, бутадиена, стирола (схема № 1 инструкции 1530-Т-37) (блок № 4 ПЛА);

– узел азеотропной осушки и ректификации бутадиена-1,3 (схема №2 инструкции 1530-Т-37) (блок №2 ПЛА);

1531:

- схемы из инструкции 1531-Т-1 (Блок №2 ПЛА);
- схема из инструкции 1531-Т-2 (Блок №2 ПЛА);
- схема к инструкции 1531-Т-8 или схема №3 ТР СКИ (Блок №2 ПЛА);
- схема к инструкции 1531-Т-3 или схема №4 ТР СКИ (Блок №29 ПЛА);
- схемы из инструкции 1531-Т-4 приготовления раствора стабилизатора и дозирования каталитического комплекса (Блоки № 1, 5а, 5б, 5 ПЛА);
- схема к инструкции 1531-Т-29 (Блок №1 ПЛА);
- схема к инструкции 1531-СКД-Л-Т-1 (Блок №2 ПЛА);
- схема к инструкции 1531-Т-38 (блок № 3 ПЛА);
- схема из инструкции 1531-СКД-Л-1-Т-2 (Блок №14,15 ПЛА);

2) на компьютер цехов № 1508, 1530, 1531 загружен тренажер, содержащий упражнения по пуску, останову и ПЛА вышеперечисленных узлов и блоков;

3) тренажер введен в эксплуатацию и будет использован для обучения промпersonала цехов № 1508, 1530, 1531 действиям по нормальной эксплуатации технологического процесса, пуску, плановой, аварийной остановке в типовых и специфических нештатных и аварийных ситуациях.

от Заказчика:

Заместитель главного инженера
по метрологии и АСУ

В.В. Левков

Заместитель главного инженера по ПКПБ и ОТ

Ш.Я. Надыршин

Директор завода СК

С.М. Зайцев



от Исполнителя:

Научный руководитель,
заведующий кафедрой АТПП

В.В. Елизаров

Профессор кафедры АТПП

В.И. Елизаров

Доцент кафедры АТПП

Д.В. Елизаров

Доцент кафедры АТПП

Э.Р. Галеев

Доцент кафедры АТПП

С.А. Мерзляков

Старший преподаватель кафедры АТПП

А.В. Муцнин

Аспирант кафедры АТПП

Р.Р. Шавалеев

Утверждаю

Первый заместитель генерального
директора – главный инженер
ПАО «Нижнекамскнефтехим»



И.Г. Шарифуллин
«15» 12 2015 г.

**ввода в эксплуатацию компьютерного тренажера
для приобретения практических навыков безопасного ведения работ,
отработки действий персонала
цеха № 2104 завода Этилен ПАО «Нижнекамскнефтехим»**

Комиссия в составе:

от **Заказчика:** заместитель главного инженера по метрологии и АСУ Левков В.В., заместитель главного инженера по ПКПБ и ОТ Надыршин Ш.Я., директор завода Этилен Яруллин И.М., начальник управления главного прибориста Инешин В.А.;

от **Исполнителя:** научный руководитель, заведующий кафедрой АТПП Елизаров В.В., профессор кафедры АТПП Елизаров В.И., доцент кафедры АТПП Елизаров Д.В., доцент кафедры АТПП Галеев Э.Р., доцент кафедры АТПП Мерзляков С.А., инженер кафедры АТПП Мушнин А.В., аспирант кафедры АТПП Шавалеев Р.Р.;

рассмотрела компьютерный тренажер, разработанный по договору № 4600026709 от 07.05.2015 г. и установила:

1) тренажер содержит математические модели процессов, средств управления и противоаварийной защиты следующих установок цеха № 2104:

- установка пиролиза:
печи пиролиза бензина поз. Е-ВА-103, Е-ВА-109, Е-ВА-114, Е-ВА-115,
печи пиролиза этан-пропана или бутана поз. Е-ВА-121, Е-ВА-122,
печи пиролиза универсальные поз. Е-ВА-110, Е-ВА-112,
печи пиролиза бензина или бутана поз. Е-ВА-118, Е-ВА-119,
узел подготовки сырья и паров,
пароперегреватель поз. Е-ВА-132;
- установка фракционирования:
первичное фракционирование пиролизного газа с регулированием вязкости закалочного масла,
закалка пиролизного газа,
отпарка технологической воды и генерация пара разбавления,
щелочная очистка пирогаза от кислых газов,
ингибирование коррозии и полимеризации в колонне щелочной очистки пирогаза, на узле пара разбавления и узле первичного фракционирования и закалки пирогаза.

2) на компьютер цеха № 2104 загружен тренажер, содержащий следующий список упражнений:

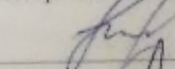
- ПЛА (блок № 1);
- ПЛА (блок № 2);
- ПЛА (блок № 3);

- Узел щелочной очистки пирогаза и получения пара разбавления (подготовка к пуску, пуск, останов);
- Узел фракции С9 (пуск, останов);
- Узел утилизации продувочной воды печей пиролиза (пуск, останов);
- Узел редуциционно-охлаждающих устройств (пуск, останов);
- Узел регулирования вязкости (подготовка к пуску, пуск, останов);
- Узел регулирования вязкости 2 (Е-DA-106) (пуск, останов);
- Узел подготовки сырья (подготовка к пуску, пуск, останов);
- Узел первичного фракционирования и закалки пирогаза (подготовка к пуску, пуск, останов);
- Узел дозировки ингибиторов (пуск, останов);
- Пароперегреватель поз. Е-ВА-132 (сушка, подготовка к пуску, пуск, останов);
- Печь поз. Е-ВА-107 (пуск, останов);
- Печь поз. Е-ВА-111 (пуск, останов);
- Печь поз. Е-ВА-114 (пуск, останов);
- Печь поз. Е-ВА-115 (пуск, останов);
- Печь поз. Е-ВА-118 (пуск, останов);
- Печь поз. Е-ВА-121 (пуск, останов).

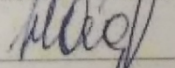
3) тренажер введен в эксплуатацию и будет использован для обучения персонала цеха № 2104 действиям по нормальной эксплуатации технологического процесса, пуску, плановой, аварийной остановке в типовых и специфических нештатных и аварийных ситуациях.

от Заказчика:

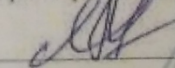
Заместитель главного инженера по метрологии и АСУ

 В.В. Левков

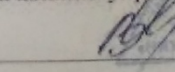
Заместитель главного инженера по ПКПБ и ОТ

 Ш.Я. Надыршин

Директор завода Этилен

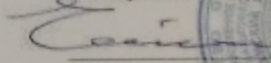
 И.М. Яруллин

Начальник управления главного прибориста

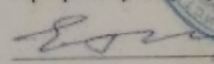
 В.А. Иншин

от Исполнителя:

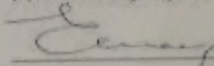
Научный руководитель, заведующий кафедрой АТПП

 В.В. Елизаров

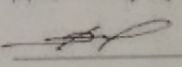
Профессор кафедры АТПП

 В.В. Елизаров

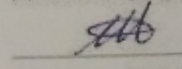
Доцент кафедры АТПП

 Д.В. Елизаров

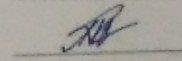
Доцент кафедры АТПП

 Э.Р. Галеев

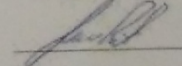
Доцент кафедры АТПП

 С.А. Мерзляков

Инженер кафедры АТПП

 А.В. Мушников

Аспирант кафедры АТПП

 Р.Р. Шавалески

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2012619374

«Компьютерный тренажерный комплекс по обучению операторов цеха углеводородного сырья»

Правообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (RU)*

Автор(ы): *Елизаров Виктор Иванович, Елизаров Виталий Викторович, Елизаров Дмитрий Викторович, Долганов Андрей Викторович, Галеев Эльдар Рафаилович, Мушнин Алексей Викторович, Камалиев Тимур Сайфутдинович, Мерзляков Сергей Александрович, Валеев Ильвир Миназалиевич, Смолин Николай Геннадьевич (RU)*

Заявка № 2012615831

Дата поступления 11 июля 2012 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
16 октября 2012 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2012619375

**«Конструктор для моделирования пуска, останова
и аварийных ситуаций на предприятиях химии и нефтехимии»**

Правообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (RU)*

Автор(ы): *Елизаров Виктор Иванович, Елизаров Виталий Викторович, Елизаров Дмитрий Викторович, Долганов Андрей Викторович, Галеев Эльдар Рафаилович, Муцнин Алексей Викторович, Камалиев Тимур Сайфутдинович, Мерзляков Сергей Александрович, Валеев Ильвир Миназалеви, Смолин Николай Геннадьевич (RU)*

Заявка № 2012615832

Дата поступления 11 июля 2012 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
16 октября 2012 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2012619651

**«Программный комплекс автоматизированного проектирования
массообменных и реакционных аппаратов, инвариантных
к внешним сырьевым источникам»**

Правообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Казанский национальный исследовательский
технологический университет» (RU)*

Автор(ы): *Галеев Эльдар Рафаилович,
Елизаров Виталий Викторович, Елизаров Дмитрий Викторович,
Мушнин Алексей Викторович (RU)*

Заявка № 2012616662

Дата поступления 6 августа 2012 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
25 октября 2012 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Симонов', is written over a horizontal line.

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013618497

«Программная среда для разработки распределенных компьютерных тренажеров взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2013616615

Дата поступления 26 июля 2013 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 сентября 2013 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'B.P. Simonov'.

Б.П. Симонов

Авторы: *Елизаров Виктор Иванович (RU), Елизаров Виталий Викторович (RU), Елизаров Дмитрий Викторович (RU), Долганов Андрей Викторович (RU), Галеев Эльдар Рафаилович (RU), Муццинин Алексей Викторович (RU), Камалиев Тимур Сайфутдинович (RU), Мерзляков Сергей Александрович (RU), Валеев Ильвир Миназалевиич (RU), Смолин Николай Геннадьевич (RU)*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013618498

**«Распределенный компьютерный тренажерный комплекс
цеха выделения бутадиена из пиролизной фракции
углеводородов С4 завода Этилен»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Казанский национальный исследовательский
технологический университет» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2013616623

Дата поступления 26 июля 2013 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 сентября 2013 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Б.П. Симонов



Авторы: *Елизаров Виктор Иванович (RU), Елизаров Виталий Викторович (RU), Елизаров Дмитрий Викторович (RU), Долганов Андрей Викторович (RU), Галеев Эльдар Рафаилович (RU), Муццинин Алексей Викторович (RU), Камалиев Тимур Сайфутдинович (RU), Мерзляков Сергей Александрович (RU), Валеев Ильвир Миназалевиич (RU), Смолин Николай Геннадьевич (RU)*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013618499

«Распределенный компьютерный тренажерный комплекс
цеха углеводородного сырья производств дивинила и
бутилкаучука»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Казанский национальный исследовательский
технологический университет» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2013616627

Дата поступления 26 июля 2013 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 сентября 2013 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Б.П. Симонов



Авторы: *Елизаров Виктор Иванович (RU), Елизаров Виталий Викторович (RU), Елизаров Дмитрий Викторович (RU), Долганов Андрей Викторович (RU), Галеев Эльдар Рафаилович (RU), Муццинин Алексей Викторович (RU), Камалиев Тимур Сайфутдинович (RU), Мерзляков Сергей Александрович (RU), Валеев Ильвир Миназалевиич (RU), Смолин Николай Геннадьевич (RU)*



ТАТАРСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ МИНИСТРЛАР КАБИНЕТЫ
«ТАТАРСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ИНВЕСТИЦИЯ-ВЕНЧУР ФОНДЫ»
КОММЕРЦИЯГӘ КАРАМАГАН ДӘУЛӘТ БӨШМӘСЫ
ТАТАРСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ФӘННӘР АКАДЕМИЯСЕ

КАБИНЕТ МИНИСТРОВ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
ГОСУДАРСТВЕННАЯ НЕКОММЕРЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
«ИНВЕСТИЦИОННО-ВЕНЧУРНЫЙ ФОНД РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН»
АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
ОАО «РОССИЙСКАЯ ВЕНЧУРНАЯ КОМПАНИЯ»

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
ОАО «ТАТНЕФТЕХИМИНВЕСТ-ХОЛДИНГ»
ОАО «СВЯЗЬИНВЕСТНЕФТЕХИМ»
ЗАО ГКБ «АВТОГРАДБАНК»
ОАО «АК БАРС БАНК»
ТЕХНОПАРК «ИДЕЯ»
ОАО «РОСНАНО»

ОБЩЕСТВО ИЗОБРЕТАТЕЛЕЙ И РАЦИОНАЛИЗАТОРОВ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
ТОРГОВО - ПРОМЫШЛЕННАЯ ПАЛАТА РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
АССОЦИАЦИЯ ИННОВАЦИОННЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ



ДИПЛОМ

50 ЛУЧШИХ ИННОВАЦИОННЫХ ИДЕЙ ДЛЯ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
НОМИНАЦИЯ
«СОТРУДНИЧЕСТВО»

НАГРАЖДАЕТСЯ

Мушнин Алексей Викторович

ПО ПРОЕКТУ

Разработка тренажерного комплекса для приобретения практических навыков
безопасного ведения работ сотрудниками предприятий химического, нефтехимического и
нефтеперерабатывающего комплексов

Премьер-министр
Республики Татарстан,
Председатель Попечительского совета
Инвестиционно-венчурного фонда
Республики Татарстан

И.Ш. Халиков

КАЗАНЬ 2012