

На правах рукописи



Писарев Михаил Олегович

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ В
АППАРАТАХ УСТАНОВКИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕПАРАЦИИ ГАЗА
В ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

05.17.08 - Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном
учреждении высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Ивашкина Елена доктор технических наук, доцент
Николаевна

Официальные оппоненты: Асламова Вера Сергеевна
доктор технических наук, профессор, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования «Иркутский государственный
университет путей сообщения» (г.Иркутск),
профессор кафедры «Техносферная безопасность»

Титов Анатолий Геннадьевич
кандидат технических наук, Федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования Уральский
федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина»
(г. Екатеринбург), Старший преподаватель кафедры
«Машины и аппараты химических производств»

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Томский
научно-исследовательский и проектный институт
нефти и газа» (ОАО «ТомскНИПИнефть»)

Защита диссертации состоится «20» декабря 2016 г. в 14 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.269.08 при ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050,
Томск, пр. Ленина, 43, корпус 2, 117 ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический
университет» и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/915/worklist>.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета Д 212.269.08
профессор, д.ф.-м.н.



Ильин А.П.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Наиболее распространённой и востребованной технологией подготовки газа и газового конденсата в России является процесс низкотемпературной сепарации. В настоящее время для прогнозирования работы аппаратов химико-технологических процессов, в том числе в рамках проектирования установок, применяются моделирующие системы, описывающие стационарные режимы их работы. Это позволяет произвести подбор оборудования и оптимизировать технологический режим его работы. Но не позволяют прогнозировать поведение системы в динамических условиях. В частности, наиболее распространённым примером такого воздействия является резкое кратковременное изменение состава сырья, поступающего на вход установки комплексной подготовки газа.

Прогнозирование отклонений в работе установки, установление их величины и определение мер оперативного регулирования параметров технологического процесса, с целью поддержания режимов работы аппаратов технологической схемы в заданных границах, обеспечивает стабильное поведение системы, устойчивое к колебаниям, вызванным внешними факторами или нештатными отклонениями в работе элементов системы, а также безопасный переход из одного стационарного режима работы на другой. Использование стационарных математических моделей не позволяет описать физико-химические процессы, происходящие в динамических условиях работы аппаратов, возникающие в результате инерционных переходных процессов в сопряженных элементах химико-технологической системы.

Решение задачи повышения устойчивости системы при динамических воздействиях и сокращения времени планового изменения режима работы позволяет предотвратить отклонение параметров продукта (осушенного газа) от требований стандарта и предотвратить последствия не регламентной работы. Данная задача решается путем оптимизации процесса разделения углеводородов в аппаратах низкотемпературной сепарации газа в динамических условиях, основываясь на оценке различных вариантов работы действующей промышленной установки с использованием имитационной динамической модели, учитывающей закономерности фазовых превращений углеводородных систем, базирующиеся на химии слабых взаимодействий, и процессов теплопередачи.

При отсутствии корректирующих воздействий, компенсирующих эффекты динамических процессов, происходят негативные изменения параметров работы установки и составов и параметров осушенного газа и конденсата. Потери от снижения добычи конденсата в денежном выражении в годовом выражении чистого дохода за счет не учета динамических явлений в работе установки при переходе между режимами оцениваются в 1 млн. руб. при консервативном варианте расчета потерь. В натуральном выражении недополучение конденсата оценивается в 3–4 тыс. т в год. Потери, связанные с

избыточным пропуском средств очистки и диагностики оцениваются в годовом выражении в сумму 4 млн. руб.

Работа по установлению параметров работы установки при помощи динамической модели, учитывающей закономерности фазовых превращений углеводородных систем, базирующиеся на химии слабых взаимодействий, и процессов теплопередачи, является актуальной.

Имитационная динамическая модель может быть использована для отработки действий технологического персонала в случае возникновения аварийных ситуаций, разработки способов их предотвращения и нивелирования возможных негативных последствий на действующих установках комплексной подготовки газа (УКПГ) и деэтанзации и стабилизации газового конденсата (УДСК).

Работа в области построения имитационной динамической модели процесса низкотемпературной сепарации газа, пригодной для оптимизации работы действующих промышленных установок подготовки газа и газового конденсата и входящих в них аппаратов, является актуальной.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации (регистрационный номер СП-477.2015.1, 2015-2017 гг.).

Степень разработанности темы

В настоящее время процессы подготовки газа и газового конденсата достаточно хорошо изучены. Значительный вклад в технологическое совершенствование процессов подготовки газа внесли Г.А. Ланчаков (изучение процессов сбора и подготовки газа на поздних стадиях разработки газовых месторождений, оптимизация системы подготовки с целью снижения затрат и продление времени разработки месторождений), Г.К. Зиберт (оптимизация схемы построения системы низкотемпературной сепарации газа с целью повышения КПД процесса за счет рекуперации и использования промежуточных и конечных продуктов в качестве абсорбентов), А.И. Скобло (исследования в области массообменных устройств, гидродинамики и теплообмена в газовых средах) и др.

В работах представителей научной школы проф. Кравцова А.В. в Томском политехническом университете по математическому моделированию процессов подготовки и переработки углеводородного сырья Ушевой Н.В., Барамыгиной Н.А., Масловым А.С. и др. рассматриваются стационарные математические модели процессов подготовки газа и газового конденсата, позволяющие определять оптимальные режимы работы установок подготовки и транспорта газа. Представителями научной школы проф. Бахтизина Р.Н. в Уфимском государственном нефтяном технологическом университете по математическому моделированию процессов нефтегазодобычи построены математические модели релаксационных тепловых процессов при наличии фазовых переходов в таких системах. При этом, процессы откликов на динамические воздействия переходов между стационарными режимами исследованы не достаточно.

Объект исследования: технология и аппаратное оформление установки комплексной подготовки газа на основе процесса низкотемпературной сепарации.

Предмет исследования: процессы сепарационного разделения многокомпонентных смесей при низких температурах, протекающие в промышленных аппаратах технологической схемы установки комплексной подготовки газа.

Целью работы является создание условий эффективного процесса разделения углеводородов в аппаратах установки комплексной подготовки газа с уменьшением содержания тяжелых углеводородов C_{5+} и сохранением точки росы по воде и углеводородам путем повышения стабильности работы при возникновении переходных режимов с применением имитационной динамической модели, учитывающей закономерности фазовых превращений углеводородных систем, базирующиеся на химии слабых взаимодействий, и процессов теплопередачи.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследование процесса низкотемпературной сепарации газа и установление закономерностей изменения параметров фазового равновесия, связанных с установлением термобарических условий и расходов жидкостей и газа, и их влияния на переходные режимы работы аппаратов в динамических условиях. Определение унифицированной структуры технологической схемы процесса низкотемпературной сепарации газа, а также состава аппаратов, требующих создания математических моделей для полного описания работы установки.

2. Расчет физических свойств (вязкость, плотность, теплоемкость и теплопроводность) смесей на входе в аппараты (сепараторы, разделители жидкости, теплообменники, воздушные холодильники, компрессоры и эжекторы). Определение термодинамических параметров процессов, протекающих в аппаратах технологической установки низкотемпературной сепарации (энтальпия, константа фазового равновесия, давления насыщенных паров), включая определение кривых конденсации и парообразования.

3. Построение имитационной динамической модели процесса низкотемпературной сепарации газа, основанной на математических моделях отдельных аппаратов и установленных связях между ними. Проверка программно-реализованной имитационной динамической модели на адекватность отображения реальных процессов, протекающих в действующих аппаратах технологической схемы установки низкотемпературной сепарации газа в стационарных и динамических условиях.

4. Разработка технических решений, направленных на повышение стабильности работы установки низкотемпературной сепарации газа при возникновении переходных режимов с целью поддержания степени осушки газа и уменьшения отклонения от требуемых показателей качества продукции с применением имитационной динамической модели.

Научная новизна

1. Установлено, что в динамических условиях давление и температура химико-технологической системы, расход и состав углеводородных потоков изменяются нелинейно под действием инерционных процессов и обратных связей при переходе в устойчивое состояние.

2. Установлено, что унос одной фазы с другой в аппаратах низкотемпературной сепарации газа определяется условиями достижения парожидкостного равновесия, типом и конструкцией аппаратов и характеризуется коэффициентами уноса в уравнениях материальных балансов аппаратов, учитывающих закономерности фазовых превращений углеводородных систем, базирующихся на химии слабых взаимодействий. Так, при увеличении температуры поступающего сырья на первой ступени сепарации на 5°C при неизменных управляющих параметрах установки расход осушенного газа возрастает на 2,5 % за счет увеличения содержания тяжелых углеводородов C_{5+} , что влечет увеличение точки росы осушенного газа по углеводородам. Кроме того, константа фазового равновесия для метана при изменении давления от 63,4 атм до 64,3 атм и сопутствующем изменении температуры от -11,0 °C до -10,3 °C в пределах от 0,659 до 0,654.

3. Установлено, что влияние на точку росы осушенного газа резкого повышения содержания жидких углеводородов (с 1-5% до 70-80% объема углеводородной смеси) на входе в установку низкотемпературной сепарации газа снижается при снижении расхода осушенного газа и повышении давления в сепараторе. Это позволяет достичь снижения эффекта изменения точки росы осушенного газа на 55-60% от величины отклонения без корректирующих воздействий.

Теоретическая значимость работы заключается в получении новых научных знаний о термодинамических условиях (температуры, давления, расхода углеводородной смеси, констант фазового равновесия) процессов сепарационного разделения углеводородов и расширении представлений о парожидкостном равновесии в динамических условиях.

Практическая значимость

1. Разработаны математические модели теплообменного, сепарационного, эжекционного оборудования и регулирующей арматуры технологической установки низкотемпературной сепарации газа, реализованные в виде прикладной программы, пригодной для проведения численных исследований, прогнозных и оптимизационных расчетов (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2015663023).

2. На основе использования детализированных математических моделей аппаратов разработана и внедрена методика расчета технологических параметров установки низкотемпературной сепарации газа, которая позволяет в режиме реального времени с учетом взаимного влияния режимов работы аппаратов прогнозировать изменение температуры, давления и расходов

углеводородных потоков и отслеживать переходные процессы при внесении внешних возмущений, а также предсказывать изменение товарных свойств газа на выходе. Определено, что скорость изменения режима работы значительным образом влияет на отклонение параметров осушенного газа от нормативного значения. При изменении степени открытия регулирующего клапана по газу на первой ступени сепарации (с 28% до 10 % за 40 секунд) точка росы по углеводородам изменяется от нормативного значения $-10,5^{\circ}\text{C}$ до $-9,5^{\circ}\text{C}$ и возвращается в исходное состояние за время около 2 часов работы установки. Предложена допустимая скорость изменения режима работы установки, позволяющая предотвратить отклонения параметров осушенного газа от требований СТО Газпром 089-2010.

Разработана имитационная динамическая модель процесса низкотемпературной сепарации газа, пригодная для проведения численных исследований динамических изменений в работе установок при смене значений управляющих параметров. Имитационная динамическая модель процесса низкотемпературной сепарации газа позволяет оценивать время достижения нового установившегося режима, учитывать все сопутствующие колебания параметров работы аппаратов, входящих в состав промышленной установки. Даны рекомендации работы установки с наиболее эффективным разделением углеводородной смеси, прошедшие апробацию в ОАО «Востокгазпром»..

3. Разработанная имитационная динамическая модель может быть широко использована при выполнении исследований работоспособности и безопасности технологических установок в рамках методик HAZID (Hazard Identification Studies – идентификация опасностей) и HAZOP (Hazard and Operability Study – анализ опасности и работоспособности).

На основе имитационной динамической модели процесса низкотемпературной сепарации газа разработан компьютерный тренажер, позволяющий повысить квалификацию инженерно-технического персонала промышленной установки в области управления установкой и реагирования на нештатные ситуации для предотвращения аварийных ситуаций и поддержания требуемых параметров продуктов, который может быть использован в образовательном процессе в высших учебных заведениях. Акт об использовании результатов работы в образовательный процесс в Национальном исследовательском Томском политехническом университете прилагается.

Методология работы

Определение состава исходного сырья. Исследование влияния динамических условий на эффективности разделение углеводородной смеси в аппаратах установки низкотемпературной сепарации.

Проведение исследований базировалось на стратегии системного анализа и использовании метода математического моделирования процессов тепло- и массообмена. Моделирование сепарационных процессов в аппаратах химико-технологической системы основывалось на индивидуальных свойствах компонентов и условиях парожидкостного равновесия.

Моделирование процессов подготовки газа и газового конденсата осуществлялось на основе иерархического подхода с описанием количественных закономерностей процессов в реальных условиях.

Методы диссертационного исследования

Моделирование процесса низкотемпературной сепарации газа основывалось на описании поведения системы с использованием законов Дж. Дальтона, Ф. М. Рауля и Коновалова Д. П.

Константы фазового равновесия рассчитывались на основе применения методики Шилова В. И. и уравнения состояния Soave-Redlich-Kwong (SRK) для углеводородов и уравнения состояния Тека-Стила для полярных веществ.

Теплопередача в моделируемых аппаратах рассчитывалась с использованием основного уравнения теплопередачи. Скорость осаждения (всплытия) капель дисперсной фазы в сплошной среде для ламинарного режима течения оценивалась с использованием закона Дж. Стокса.

Состав сырья и продуктов установки комплексной подготовки газа определялся методом газовой хроматографии.

Положения, выносимые на защиту:

1. Положение о многофакторном нелинейном изменении параметров химико-технологической системы под действием инерционных процессов и обратных связей в процессе низкотемпературной сепарации газа при внесении управляющих воздействий и последующем переходе системы в устойчивое состояние.

2. Положение о снижении влияния переходных процессов на качество осушки газа путем создания условий эффективного процесса разделения углеводородов для уменьшения содержания тяжелых компонентов C_{5+} в осушенном газе при разделении углеводородов в аппаратах низкотемпературной сепарации.

Достоверность результатов работы

Достоверность полученных результатов, выводов и разработанных рекомендаций основывается на высокой степени надежности применяемых методик расчета физических свойств (вязкость, плотность, теплоемкость и теплопроводность) компонентов, входящих в состав смеси на входе в аппараты (сепараторы, разделители жидкости, теплообменники, воздушные холодильники, компрессоры и эжекторы) и термодинамических параметров процессов, протекающих в аппаратах технологической установки низкотемпературной сепарации газа, а также адекватности разработанной имитационной динамической модели реальным данным с УКПГ Мыльджинского газоконденсатного месторождения. Оценка адекватности проводилась по результатам хроматографических исследований проб газа, отобранных после аппаратов С1, С2, С3, РЖ-1 и РЖ-2 в десяти различных

временных моментах путем сравнения с результатами расчетов модели при задании соответствующих режимов.

Личный вклад

Состоит в сборе и анализе экспериментальных данных по процессам осушки природного газа и подготовки к транспорту, в разработке алгоритмов расчета параметров работы оборудования при динамических изменениях управляющих параметров на основе нестационарных моделей элементов химико-технологической системы, выполнении оптимизации показателей работы установки подготовки газа и газового конденсата посредством исследований на имитационной динамической модели процесса низкотемпературной сепарации газа, созданной на базе математических моделей аппаратов технологической системы подготовки газа и газового конденсата. Результаты исследований являются оригинальными и получены лично соискателем, или при его непосредственном участии.

Апробация работы

Основные результаты работы доложены и обсуждены Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РФ, профессора А.В. Кравцова (г. Томск, 2013); научно-практической конференции STT (г.Томск, 2011), XV Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулёва (г. Томск, 2014); Международной научно-практической конференции «Нефтегазопереработка-2014» (г. Уфа, 2014); Международном симпозиуме имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященном 115-летию со дня рождения академика Академии наук СССР, профессора К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения члена-корреспондента Академии наук СССР, профессора Ф.Н. Шахова (г.Томск, 2014); Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г.Томск, 2014); Международной научно-методической конференции «Современное образование: практико-ориентированные технологии подготовки инженерных кадров» (г.Томск, 2015); XX Международном научном симпозиуме студентов и молодых ученых имени академика М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», посвященном 120-летию со дня основания Томского политехнического университета(г.Томск, 2016); XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке» имени профессора Л.П. Кулёва, посвященной 120-летию Томского политехнического университета (г. Томск, 2016).

Публикации. По теме работы опубликовано 16 работ, в том числе 5 статей в журналах из списка ВАК, 2 из которых опубликованы в изданиях, индексируемых Scopus, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, отражена практическая значимость и научная новизна полученных результатов.

В первой главе содержится аналитический обзор современных технологий подготовки и разделения углеводородного газа и газового конденсата. Описаны современные требования к подготовленному природному углеводородному газу. Приведен анализ публикаций представителей научных школ Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина, а также Томского политехнического университета о современных моделирующих системах процессов химической технологии нефти и газа. Рассмотрены достигнутые результаты в области моделирования массообменных процессов разделения многокомпонентных систем на примере процессов сепарации углеводородного сырья, ректификации и разделения углеводородных систем в химической технологии.

На современных предприятиях подготовки природного углеводородного сырья используются программные средства моделирования химико-технологических процессов Simulation Sciences, Aspen Technologies и Huprotech, которые позволяют моделировать почти все химические и нефтехимические процессы. Однако в настоящее время не существует отечественной имитационной динамической модели, описывающей процессы подготовки газа и газового конденсата, позволяющей прогнозировать работу системы при переходе из одного стационарного режима в другой, максимально адаптированной к условиям реально действующих установок и воспроизводящей отклики на любые воздействия, в том числе нештатные ситуации.

На основе проведенного анализа литературных данных сформулирована цель и задачи работы.

Вторая глава описывает исходные составы, технологическую схему, методологии и методы исследования процесса подготовки газа и газового конденсата, описанию принципов и режимов работы установки низкотемпературной сепарации (НТС) газа.

Процесс сепарации проводится при пониженных температурах и повышенных давлениях для получения газа необходимого состава за счет отделения тяжелых углеводородов. Эффективность процесса сепарации обеспечивается достижением условий фазового равновесия системы газ-жидкость, которое в свою очередь зависит от температуры, давления и состава газа.

Система подготовки газа, реализующая технологию НТС, предназначена для получения осушенного газа в соответствии с требуемыми техническими условиями. Низкая температура газа достигается посредством использования дроссельного клапана и тепловой рекуперации холодных потоков. Подготовленный газ направляется на узел замера и далее в трубопровод товарного газа (рис. 1).

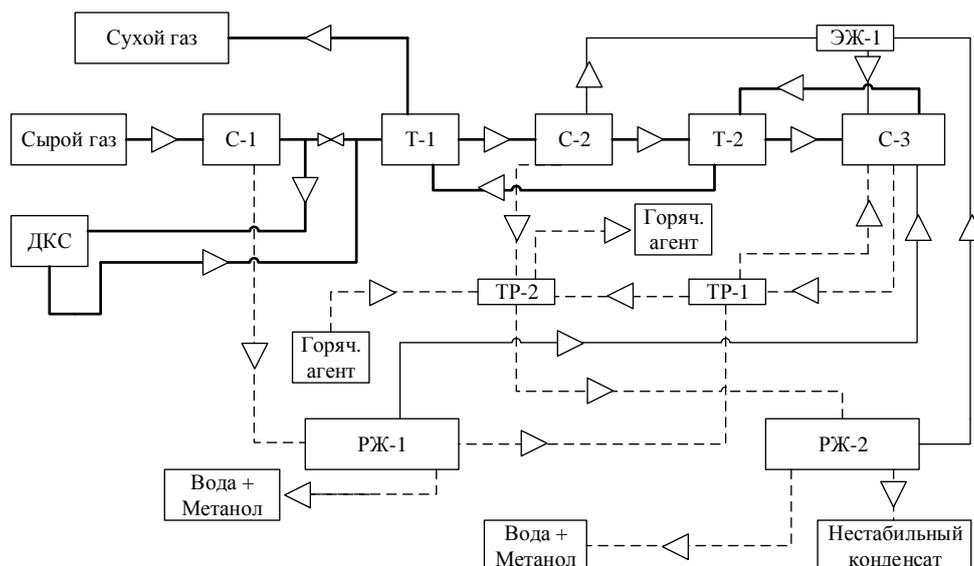


Рисунок 1. Структурная схема основных потоков технологического модуля
 С-1, С-2, С-3 – сепараторы; Т-1, Т-2, ТР-1, ТР-2 – кожухотрубчатые теплообменники;
 РЖ-1, РЖ-2 – разделители жидкости; ЭЖ-1 – эжектор; ДКС – дожимная компрессорная станция;
 — линия движения основного потока газа;
 - - - линия движения неосновных потоков газа;
 ····· линия движения потока жидкости.

Основным оборудованием в процессе низкотемпературной сепарации газа являются сепараторы, теплообменники, разделители жидкости, эжекторы.

Компрессор используется при чрезмерном снижении пластового давления и невозможности обеспечения достаточного перепада давления на дросселирующем устройстве с достижением заданной температуры в низкотемпературном сепараторе. В рамках текущего исследования рассматривается схема без дополнительного компримирования.

Рабочий диапазон давлений в технологической схеме составляет от 2,50 до 7,35 МПа, температура изменяется в пределах от минус 45 до плюс 30 °С, количество поступающего сырья на установку изменяется от 60 до 210 нм³/ч.

В данном случае в технологической схеме последовательно установлено три ступени сепарации: на первой ступени давление сырья составляет в интервале от 6,0 до 7,0 МПа, температура от 5 до 25 °С, далее после прохождения через теплообменник, а также через регулирующий клапан во второй ступени сепарации наблюдается уменьшение температуры от минус 10 до плюс 3 °С. На третьей ступени сепарации наблюдается снижение температуры от минус 35 до минус 30 °С и давления от 3,7 до 5,5 МПа. В каждом сепараторе происходит конденсация жидкости с последующим отделением, причем наибольшее количество отводится из газового потока на первой ступени. Состав газа на входе в сепаратор первой ступени сепарации представлен в таблице 1.

Температура газа на входе принимается равной 15 °С, давление 7,1 МПа. Расход газа на входе в аппарат 4480 т/сут. Расход сухого газа 4390 т/сут. Расход метанольной воды 9 т/сут. Расход неустойчивого конденсата на установку деэтанализации и стабилизации 81 т/сут.

Таблица 1. Состав газа на входе в сепаратор первой ступени сепарации

Компонент	Газоконденсатная смесь	Максимальные отклонения	
	Массовая концентрация, % мас.	Массовая концентрация, % мас. (сухой газ)	Массовая концентрация, % мас. (конденсат)
CO ₂	0,539	0,55	0,17
N ₂	2,645	2,74	0,09
CH ₄	84,809	87,47	10,12
C ₂ H ₆	3,809	3,86	2,37
C ₃ H ₈	2,526	2,44	5,00
iC ₄ H ₁₀	0,776	0,69	3,26
C ₄ H ₁₀	1,016	0,85	5,73
iC ₅ H ₁₂	0,409	0,27	4,20
C ₅ H ₁₂	0,419	0,25	5,20
C ₆₊	2,705	0,88	54,04
H ₂ O	0,317	0,00	9,14
CH ₃ OH	0,024	0,00	0,67

Математические модели процессов испарения и конденсации построены на базе принципов химии слабых взаимодействий. Учтены дипольные взаимодействия (энергия Кeesома), индукционные взаимодействия (энергия Дебая) и дисперсионные взаимодействия (энергия Лондона).

Энергия дипольного взаимодействия определяется соотношением:

$$E_K = -2 \mu_1 \mu_2 / 4\pi \epsilon_0 r^3 \quad (1)$$

где μ_1 и μ_2 - дипольные моменты взаимодействующих диполей, r - расстояние между ними.

Энергия индукционного взаимодействия определяется соотношением:

$$E_D = -2 \mu_{\text{нав}}^2 \gamma / r^6 \quad (2)$$

где $\mu_{\text{нав}}$ - момент наведенного диполя.

Энергия дисперсионного взаимодействия определяется соотношением:

$$E_L = -2 \mu_{\text{мгн}}^2 \gamma^2 / r^6, \quad (3)$$

где $\mu_{\text{мгн}}$ - момент мгновенного диполя.

Суммарно, энергия межмолекулярного взаимодействия находится в диапазоне 8-16 кДж/моль.

На базе детализированных математических моделей элементов химико-технологической системы подготовки газа и газового конденсата (теплообменного, сепарационного, эжекторного оборудования, разделителей жидкости, регулирующих клапанов), составленных с учетом физико-химических закономерностей протекающих процессов и конструктивных особенностей аппаратов строится имитационная динамическая модель, описывающая в режиме реального времени поведение установки при возникновении внешних или управляющих воздействий. Данная модель используется для проведения численных исследований.

В третьей главе рассматриваются теоретические основы разработки математических моделей основных аппаратов, входящих в технологическую схему установки низкотемпературной сепарации газа и последующей

разработке имитационной динамической модели процесса НТС, анализу работы промышленной установки подготовки газа и описанию алгоритмов расчета.

Влияние конструкции аппаратов на процесс разделения оценено с использованием коэффициентов уноса. Для определения значений коэффициентов уноса произведено первоначальное приближение с помощью закона распределения по Слетчеру капель дисперсионной среды в сплошной (конденсата и воды в газе, капель воды в конденсате, капель конденсата в воде), а также время удержания и скорость осаждения капель по закону Стокса. Далее установлено остаточное содержание дисперсионной среды в сплошной.

Установлено, что скорость накопления вещества в аппарате можно представить в виде следующего дифференциального уравнения:

$$\frac{dN_{ij}}{dt} = \sum_k^{ex} F_{ij}^k - \sum_k^{вых} F_{ij}^k, \quad (4)$$

Начальные условия: при $t = 0, N_{ij} = N_{ij}^0$;

где N_{ij} – количество j -го вещества в i -ом аппарате, моль; $F_{ij}^{ex k}$ – k -ый расход j -го вещества на входе в i -ый аппарат, моль/с; $F_{ij}^{вых k}$ – k -ый расход j -го вещества на выходе из i -го аппарата, моль/с.

Уравнение материального баланса дополнено уравнением теплового баланса в нестационарной форме:

$$\frac{dQ_{ij}}{dt} = \sum_k^{ex} F_{ij}^k \cdot H_{ij}^{T^{ex}} - \sum_k^{вых} F_{ij}^k \cdot H_{ij}^{T^{вых}} + \Delta Q_{ij}^*, \quad (5)$$

Начальные условия: при $t = 0, Q_{ij} = Q_{ij}^0$;

где Q_{ij} – количество тепла j -го вещества в i -ом аппарате, Дж; $H_{ij}^{T^{ex}}$ – энтальпия j -го вещества в i -ом аппарате при входной температуре, Дж/моль; $H_{ij}^{T^{вых}}$ – энтальпия j -го вещества в i -ом аппарате при выходной температуре, Дж/моль; ΔQ_{ij}^* – энергия, принимаемая j -ым веществом в i -ом аппарате, Дж/с.

Показано, что для моделирования химико-технологической системы, состоящей из множества элементов, взаимно влияющих друг на друга, необходимо установить характер связи между аппаратами, которые могут быть описаны системой уравнений:

$$\begin{cases} F_{ij}^{ex k} = f(F_{mj}^{n}) \\ F_{ij}^{ex k} \cdot H_{ij}^{T^{ex}} = \lambda(F_{mj}^{n} \cdot H_{mj}^{T^{вых}}) \end{cases}, \quad (6)$$

где F_{mj}^{n} – n -ый расход j -го вещества на входе в m -ый аппарат, моль/с; $F_{mj}^{вых n}$ – n -ый расход j -го вещества на выходе из m -го аппарата, моль/с; $H_{mj}^{T^{ex}}$ – энтальпия j -го вещества в m -ом аппарате при входной температуре, Дж/моль; $H_{mj}^{T^{вых}}$ – энтальпия j -го вещества в m -ом аппарате при выходной температуре, Дж/моль.

Вид функциональной зависимости материальных и тепловых потоков зависит от типа и конструкции оборудования.

Объединением выражений (5) и (6) получена динамическая математическая модель процесса низкотемпературной сепарации газа, которая представляет собой систему дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \frac{dN_{ij}}{dt} = \sum_k^{ex} F_{ij}^k - \sum_k^{бых} F_{ij}^k \\ \frac{dQ_{ij}}{dt} = \sum_k^{ex} F_{ij}^k \cdot H_{ij}^{T^{ex}} - \sum_k^{бых} F_{ij}^k \cdot H_{ij}^{T^{бых}} \pm \Delta Q_{ij}^* \\ {}^{ex} F_{ij}^k = f({}^{бых} F_{mj}^n) \\ {}^{ex} F_{ij}^k \cdot H_{ij}^{T^{ex}} = f({}^{бых} F_{mj}^n \cdot H_{mj}^{T^{бых}}) \end{cases} \quad (7)$$

Начальные условия: $t = 0, N_{ij} = N_{ij}^0, Q_{ij} = Q_{ij}^0$.

Для решения данной системы дифференциальных уравнений использован метод Эйлера.

Моделирование процесса низкотемпературной сепарации газа основывалось на описании поведения системы с использованием законов Дж. Дальтона, Ф. М.Рауля и Коновалова Д.П.

При составлении детализированной модели газового сепаратора и разделителя жидкости учитывались законы фазового равновесия. Константы фазового равновесия рассчитывались на основе применения методики Шилова В.И. и уравнения состояния Soave-Redlich-Kwong (SRK) для углеводородов и уравнения состояния Тека-Стила для полярных веществ. Мольная доля отгона газа определялась итерационным способом.

Зависимость количества капель от их размера рассчитывается по уравнению Слетчера, что в свою очередь, позволяет определить скорость осаждения (всплытия) капель дисперсной фазы в сплошной среде для ламинарного режима течения в трехфазных сепараторах по закону Дж. Стокса. Затем коэффициенты уноса корректировались в зависимости от экспериментальных данных конкретных аппаратов, что позволило увеличить достоверность результатов расчета фазового равновесия.

Теплопередача в моделируемых аппаратах рассчитывалась с использованием основного уравнения теплопередачи и полиномиальной зависимости теплоемкости веществ от температуры.

Материальные потоки рассчитывались с использованием уравнения расходной характеристики клапана от разности давлений и процента открытия клапана. Гидравлическое сопротивление труб и элементов системы рассчитывалось по уравнению Бернулли. Для определения степени снижения температуры на эжекторах и регулирующей арматуре вследствие дроссельного эффекта применялось уравнение расчета коэффициента Джоуля-Томсона.

Для создания имитационной динамической модели, прогнозирующей работу оборудования в динамических условиях, учтены изменения основных рабочих параметров во времени в зависимости от основных регулирующих параметров (степень открытия клапанов, изменение состава подаваемого сырья), накопление сырья в аппаратах. Граничные условия (температура,

давление и расход смеси) и допустимый диапазон изменений параметров работы имитационной математической модели определены на основании граничных допустимых значений достоверности базовых уравнений и проведенных исследований, и составляют: температура – от 35 до -70°C , давление – от 2,0 МПа до 8,5 Мпа, расход – от 1000 т/сут до 5500 т/сут – что включает в себя диапазон работы исследуемой установки подготовки газа.

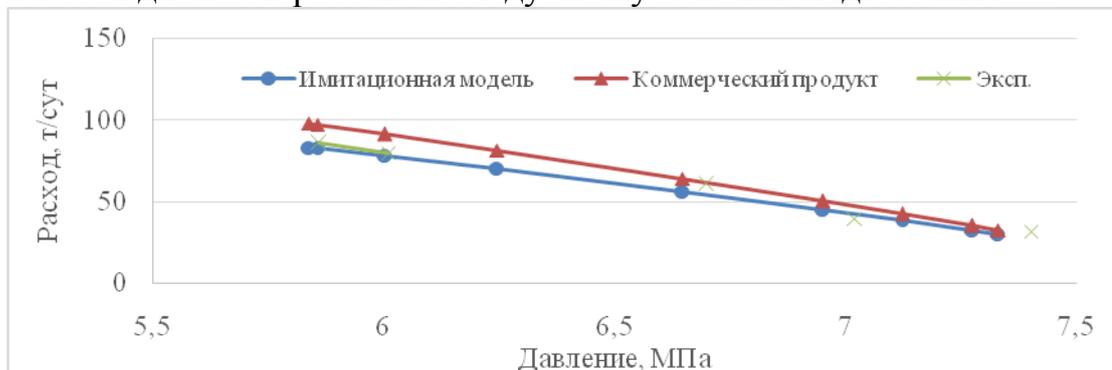


Рисунок 2. Количество конденсируемой жидкости в зависимости от давления при постоянной температуре 15°C

Выполнено сравнение (рис. 2) основных показателей работы установки, рассчитанных по модели, с фактическими данными реально эксплуатируемой установки, а также с результатами расчета в одном из современных моделирующих пакетов химико-технологических процессов (коммерческой программе).

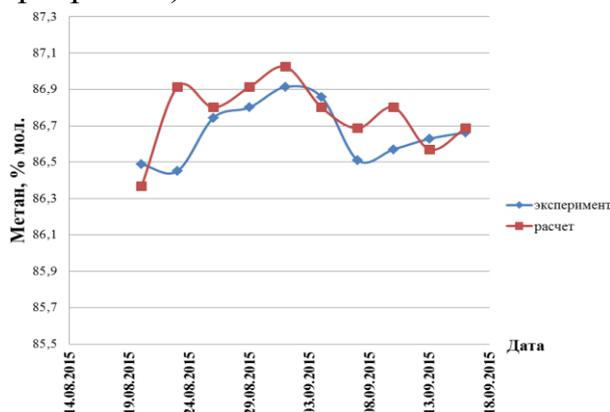


Рисунок 3. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по расходу метана с первой ступени сепарации

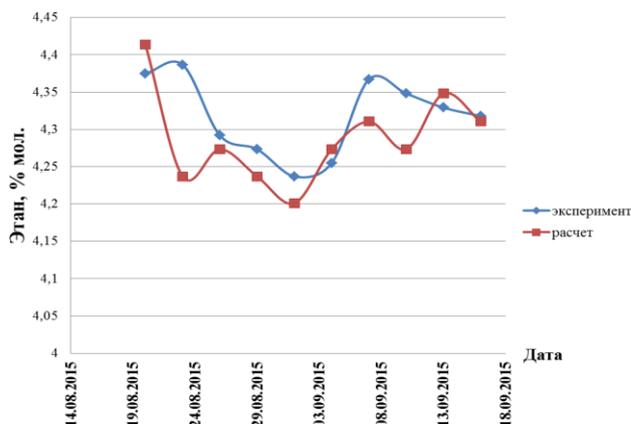


Рисунок 4. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по расходу этана с первой ступени сепарации

Средняя погрешность расчетов таких показателей, как расход углеводородных потоков не превышает 10%, что допустимо с точки зрения погрешности измерения этих параметров экспериментальным путем (рис. 3–4).

Качественное изменение показателей технологии сепарации газа соответствует теоретическим закономерностям процесса НТС.

Такой уровень достоверности получаемых результатов позволяет использовать разработанную модель процесса низкотемпературной сепарации газа для вариантной проработки возможных штатных и нештатных изменений в работе промышленных установок и производить оценку устойчивости системы

по отношению к внешним воздействиям. Разработан тренажер для обучения инженерно-технологического персонала УКПГ на основе имитационной динамической модели.

Показано, как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации промышленных объектов, появляется возможность оценить и заложить в регламент набор ограничений и правил, предупреждающих ситуации, приводящие к авариям.

Разработанная имитационная динамическая модель может быть широко использована при выполнении исследований работоспособности и безопасности технологических установок в рамках методик HAZID (Hazard Identification Studies – идентификация опасностей) и HAZOP (Hazard and Operability Study – анализ опасности и работоспособности).

Четвертая глава посвящена исследованию влияния управляющих параметров на эффективность работы установки НТС с использованием разработанной имитационной динамической модели. В работе осуществлена оценка влияния нанесения и снятия возмущения на параметры ХТС.

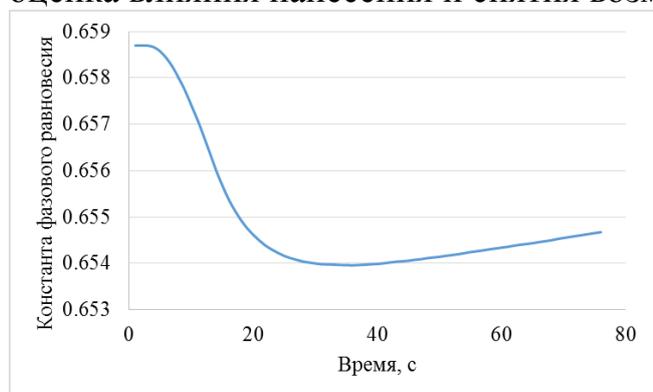


Рисунок 5. Зависимость константы фазового равновесия метана во 2-м сепараторе от времени (расчет на математической модели)

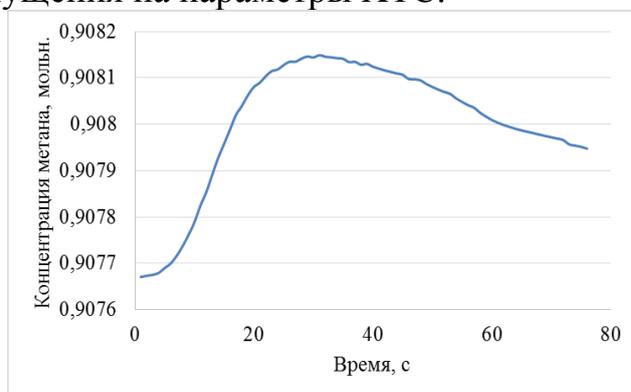


Рисунок 6. Зависимость мольной концентрации метана во 2-м сепараторе от времени (расчет на математической модели)

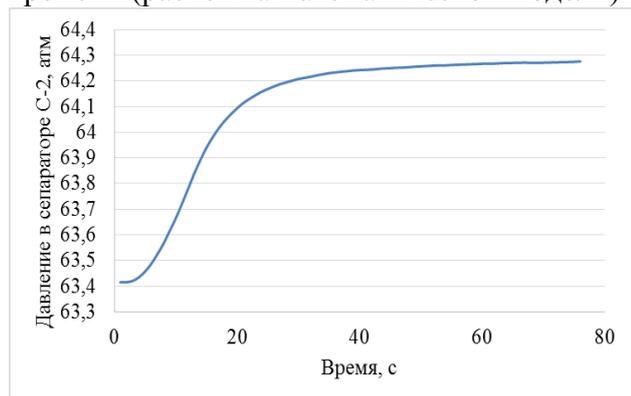


Рисунок 7. Зависимость давления во 2-м сепараторе от времени (расчет на математической модели)

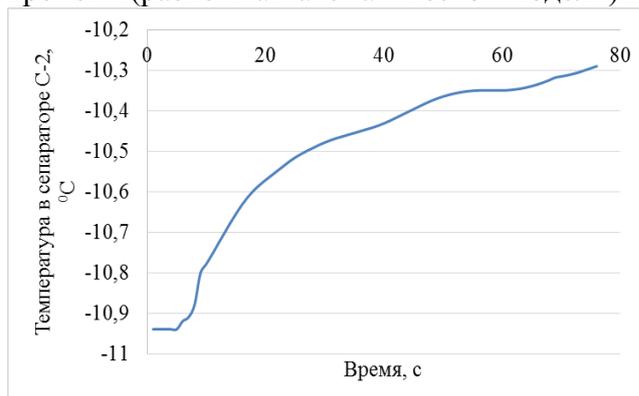


Рисунок 8. Зависимость температуры во 2-м сепараторе от времени (расчет на математической модели)

Воздействие на систему осуществлялось за счет изменения степени открытия клапанов. Постоянными параметрами были приняты: температура и состав газа на входе в систему; степень открытия эжектирующих устройств.

При этом наблюдались эффекты, указанные на рис. 5 - 8.

Проведенные исследования показали, что:

1) при переключении режима (изменение степени открытия первого клапана по газу с 50 до 70 %) в аппаратах непродолжительное время наблюдалась инерционность системы. Так, в первом сепараторе С-1 после переключения клапана, количество поступающего сырья продолжает снижаться, после чего наблюдается резкое увеличение поступления сырья. Аналогичная ситуация наблюдается в С-3, РЖ-1 и РЖ-2;

2) значительный прирост сырья наблюдается в С-2 в момент переключения клапана (более 1400 т/сут.). Это объясняется избыточным давлением газа до клапана. Далее, за счет уменьшения разности давлений между входным потоком и сепаратора С-2, наблюдается постепенное снижение количества поступающего сырья в аппарат.

В работе установлены закономерности работы системы в условиях переходного режима: при совершении возмущения на определенном участке технологической схемы изменение режимов работы аппаратов не происходит мгновенно, а распространяется постепенно от источника возмущения.

На рис. 9 и 10 показаны изменения давления и температуры во втором сепараторе при регулировании первого клапана в течение порядка 90 минут при изменении на 20 % и 220 минут при изменении на 40 %. В данном случае представлена траектория ОАВС, по которой изменяются параметры системы, в зависимости от расхода сырья в аппарат. Также показана продолжительность процесса от одной точки до другой в минутах.

При переходе из начального состояния (отрезок ОА) изменение расхода не влияет на давление и температуру в аппарате (принцип инерционности).

Далее при постепенном увеличении расхода наблюдается снижение давления и температуры (отрезок АВ). При возврате системы наблюдается обратная зависимость (отрезок СО). При этом в момент создания возмущения давление и температура также остаются постоянными (отрезок ВС).

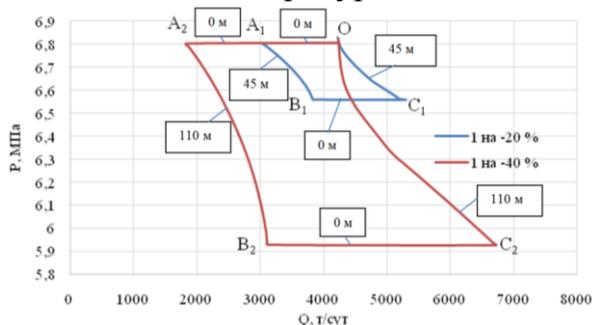


Рисунок 9. Зависимость давления во втором сепараторе С-2 от количества поступающего сырья при переключении первого клапана

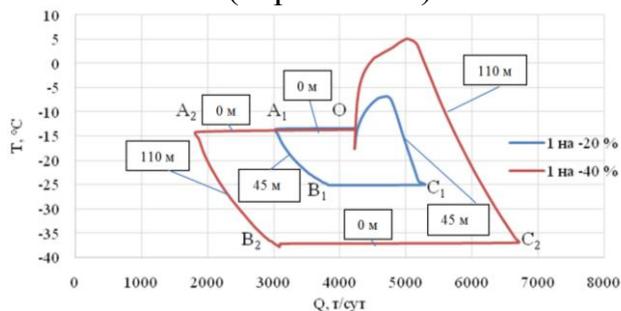


Рисунок 10. Зависимость температуры во втором сепараторе С-2 от количества поступающего сырья при переключении первого клапана

Температурный режим второго сепаратора демонстрирует инерционность теплообменного оборудования (отрезки С₁О и С₂О). Перед сепаратором С-2 расположен теплообменник, в котором в качестве хладагента прокачивается охлажденный подготовленный газ, который частично охлаждает сырьевой газ. В отличие от давления, температура поступающего сырья не вернулась в

начальную точку, а продолжала увеличиваться, достигла максимума, затем наблюдалось понижение, до начального состояния (точка О). При этом наблюдается ухудшение качества осушенного газа (повышается точка росы), а также увеличивается выход газа.

Во время эксплуатации промышленной установки возможно возникновение различных ситуаций, выводящих работу из стационарного режима, одной из них является резкое повышение содержания жидких углеводородов C_{5+} на входе в установку. При этом давление на первой и последующих ступенях сепарации снижается, а затем постепенно восстанавливается. Это связано с меньшим содержанием газообразных компонентов в составе поступающей смеси.

При снижении давления газа в аппаратах происходит небольшое снижение температуры в системе за счет инерционности работы аппаратов, в частности, теплообменного оборудования. Но затем температура резко повышается до тех пор, пока содержание жидких углеводородов не снизится до исходных значений. За счет повышения температуры в низкотемпературном сепараторе увеличивается содержание тяжелых углеводородов C_{5+} и повышается точка росы.

С помощью разработанной имитационной динамической модели стало возможным определить оптимальное изменение управляющих параметров, что позволяет поддерживать давление в аппаратах и при этом уменьшить изменение точки росы осушенного газа (рис. 11, 12).

Применение имитационной динамической модели, способной отражать в динамическом режиме переходные процессы в аппаратах химико-технологической системы, позволяет оценить последствия перехода с одного стационарного режима на другой (потери в качестве, изменение расходов и т.д.), а также определить продолжительность таких переходных процессов.

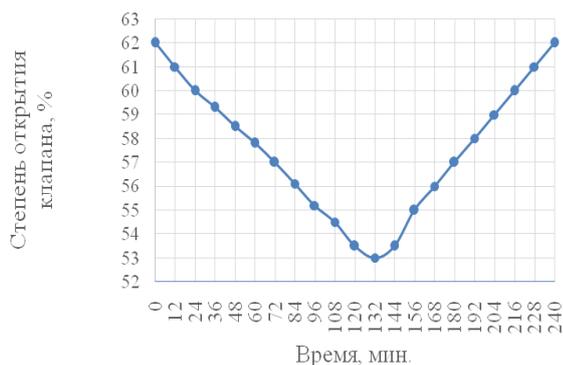


Рисунок 11. Зависимость изменения степени открытия клапана после низкотемпературного сепаратора

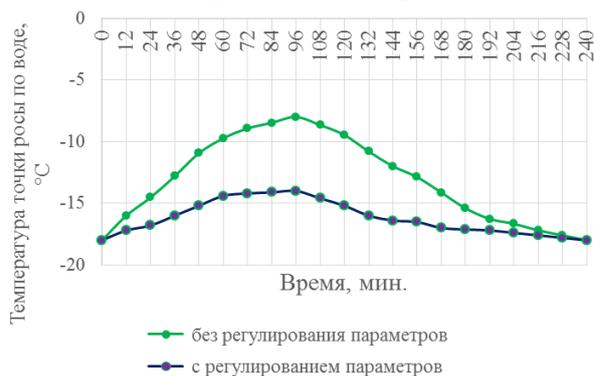


Рисунок 12. Зависимость точки росы осушенного газа с регулированием и без регулирования параметров управления

В таблице 2 представлены меры предотвращения негативных последствий переходных процессов в результате резкого повышения содержания жидких углеводородов C_{5+} на входе в установку.

Таблица 2. Зависимость отклонения точки росы осушенного газа при резком повышении содержания жидких углеводородов C_{5+} на входе в установку при корректирующих воздействиях.

№	Количество жидкости в составе поступающей смеси, % об.	Изменение регулятора газового потока низкотемпературного сепаратора, %	Снижение эффекта отклонения точки росы по углеводородам, %
1	10%	-2,1	40,1
2	30%	-3,3	41,9
3	50%	-5,1	41,9
4	70%	-7,2	43,1
5	90%	-9,0	45,0

Таким образом, при резком повышении содержания жидких углеводородов до содержания жидкости в смеси 90%, поступающей на УКПГ в течение двух часов, на исследуемой установке для стабилизации точки росы осушенного газа необходимо постепенно снизить степень открытия клапана после низкотемпературного сепаратора 3-й ступени с 62 % до 53 %. По мере снижения содержания жидкости в поступающей смеси, управляющие параметры следует привести к стандартным значениям рабочего режима.

В заключении подведены основные итоги выполненных исследований и обобщены теоретические следствия, сформулированы выводы по работе.

Основные выводы

1. При возникновении динамических воздействий, связанных с изменением состава сырья, условиями эксплуатации сборных трубопроводных сетей, переходами из одного установившегося состояния в другое и иными воздействиями, точки росы осушенного газа по воде и углеводородам значительно изменяются за счет изменения содержания влаги и тяжелых углеводородов C_{5+} в нем.
2. Имитационная динамическая модель процесса низкотемпературной сепарации газа, построенная на основе закономерностей фазовых превращений газ-жидкость углеводородных систем, базирующихся на химии слабых взаимодействий, и процессов теплопередачи в динамических условиях работы промышленных установок, позволяет прогнозировать работу действующих аппаратов технологической схемы.
3. Основной закономерностью процесса разделения углеводородов в аппаратах установки комплексной подготовки газа является сохранение инерционности при изменении управляющих параметров химико-технологической системы, после чего система возвращается нелинейным образом в новое устойчивое состояние. Имитационная динамическая модель процесса низкотемпературной сепарации газа позволяет оценивать время достижения нового установившегося режима, учитывать все сопутствующие колебания параметров работы аппаратов, входящих в состав установки. При увеличении степени открытия первого клапана перед вторым сепаратором с 50 до 70 % система непродолжительное время (около 2 мин.) сохраняет

инерционность. Время, необходимое для перехода из одного стационарного состояния в другое, при совершении возмущения в системе зависит от степени возмущения. Так, закрытие первого клапана на 20 и 40 % от первоначального приводит снижению количества поступающего сырья на установку с 4400 до 3900 и 3200 т/сут соответственно, при этом давление увеличивается с 5,95 до 6,1 и 6,55 МПа. Для достижения нового установившегося режима в системе в первом случае требуется 34 минуты, для второго 47 минут.

4. Разработанные математические модели теплообменного, сепарационного, эжекционного оборудования и регулирующей арматуры технологической установки подготовки газа и газового конденсата, позволяют в режиме реального времени с учетом взаимного влияния аппаратов прогнозировать изменение температуры и расходов углеводородных потоков. Граничные условия (температура, давление и расход смеси) и допустимый диапазон изменений параметров работы имитационной математической модели определены на основании допустимых значений достоверности базовых уравнений и проведенных исследований, и составляют: температура – от 35 до -70 °С, давление – от 2,0 МПа до 8,5 Мпа, расход – от 1000 т/сут до 5500 т/сут – что включает в себя диапазон работы исследуемой установки подготовки газа.

5. Уравнения материального баланса аппаратов, учитывающие парожидкостное равновесие, тип и конструкцию оборудования (теплообменного, сепарационного, эжекционного), характеризующегося коэффициентами уноса углеводородов при разделении, позволяют прогнозировать поведение химико-технологической системы при изменении состава и расхода сырья, а также термобарических условий в режиме реального времени. Так, при увеличении температуры на первой ступени сепарации на 5 °С увеличивается расход газа на 2,5 % за счет перераспределения вещества между газовой и жидкостной фазой на выходе установки.

6. При увеличении расхода газа на первой ступени сепарации на 20 % время перехода с одного стационарного состояния в другое не превышает 2 часов. При резком повышении содержания жидких углеводородов в смеси, поступающей на УКПГ в течение двух часов, для исследуемой установки для уменьшения снижения точки росы осушенного газа с максимального значения -8°С до -15°С необходимо постепенно снизить процент открытия клапана после низкотемпературного сепаратора 3-й ступени с 62% до 53 %.

7. Оптимизация процесса осушки газа позволяет дополнительно получать более 4 миллиона рублей в год за счет недопущения уноса тяжелых углеводородов C₅₊ в осушенном газе.

Основные результаты опубликованы в работах:

Статьи в центральной печати (перечень ВАК):

1. **Писарев М.О.** Повышение эффективности работы аппаратов технологической установки низкотемпературной сепарации газа с применением имитационной динамической модели / **Писарев М.О., Долганов И.М., Ивашкина Е.Н., Дмитриев А.Ю.** //Химическая промышленность сегодня. –

2016. – №5. – С. 45-56.

2. **Писарев, М.О.** Моделирование работы разделителей жидкости установки подготовки газа и газового конденсата в технологии низкотемпературной сепарации / М.Ш. Писарев, И.М. Долганов, Е.Н. Ивашкина // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 6–1. – С. 63-66.

3. **Pisarev, M. O.** Modes of Gas And Gas Condensate Preparation Unit in Low temperature Separation Technology Modeling / M.O. Pisarev, I.M. Dolganov, I.O. Dolganova, E.N. Ivashkina // *Petroleum and Coal*. – 2014. – Issue 2. – № 56. – P. 182-187.

4. **Pisarev, M. O.** Modeling of liquid separators work in gas and gas condensate preparation unit in low-temperature separation technology / I.M. Dolganov, M.O. Pisarev, E.N. Ivashkina, I.O. Dolganova // *Petroleum and Coal*. – 2015. – Issue 4. – № 57. – P. 328-335.

5. **Писарев, М.О.** Моделирование режимов работы аппаратов установки подготовки газа и газового конденсата в технологии низкотемпературной сепарации / **М.О. Писарев**, И.М. Долганов, Е.Н. Ивашкина, Е. В. Бешагина // *Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело"*. – 2014. – № 3. – С. 187-206.

Другие публикации:

6. **Писарев, М.О.** Оптимизация режимов работы установки подготовки газа и газового конденсата с использованием математической модели процесса низкотемпературной сепарации / **М.О. Писарев**, И.М. Долганов // *Современные технологии и моделирование процессов переработки углеводородного сырья: материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РФ, профессора А.В. Кравцова*. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2013. – С. 43-46.

7. **Писарев, М.О.** Моделирование работы аппаратов установки подготовки газа и газового конденсата в технологии низкотемпературной сепарации / **М.О.Писарев**, И. М. Долганов // *Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XV Международной научно- практической конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулёва: в 2 т.* – Томск: ТПУ. – 2014. – Т. 2. – С. 79-82.

8. **Писарев, М.О.** Анализ работы установки подготовки газа и газового конденсата в технологии низкотемпературной сепарации с применением компьютерной моделирующей системы / **М.О. Писарев**, И.М. Долганов, Е.Н. Ивашкина // *Нефтегазопереработка-2014: материалы Международной научно-практической конференции*. – Уфа: «Институт нефтехимпереработки РБ». – 2014. – С. 164-166.

9. **Писарев, М.О.** Исследование процесса промышленной подготовки газа с применением информационно- моделирующей системы «Газовый промысел» / В.В. Клименко, **М.О.Писарев** // *Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XV Международной научно- практической конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулёва: в 2 т.* –Томск: ТПУ. – 2014. – Т. 2. – С. 48-49.

10. **Писарев, М.О.** Интерактивная сетевая модель для реализации компьютерного тренажера / С.К. Важенин, Т.В. Ганджа, И.М. Долганов, **М.О.Писарев** // Современное образование: практико-ориентированные технологии подготовки инженерных кадров: материалы Международной научно-методической конференции. –Томск: Изд-во ТУСУР. – 2015. –С. 44-45.
11. **Писарев, М.О.** Математическое моделирование процесса низкотемпературной сепарации газа с учетом динамики месторождения / **М.О. Писарев**, И.М. Долганов, Е.В. Бешагина// Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 115-летию со дня рождения академика Академии наук СССР, профессора К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения члена-корреспондента Академии наук СССР, профессора Ф.Н. Шахова. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2014. –Т. 2. – С. 229-231.
12. **Писарев, М.О.** Разработка интерактивной моделирующей системы технологии низкотемпературной сепарации газа / **М.О. Писарев**, И.М. Долганов, Е.Н. Ивашкина // Современные техника и технологии: сборник докладов XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2014. – С. 231-232.
13. **Писарев, М.О.** Интерактивная сетевая модель для реализации компьютерного тренажера / С.К. Важенин, Т.В. Ганджа, И.М. Долганов, **М.О. Писарев**// Современное образование: практико-ориентированные технологии подготовки инженерных кадров: материалы Международной научно-методической конференции. – Томск: Изд-во ТУСУР. – 2015 - С. 44-45
14. **Писарев, М.О.** Моделирование работы аппаратов установки подготовки газа и газового конденсата в технологии низкотемпературной сепарации / **Писарев М.О.** , Долганов И.М. , Волков М.А. // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XVI Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых, посвященной 115-летию со дня рождения профессора Л.П. Кулёва: в 2 т., Томск, 25-29 Мая 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - Т. 2 - С. 32-33.
15. **Pisarev, M.O.** Mathematical modeling of gas and gas condensate preparation unit with dynamic mode of low-temperature separation / I.M. Dolganov, M.O. Pisarev, I.O. Dolganova, **E.N. Ivashkina** // Science, Technology and Higher Education: materials of the VIII International Research and Practice Conference. – Westwood (Ontario, Canada): Accent Graphics communications. –2015. – p. 238-241.
16. **Pisarev, M.O.** Development of computer modeling system for calculation of technological parameters of gas and gas condensate preparation system in real time / **M.O. Pisarev**, I.M. Dolganov, I.O. Dolganova // European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences: Proceedings of the 8th International scientific conference. –Vien: East West–2015. – p. 20-22.