

На правах рукописи



Мохов Константин Владимирович

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО АЛГОРИТМА СТАБИЛИЗАЦИИ
РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ
УСТАНОВКИ**

Специальность 05.04.03. Машины, аппараты и процессы холодильной и
криогенной техники, систем кондиционирования
и жизнеобеспечения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Научно-исследовательском и конструкторском институте криогенного машиностроения (НИиКИ КМ) Публичного акционерного общества криогенного машиностроения (ПАО «Криогенмаш»).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана
Навасардян Екатерина Сергеевна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор декан факультета «Машиностроение и аэрокосмическая техника» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
Ряжских Виктор Иванович

кандидат технических наук, доцент
начальник 24 кафедры 2 факультета ВУНЦ ВВС «ВВА»
Военный авиационный инженерный университет (Воронеж)
Козлов Александр Валерьевич

Ведущее предприятие: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (НИУ ИТМО)

Защита состоится «___» _____ 2022 года в _____ на заседании Диссертационного совета Д 212.141.16 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская наб., д.1, корпус «Энергомашиностроение», 3 этаж, Конференц-зал кафедры холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д.5., стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан “_____” _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета Д 212.141.16
кандидат технических наук, доцент

О.В. Белова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В Российской Федерации в настоящее время разрабатываются различные установки разделения воздуха (как для получения одного типа продукта, так и комплексного разделения) разной производительности (от 500 м³/ч до 65000 м³/ч по газообразному азоту, от 1000 м³/ч до 120000 м³/ч по газообразному кислороду).

Исторически сложилась тенденция выпускать установки с ручным (дистанционным) управлением, когда производительность установок в процессе эксплуатации не менялась или выполнялся переход с одного стационарного режима на другой, либо с одного продукта на другой непосредственно оператором установки.

По мере развития технического уровня возникла потребность в воздухоразделительных установках (ВРУ), на которых возможно изменять производительность в диапазоне от 50 до 100% или изменять получаемый продукт в нормальном режиме эксплуатации и при аварийном сценарии. Для современных производств становится крайне важной способностью быстро и эффективно перестраивать свою работу, подстраиваясь под запросы потребителей. При этом необходимо управлять технологическими объектами так, чтобы достигался наилучший результат. Одной из главных задач производств является снижение энергетических затрат, которые формируют себестоимость получаемой продукции, а также скорость (темп) перехода с одного стационарного режима на другой.

Известен способ регулирования производительности ВРУ, позволяющий осуществить переход с одного стационарного режима работы на другой со скоростью 0,3 %/мин. Алгоритмы с указанным темпом реализованы крупными зарубежными криогенными компаниями такими, как Air Liquide, Linde, Air Products. Обзор научных публикаций показал, что отечественных аналогов внедрено не было. При этом существующий темп изменения режима работы 0,3 %/мин на предприятиях нефтегазовой отрасли считается допустимым для штатной работы предприятия, но не приемлем для аварийных сценариев работы завода и требует скорость изменения не менее 1 %/мин.

Соответственно, по существующей потребности современных производств становится актуальной задача стабилизации рабочих процессов ВРУ на различных режимах эксплуатации как стационарных, так и переходных с одного стационарного режима на другой. Для управления воздухоразделительными установками на производстве и решения задачи перехода с одного стационарного режима, соответствующего некоторой производительности по продуктам разделения, на другой режим должны использоваться математические модели стационарного и динамического режимов установки, не полностью реализованные в настоящее время.

Для достижения поставленной цели необходимо провести исследование, связанное со сбором и извлечением информации о работе действующих установок на различных стационарных и переходных режимах.

Разработка динамических моделей типовых узлов ВРУ дает возможность частично решать поставленные задачи уже на этапе проектирования. Однако

полученные при этом результаты из-за отсутствия информации или недостаточного объема экспериментальных данных на стадии проектирования дают некоторую неточность, которая в ходе реальной эксплуатации должна снижаться.

Цель работы: разработка комплексного алгоритма стабилизации рабочих процессов воздуходелительной установки для различных режимов эксплуатации.

Основные задачи

1. Определение зависимостей расходов внутренних технологических потоков от значений расходов продуктов разделения для обеспечения минимальных энергетических потерь.
2. Сбор и анализ экспертных данных по взаимовлиянию рабочих параметров при переходе с одного стационарного режима на другой.
3. Сбор и обобщение рабочих параметров действующих ВРУ.
4. Разработка комплексного алгоритма изменения режима работы воздуходелительной установки с минимальными энергетическими потерями.
5. Формирование типовых алгоритмов управления для каждого узла установки разделения воздуха.

Научная новизна

1. Получены новые данные о параметрах работы ВРУ на стационарных и переходных режимах:
 - скорость изменения дистанционно – 0,6 %/мин, по алгоритму перехода – 1%/мин;
 - удельные затраты электроэнергии уменьшаются на ~3% по сравнению с алгоритмами, предлагаемыми зарубежными компаниями.
2. Для обеспечения необходимой холодопроизводительности аналитически получена и экспериментально подтверждена зависимость расхода воздуха через детандер от общего расхода воздуха на разделение, полученная при решении системы уравнений тепловых, материальных и энергетического балансов установки.
3. Впервые разработан комплексный алгоритм стабилизации процесса разделения воздуха, позволяющий осуществить переход с одного стационарного режима на другой со скоростью 1%/мин.

Практическая значимость и реализация результатов работы

1. Разработаны динамические модели типовых узлов установки разделения воздуха.
2. Разработан комплексный алгоритм стабилизации рабочих процессов воздуходелительной установки.
3. Разработана база типовых алгоритмов стабилизации отдельных технологических параметров установки разделения воздуха.
4. Результаты работы внедрены в процесс проектирования систем управления воздуходелительными установками ПАО «Криогенмаш».

5. Результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры: «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» Московского Государственного Технического Университета им. Н.Э. Баумана.
6. Разработанный на основании анализа теоретических и экспериментальных результатов комплексный алгоритм стабилизации рабочих процессов внедрен в систему регулирования воздухооразделительной установкой КдАд-120/45.
7. Даны рекомендации:
 - по разработке алгоритмов стабилизации узлов и отдельных технологических параметров воздухооразделительной установки;
 - по разработке комплексных алгоритмов стабилизации воздухооразделительной установки.

На защиту выносятся:

1. Результаты аналитических и экспериментальных исследований, реализующие задачу стабилизации рабочих процессов воздухооразделительной установки на различных режимах эксплуатации.
2. Предложенный алгоритм перехода с одного стационарного режима работы установки разделения воздуха на другой.
3. Рекомендации по разработке комплексных алгоритмов стабилизации технологического процесса разделения воздуха.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- тринадцатой международной научно-практической конференции «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития», – Москва, 2016;
- одиннадцатой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроение России», – Москва, 2018;
- двенадцатой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроение России», – Москва, 2019.

Личный вклад автора заключается в проведении теоретических и экспериментальных исследований стационарных режимов работы установок разделения воздуха, а также переходных процессов с одного стационарного режима на другой и в разработке комплексного алгоритма стабилизации рабочих процессов воздухооразделительной установки на различных режимах эксплуатации. Автором были проанализированы полученные данные, даны рекомендации по проектировании данных алгоритмов для новых установок разделения воздуха и выполнена попытка обобщения результатов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 печатных работы в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Благодарности. Автор глубоко признателен преподавателям, доцентам и профессорам кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» за помощь при проведении исследований, подготовки материалов докладов, подготовке и обсуждении работы,

а также коллективу ПАО «Криогенмаш» за содействие при подготовке материалов диссертации.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованных источников из 92 наименований, приложений, содержит 115 страниц основного текста, 41 рисунок, 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе анализируется структура алгоритмов регулирования установок разделения воздуха, которая состоит из следующих уровней:

- локального – позволяет стабилизировать отдельные технологические параметры и не позволяет оптимизировать затраты энергии;

- комплексного – устанавливает взаимосвязь между отдельными параметрами внутри одного узла и, тем самым, оптимизирует процесс на отдельных стационарных режимах;

- оптимизационного – устанавливает взаимосвязь между всеми параметрами всех узлов установки, создается математическая модель ВРУ. Данный тип алгоритмов позволяет минимизировать затраты энергии при переходе с одного режима работы на другой, а также при работе в стационарных режимах;

- MES-алгоритмов – для ВРУ, реализующих оптимизационные алгоритмы, позволяют организовать планирование производства при получении конкретных продуктов в автоматическом режиме.

Проводится детальный обзор существующих зарубежных и отечественных аналогов алгоритмов регулирования технологического процесса воздухоразделительных установок. Отмечаются наиболее эффективные из разработанных локальные алгоритмы регулирования и способы построения комплексных и оптимизационных алгоритмов управления технологическим процессом. Обращается внимание, что оптимизационные алгоритмы реализованы такими компаниями, как Air Liquide, Air Products, Linde. Анализ отечественных работ, посвященных разработке алгоритмов с минимизацией энергетических затрат, позволяет сделать вывод, что теоретические работы проводились, но внедрены не были. Отмечается, что теоретические алгоритмы перехода с одного стационарного режима работы на другой допускают максимальную скорость изменения 2%/мин, в то время, как существующие запросы на поставку ВРУ требуют не менее 1%/мин, алгоритмы зарубежных компаний позволяют выполнить переход со скоростью не более 0,3%/мин.

Рассматриваются методики составления математических моделей блока ректификации, существующие программные комплексы, позволяющие смоделировать алгоритмы регулирования воздухоразделительных установок и особенности их применения на ВРУ. В конце главы формулируются задачи, подлежащие решению в рамках работы.

Во второй главе приведена информация по сбору, анализу и обработке экспертных данных специалистов по установкам разделения воздуха. На базе обработанной информации разработаны алгоритмы стабилизации основных технологических параметров установки.

Показана постановка статической (стационарный режим) и динамической (переход с одного стационарного режима на другой) задач работы ВРУ.

Для решения задачи статической стабилизации требуется найти целевую функцию – минимальные затраты на работу компрессора:

$$N_{TK} = V_6 * R * T_H * \ln(p_2/p_1) / (\eta_{уз} * \eta_{мех} * \eta_{эл}). \quad (1)$$

Статическая модель построена в виде уравнений, составленных из материальных и тепловых балансов теплообменных и ректификационных аппаратов с начальными и граничными условиями (см. Рисунки 1 и 2):

$$\tau \cdot \frac{d(M_i)}{dt} = L_f + L_{in} + V_f - (L_d + L + V + V_d), \quad (2)$$

$$\tau \cdot \frac{d(M_i x_i)}{dt} = L_f \cdot x_{f,i} + L_{in} \cdot x_{in,i} + V_f \cdot y_{f,i} - (L_d \cdot x_{d,i} + L \cdot x_i + V \cdot y_i + V_d \cdot y_{d,i}), \quad (3)$$

$$\tau \cdot \frac{d(M_i h_i)}{dt} = L_f \cdot h_{f,i} + L_{in} \cdot h_{in,i} + V_f \cdot h_{f,i} - (L_d \cdot h_{d,i} + L \cdot h_i + V \cdot h_i + V_d \cdot h_{d,i}) + Q_{o.c.}, \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^k V_{pr,j} \cdot (h_{pr,in,j} - h_{pr,out,j}) - \sum_{i=1}^n V_{air,i} \cdot (h_{air,in,i} - h_{air,out,i}) + Q_{o.c.} = \tau \cdot \frac{d(Vh_{out})}{dt}. \quad (5)$$

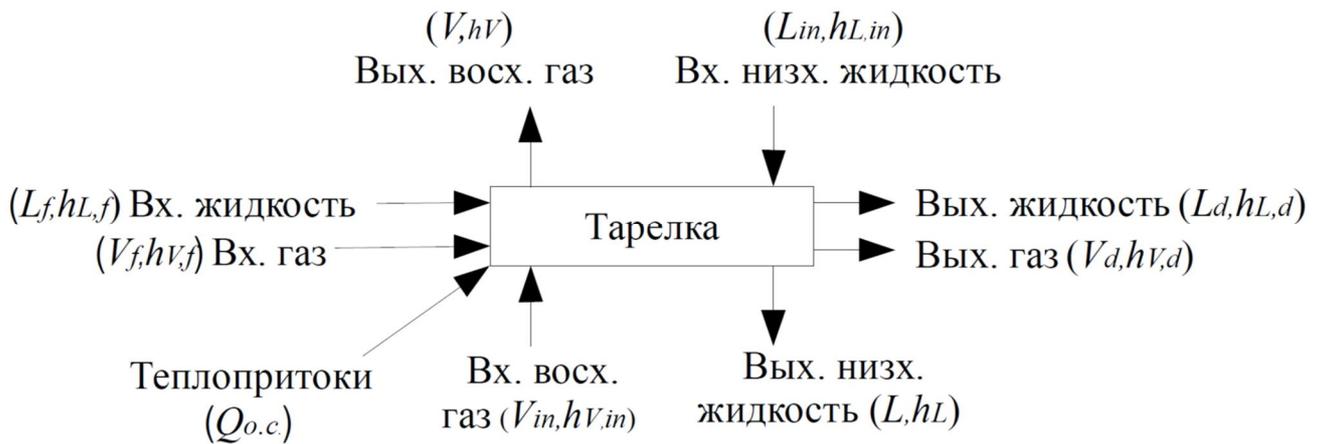


Рисунок 1. Схема материальных потоков теоретической тарелки

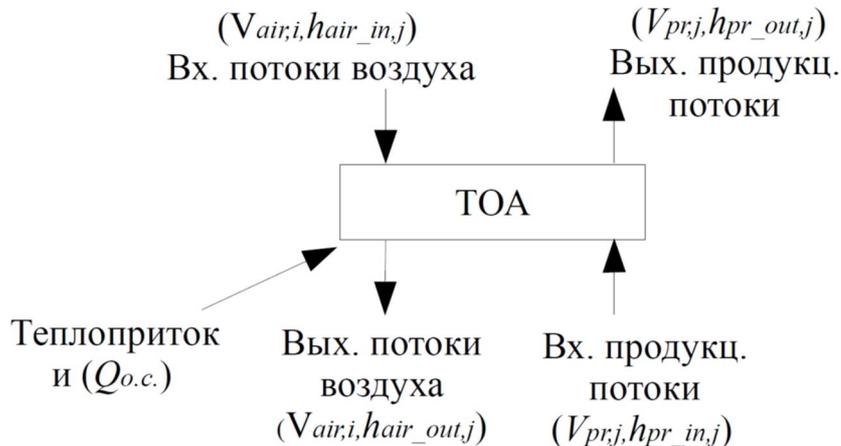


Рисунок 2. Схема материальных потоков теплообменного аппарата

Начальные и граничные условия:

$$\frac{d(M_i)}{dt} \Big|_{t \rightarrow 0} = 0, \quad \frac{d(M_i x_i)}{dt} \Big|_{t \rightarrow 0} = 0, \quad \frac{d(M_i h_i)}{dt} \Big|_{t \rightarrow 0} = 0, \quad \frac{d(Vh_{out})}{dt} \Big|_{t \rightarrow 0} = 0, \quad \frac{d(M_i)}{dt} \Big|_{t \rightarrow 60} = k \cdot V, \quad (6)$$

$$y_{N_2} \leq y_{N_2}^3, \quad y_{O_2} \geq y_{O_2}^3, \quad x_{N_2} \leq x_{N_2}^3, \quad x_{O_2} \geq x_{O_2}^3.$$

Уравнение состояния Пенга-Робинсона:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V \cdot (V+b) + b \cdot (V-b)}, \quad (7)$$

$$b = \sum_{i=1}^N x_i \cdot b_i, \quad b_i = 0.077796 \cdot \frac{RT_{ci}}{P_{ci}}, \quad \alpha^{0.5} = 1 + m_i(1 - T_{ri}^{0.5}),$$

$$a = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i \cdot x_j \cdot (a_i a_j)^{0.5} \cdot (1 - k_{ij}), \quad a_i = a_{ci} \alpha_i, \quad a_{ci} = 0.457235 \cdot \frac{(RT_{ci})^2}{P_{ci}},$$

$$m_i = 0.37464 + 1.54226 \omega_i - 0.26992 \omega_i^2, \quad A = \frac{aP}{(RT)^2}, \quad B = \frac{bP}{RT}. \quad (8)$$

Представлены описание принципиальной схемы и техническая характеристика воздухоразделительной установки АК-40/35 (см. Рисунок 3).

Для описанной установки АК-40/35, зная значения необходимых расходов продуктов и требуемых концентраций потоков, а также диапазонов изменения данных параметров, при решении составленных уравнений (2)-(8) определяются расходы внутренних технологических потоков: воздух на разделение, на детандерную ступень, чистая и грязная азотные флегмы:

$$V_g = 5,0428 * (V_k + G_k) - 0,074 * (V_a + G_a), \quad (9)$$

$$V_d = 0,5113 * (V_k + G_k) - 0,0075 * (V_a + G_a), \quad (10)$$

$$G_{\phi_l}^C = 1,5008 * V_a + 98,1532 * G_a - 1,1725 * (V_k + G_k), \quad (11)$$

$$G_{\phi_l}^F = 3,4929 * (V_k + G_k) - 1,6156 * V_a - 104,585 * G_a. \quad (12)$$

Определяются ограничения:

- конструктивные;
- на качество продуктов разделения;
- на величины допустимых отклонений основных технологических параметров.

Используя составленную статическую модель установки разделения воздуха в программной среде Unisim Design для различных режимов работы, рассчитываются значения основных технологических параметров установки.

Кроме того, для определения величин корректирующих воздействий и времени ожидания между изменениями заданий на регуляторах расходов основных технологических потоков в алгоритмах стабилизации, а также для проверки работоспособности алгоритмов разрабатывается динамическая модель узлов установки в среде Unisim Dynamic, для достоверных результатов в которой требуется подготовка следующих исходных данных:

- схема технологических трубопроводов и КИПиА;
- материально-тепловой баланс нескольких статических режимов работы установки;
- гидравлические характеристики технологических трубопроводов (длины, диаметры, материалы);
- характеристики теплообменных аппаратов (тип аппарата; размеры, количество и последовательность каналов; применяемый материал; коэффициенты теплоотдачи);
- характеристики ректификационных колонн (тип колонны; количество теоретических тарелок; геометрические и термодинамические характеристики);
- характеристики насосов (расходная кривая, NPSH);

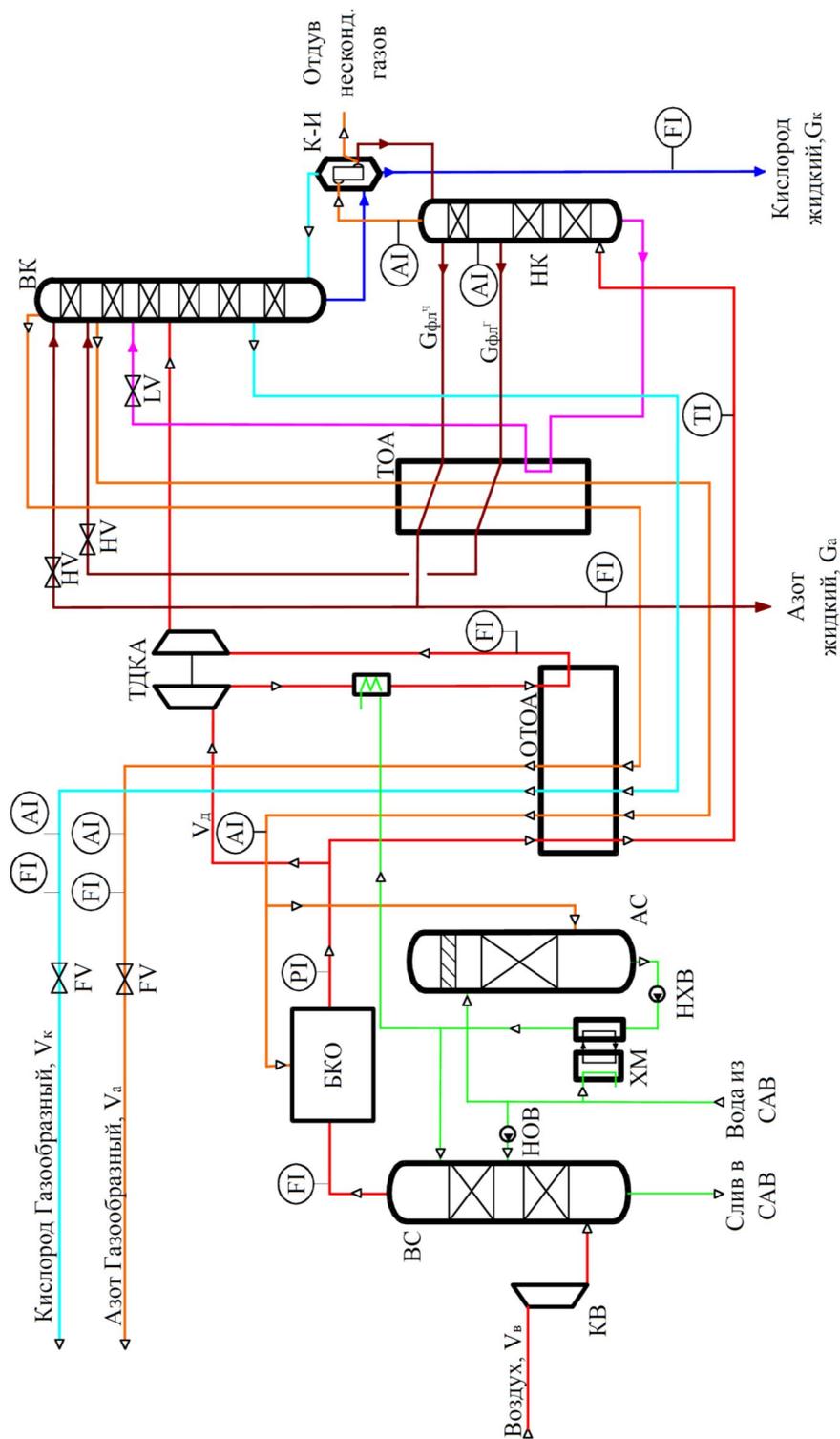


Рисунок 3. Принципиальная схема воздухоразделительной установки АК-40/35:

KB – компрессор воздушный; BC – воздушный скруббер; НОВ – насос обратной воды; ХМ – холодильная машина; НХВ – насос холодной воды; АС – азотный скруббер; БКО – блок комплексной очистки; ОТОА – основной теплообменный аппарат; ТДКА – турбодетандер-компрессорный агрегат; ТОА – теплообменный аппарат; НК – нижняя ректификационная колонна; ВК – верхняя ректификационная колонна; К-И – конденсатор-испаритель; САВ – система автономного водоснабжения.

- характеристики используемой арматуры (тип затвора, тип характеристики клапана, проходное сечение, скорость открытия/закрытия, коэффициент расхода);
- детальное описание логики управления установкой (причинно-следственная диаграмма; алгоритмы управления; перечень сигнализаций);
- детальное описание исследуемых сценариев работы установки.

Для минимизации энергетических затрат при переходе с одного стационарного режима на другой требуется, чтобы концентрации продукционных и внутренних технологических потоков были постоянными. При исследовании определяется максимально допустимая скорость перехода с одного стационарного режима на другой и минимально необходимые временные интервалы (задержки) между изменениями расходов технологических потоков.

Для надежной работы установки в переходных режимах требуется постоянство уровней в допустимых диапазонах. Определяются условия для динамической стабилизации, связанные с допустимыми отклонениями уровней криогенной жидкости в аппаратах установки в тех местах, где они не влияют на безопасность эксплуатации кислородосодержащего производства.

В третьей главе изложены цели и задачи экспериментального исследования разработанного комплексного алгоритма стабилизации рабочих процессов для воздухоразделительных установок АК-40/35 и КдАд-120/45, а именно требуется оценить возможность использования результатов моделирования стационарного режима в качестве заданий на регуляторы основных технологических параметров (расходов), определить с помощью динамического моделирования величины корректирующих воздействий, временные интервалы (задержки) между коррекциями и подтвердить работоспособность разработанной системы управления.

Для достижения этих целей решались следующие задачи:

- исследования на действующих воздухоразделительных установках: сбор статистических данных на стационарных режимах и процессах перехода с 1-ого стационарного режима на другой;
- сравнение расчетных и действительных показателей работы установки;
- отработка алгоритма изменения режима работы установки на динамической модели узлов установки;
- выявление основных правил стабилизации технологического режима;
- отработка алгоритма стабилизации технологического режима;
- на разработанной динамической модели проектируемой воздухоразделительной установки выполнены:
- отработка методики настройки контуров регулирования;
- определение величин корректирующих воздействий и временных интервалов (задержек) для стабилизации процесса;
- определение величин временных интервалов (задержек) между шагами изменения технологического процесса.

Описаны методики настройки автоматических контуров регулирования, перехода с одного стационарного режима на другой вручную (дистанционно) и

алгоритм автоматического перехода между стационарными режимами работы установки.

В ходе работы рассмотрено 2 варианта перехода с одного стационарного режима работы на другой:

1). Режим уменьшения производительности ВРУ:

- уменьшение холодопроизводительности турбодетандер-компрессорного агрегата (ТДКА);

- уменьшение расхода вырабатываемого кислорода;

- уменьшение расхода производимого азота;

- уменьшение внутренних технологических параметров: расходов чистой и грязной азотной флегм, жидкого воздуха в колонну низкого давления (НД), воздуха через дожимающий компрессор (КВД), технического аргона, давления отбросного азота, подаваемого в систему предварительного охлаждения воздуха и воды (СПОВВ);

- на последнем шаге сокращается количество подаваемого воздуха на разделение.

2). Режим увеличения производительности ВРУ:

- увеличить количество подаваемого воздуха на разделение;

- увеличить холодопроизводительность ТДКА;

- увеличить внутренние технологические параметры: расход чистой и грязной азотной флегм, жидкого воздуха в колонну НД, воздуха через КВД, технического аргона, давление отбросного азота, подаваемого в СПОВВ;

- увеличить расход азота;

- увеличить расход кислорода.

В четвертой главе проводилась обработка результатов, полученных на действующих установках и динамических моделях узлов ВРУ.

Результаты аналитического расчета сравнены с показаниями действующей установки АК-40/35. Отмечается, что в ходе перехода с одного стационарного режима на другой чистота производимого кислорода оставалась постоянной, переход был выполнен эффективно (без сброса части получаемого продукта в атмосферу), тем самым, были обеспечены минимальные затраты работы установки в ходе изменения режима работы. Достигнутая скорость перехода составила 0,6 %/мин (см. Рисунок 4).

Проведена оценка погрешности измерений, были определены доверительные интервалы. Значения параметров, определенных из составленных зависимостей (9)-(12), находятся внутри доверительного интервала.

Для выполнения процедуры изменения производительности ВРУ предлагается алгоритм, позволяющий эффективно (без сброса части продукта в атмосферу) проводить операции загрузки/разгрузки ВРУ в диапазоне работы установки 70...100%.

В ходе проведения процедуры изменения режима работы были отмечены следующие действия оператора:

1). При повышении концентрации кислорода в грязной азотной флегме выполнялся дополнительный шаг по закрытию соответствующей регулирующей арматуры для уменьшения отбираемого потока в процессе разгрузки установки.

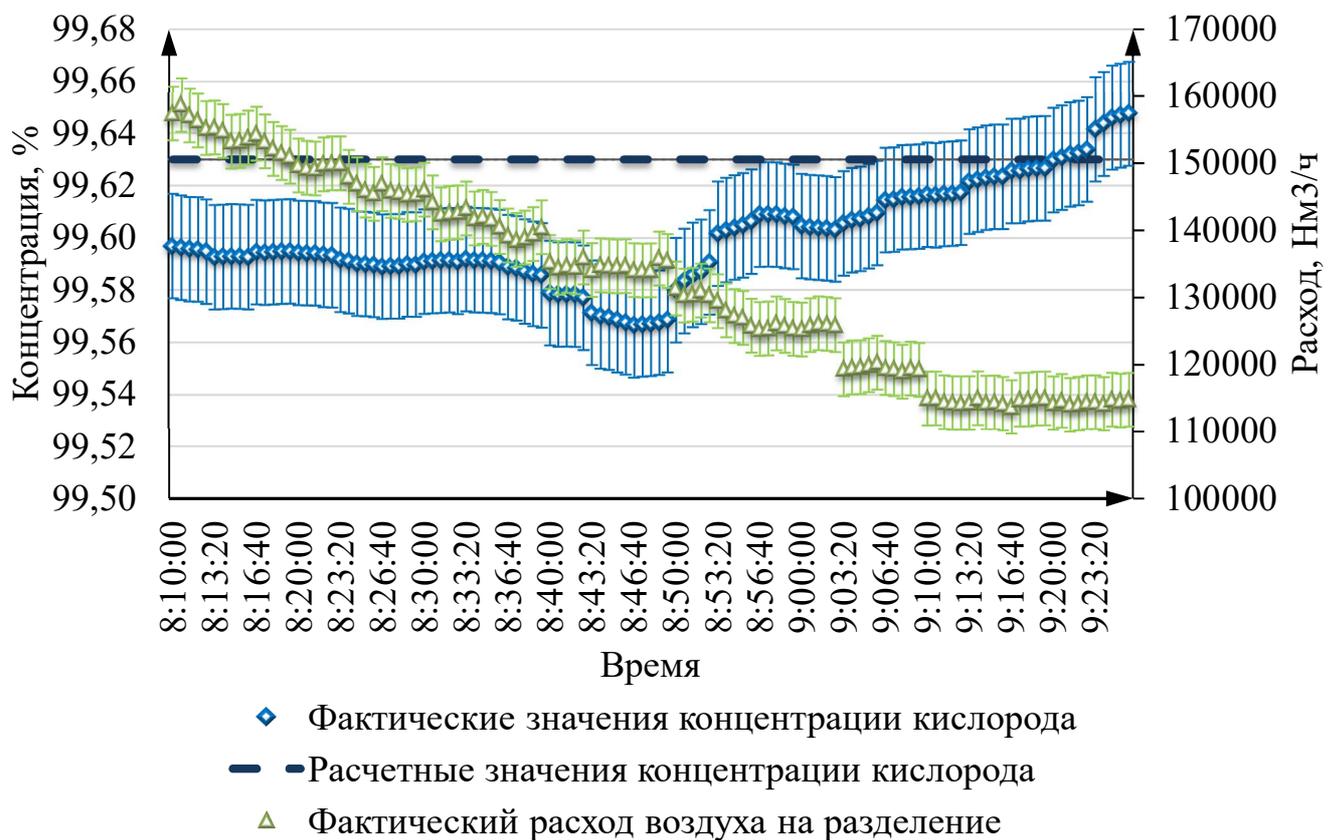


Рисунок 4. Переход с одного стационарного режима работы ВРУ на другой

2). При значительном снижении концентрации кислорода в грязной азотной флегме выполнялся дополнительный шаг по открытию соответствующей регулирующей арматуры для увеличения отбираемого потока в процессе нагрузки установки.

3). При повышении концентрации кислорода в чистой азотной флегме выполнялся дополнительный шаг по закрытию регулирующей арматуры продукционного азота для уменьшения отбираемого потока в процессе разгрузки установки.

4). При значительном снижении концентрации кислорода в чистой азотной флегме выполнялся дополнительный шаг по открытию регулирующей арматуры продукционного азота для увеличения отбираемого потока в процессе нагрузки установки.

5). При понижении чистоты продукционного кислорода выполнялся дополнительный шаг по закрытию регулирующей арматуры для уменьшения отбираемого потока в процессе разгрузки установки.

Отмеченные действия были учтены при разработке алгоритмов стабилизации отдельных технологических параметров внедрением дополнительного контроля по грязной азотной флегме и по продукционному азоту, направленного на пропуск соответствующего шага изменения по данным параметрам для стабилизации концентраций потоков.

Выводы из сравнения расчетных и экспериментальных значений:

- разработанные математические зависимости (9)-(12) расходов технологических потоков могут быть использованы для определения заданий на регуляторы на различных режимах работы ВРУ;

- совместно с предлагаемой последовательностью изменения основных технологических параметров данные зависимости позволят автоматизировать процесс регулирования производительности установки;
- скорость изменения режима работы ВРУ может достигать $\sim 0,6\%/мин$ при использовании предлагаемого алгоритма перехода;
- для возможности дальнейшего повышения скорости требуется внедрение каскадных алгоритмов регулирования или алгоритмов стабилизации основных параметров технологического процесса.

По результатам предварительного исследования работы действующей установки для реализации задачи автоматического изменения производительности необходимо внедрить алгоритмы стабилизации основных технологических параметров. Основанные на экспертных данных алгоритмы поддерживают постоянными основные параметры работы установки, внося корректирующие воздействия на регуляторы технологических потоков:

1. Температура воздуха на выходе из воздушного скруббера:

$$RSP[G_{охл\ воды}] = SP[G_{охл\ воды}] + TI_{выход\ возд}. \quad (13)$$

2. Температура воздуха на холодном конце основного теплообменного аппарата:

$$RSP[V_6] = SP[V_6] + T2_{выход\ возд}. \quad (14)$$

3. Концентрация кислорода в грязной азотной флегме

$$RSP[G_{зр}] = SP[G_{зр}] + A_{зр}. \quad (15)$$

4. Концентрация кислорода в продукционном азоте

$$RSP[G_{ЖА}] = SP[G_{ЖА}] + A_{ГА} \quad (16)$$

$$\text{или } RSP[V_{ГА}] = SP[V_{ГА}] + A_{ГА}. \quad (17)$$

5. Чистота продукционного кислорода

$$RSP[G_{ЖК}] = SP[G_{ЖК}] + A_{ГК} \quad (18)$$

$$\text{или } RSP[V_6] = SP[V_6] + A_{ГК}. \quad (19)$$

Представлены результаты экспериментальных исследований работы алгоритма стабилизации рабочих процессов установки разделения воздуха на динамической модели. Например, дана оценка влияния уровня жидкости в колонне ВД на чистоту продукционного кислорода (см. Рисунки 5-8).

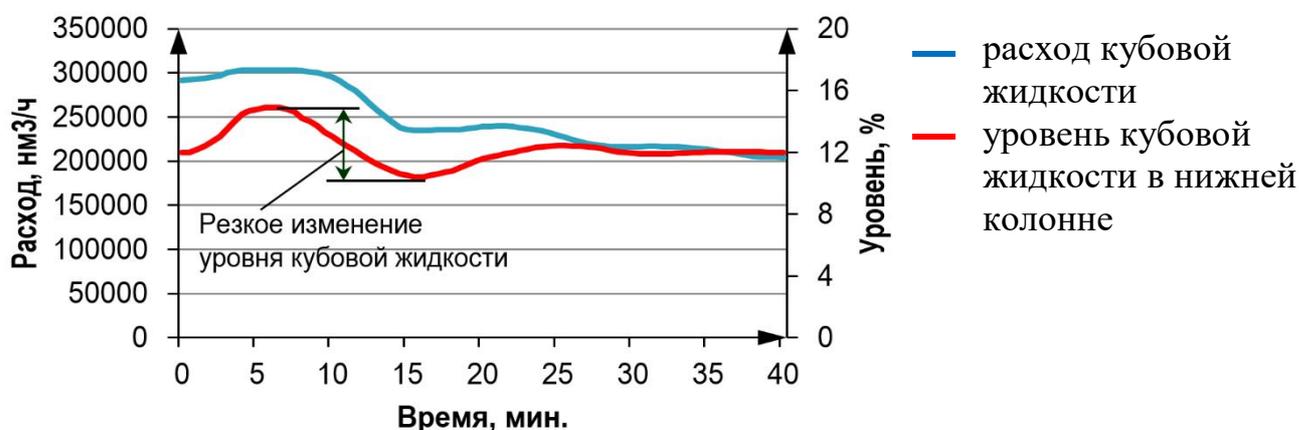


Рисунок 5. Изменение расхода кубовой жидкости и уровня кубовой жидкости в процессе перехода с одного стационарного режима работы на другой со скоростью $1\%/мин$ (без алгоритма стабилизации)

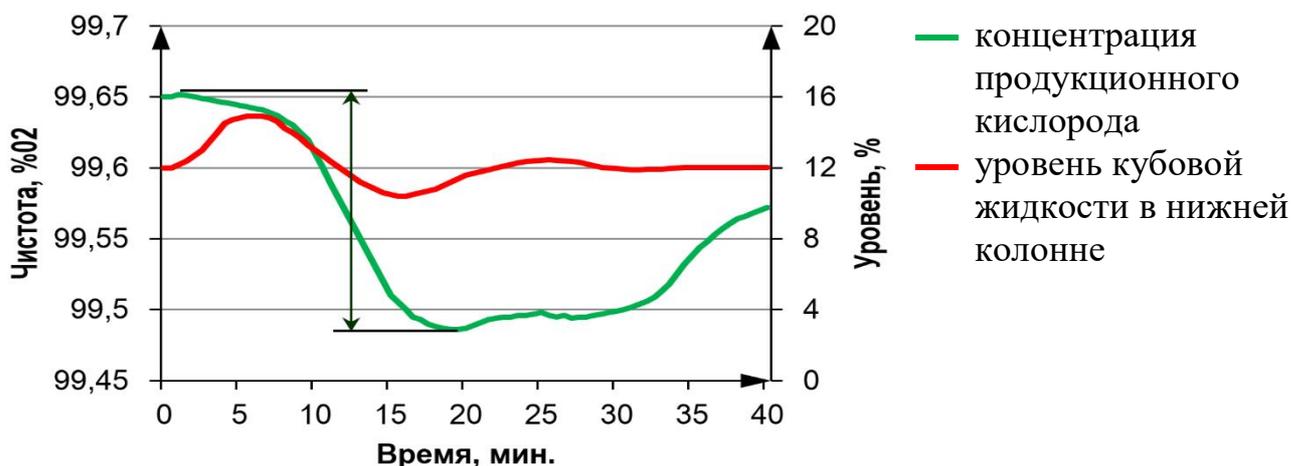


Рисунок 6. Изменение уровня кубовой жидкости и чистоты продукционного кислорода в процессе перехода с одного стационарного режима работы на другой со скоростью 1%/мин (без алгоритма стабилизации)

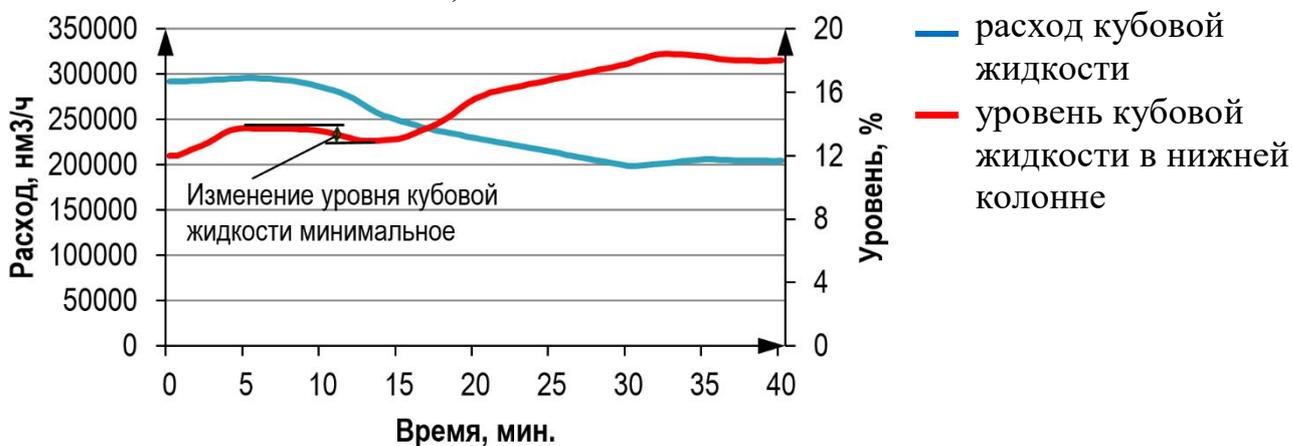


Рисунок 7. Изменение расхода кубовой жидкости и уровня кубовой жидкости в процессе перехода с одного стационарного режима работы на другой со скоростью 1%/мин (с алгоритмом стабилизации)

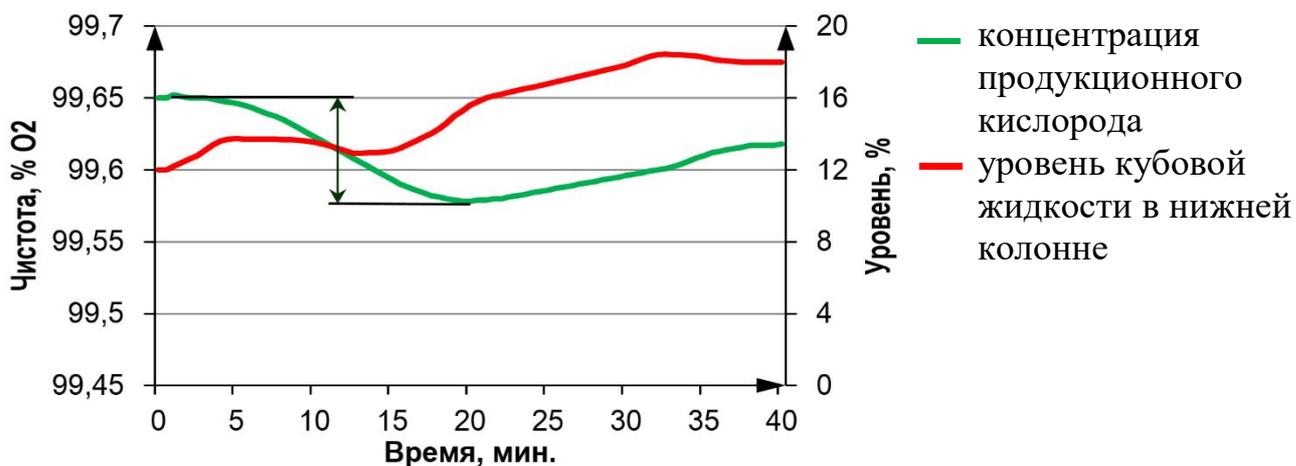


Рисунок 8. Изменение уровня кубовой жидкости и чистоты продукционного кислорода в процессе перехода с одного стационарного режима работы на другой со скоростью 1%/мин (с алгоритмом стабилизации)

Было установлено, что высокая скорость перехода приводит к быстрому росту уровня в нижней колонне, что приводит к повышенной скорости открытия клапана подачи кубовой жидкости и, как следствие, нарушению нормальной работы колонны. Для устранения данной проблемы был предложен алгоритм плавного изменения уровня в нижней колонне, тем самым, удалось ввести контроль расхода кубовой жидкости в процесс перехода с одного стационарного режима на другой.

Аналогичным образом проводилась оценка влияния на рабочие процессы разделения воздуха при отклонении основных технологических параметров, указанных в формулах (13)-(19), а также уровня в основном конденсаторе. Динамические модели позволили установить количественные значения корректирующих воздействий, а также временные интервалы (задержки), необходимые для качественной работы алгоритмов стабилизации.

По результатам динамического моделирования даны следующие рекомендации:

- использовать коррекцию заданий регуляторов расходов воздуха на разделение, продукционных азота, кислорода, грязной и чистой азотных флегм по основным технологическим параметрам в соответствии с экспертными данными от инженеров-технологов процесса;
- использовать коррекцию расхода через ТДКА по уровню в основном конденсаторе;
- разрабатывать и использовать динамические модели установок для определения величин временных интервалов (задержек) и корректирующих воздействий, а также коэффициентов настройки контуров автоматического регулирования согласно разработанным методикам в качестве первого приближения к действительному процессу для ускорения проведения пусконаладочных работ и для повышения надежности поддержания стабильного технологического режима;
- использовать для алгоритма стабилизации зависимости, выведенные из материальных, тепловых и энергетических балансов установки разделения воздуха;
- использовать в алгоритме стабилизации технологического процесса плавное изменение уставки регулятора уровня: 18% для 100%-ого режима работы, 12% – для 70%-ного;
- использовать динамические модели установок для отладки алгоритма стабилизации технологического процесса;
- применять методика разработки комплексных алгоритмов для других проектов;
- использовать значения корректирующих воздействий и временные интервалы (задержки) для алгоритма стабилизации технологического процесса воздухоразделительной установки, условия для динамической стабилизации, связанные с допустимыми отклонениями уровней криогенной жидкости в аппаратах установки в тех местах, где они не влияют на безопасность эксплуатации кислородосодержащего производства.

По итогам динамического моделирования были оценены затраты на остановку завода по производству синтез-газа в цифровом эквиваленте (см. Таблицу 1).

Таблица 1.

Цифровой эквивалент потерь от остановки производства в зависимости от алгоритма изменения режима работы.

| Описание сценария | Последствия | Потери |
|--|---|--|
| Остановка производства без алгоритма изменения режима работы | 8 часов на перезапуск одной технологической линии производства | 1 млн \$/ч - простой производства, не получение конечного продукта |
| Аварийная разгрузка со скоростью 0,3%/мин (алгоритм зарубежных компаний) | Запуск резервных котлов генерации пары ВД, необходимых для работы паровых турбин ВРУ | 60 т пара ВД |
| Аварийная разгрузка производства (1%/мин) по алгоритму без стабилизационной составляющей | Потеря чистоты продукта на 15 мин → запуск СХ → переходный процесс с СХ на ВРУ (15 мин) | 160 кВт электроэнергии; 86 т ЖК; 18 т пара СД |
| Аварийная разгрузка производства по предлагаемому алгоритму | Переход с одного стационарного режима работы на другой | Минимальные энергетические потери, связанные с поддержание давления нагнетания компрессора выше и концентрации получаемых продуктов лучше, чем требуется по проектному расчету |

Был выполнен анализ статистических данных процессов перехода с одного стационарного режима на другой таких ВРУ, как: КДАЖАрж-1,5/3,5 (г. Колпино), АКЖАрж-8/3,5 (г. Томск), КТА-40/60 (г. Норильск), АК-40/35 (г. Липецк). В Таблице 2 представлены результаты переходных процессов по удельным затратам электроэнергии в зависимости от скорости перехода.

Таблица 2.

Удельные затраты различных ВРУ в процессе перехода с одного стационарного режима на другой, кВт*ч/м³(O₂ у.г.).

| Скорость изменения режима, %/мин | КДАЖАрж-1,5/3,5 | АКЖАрж-8/3,5 | КТА-40/60 | АК-40/35 |
|----------------------------------|-----------------|--------------|-----------|----------|
| 0,3 | 0,422 | 0,521 | 0,417 | 0,359 |
| 0,6 | 0,416 | 0,516 | 0,41 | 0,354 |
| 1 | 0,407 | 0,507 | 0,405 | 0,347 |

Обобщенные результаты Таблицы 2 позволяют установить, что удельные затраты электроэнергии при переходе с одного стационарного режима работы на другой со скоростью 0,6 %/мин в дистанционном режиме будут на 1,2% ниже, чем по алгоритму, предлагаемому зарубежными компаниями; а при внедрении комплексного алгоритма изменения, обеспечивающего скорость перехода 1%/мин, удельные затраты будут меньше на 3% по сравнению с зарубежными аналогами.

Анализ результатов аналитического и экспериментального исследований позволил сформулировать ряд рекомендаций по основным пунктам разработки алгоритма стабилизации рабочих процессов воздухоподразделительной установки на различных режимах работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Аналитически были составлены и экспериментально скорректированы зависимости расходов внутренних технологических потоков от значений расходов продуктов разделения, позволяющие получить минимальные энергетические потери:

$$V_B = A * (V_K + G_K) + B * (V_a + G_a),$$

$$V_D = C * (V_K + G_K) + D * (V_a + G_a),$$

$$G_{\text{флЧ}} = E * V_a + F * G_a + H * (V_K + G_K),$$

$$G_{\text{флГ}} = J * (V_K + G_K) + K * V_a + L * G_a.$$

2. На основе собранных экспертных данных по взаимовлиянию рабочих параметров при переходе с одного стационарного режима на другой, были разработаны и предложены алгоритмы стабилизации отдельных технологических параметров (уравнения (13)-(19)).
3. Проведено обобщение полученных данных о работе действующих ВРУ, отличных как по типу, так и по производительности. Установлено, что при переходных режимах:
 - скорость изменения дистанционно составляет 0,6 %/мин, по разработанному комплексному алгоритму стабилизации – 1%/мин;
 - удельные затраты электроэнергии уменьшаются на ~3% по сравнению с алгоритмами, предлагаемыми зарубежными компаниями.
4. Впервые разработан и внедрен комплексный алгоритм стабилизации рабочих процессов ВРУ на установке КдАд-120/45, позволяющий осуществить переход с одного стационарного режима на другой со скоростью 1%/мин.
5. Сформированы типовые алгоритмы управления для каждого узла установки разделения воздуха и предложены для внедрения во вновь проектируемые установки ПАО «Криогенмаш».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Навасардян Е.С., Мохов К.В. Тенденция развития современных систем автоматического регулирования технологических процессов воздухоподразделительных установок // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. №3. DOI 10.18698/2308-6033-2017-3-1597. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/mdpr/1597.html> (0,88 п.л./0,82 п.л.).

2. Навасардян Е.С., Мохов К.В. Методика настройки контуров регулирования воздуходелительной установки // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. №4. DOI 10.18698/2308-6033-2017-4-1598. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/mdpr/1598.html> (0,56 п.л./0,37 п.л.).
3. Навасардян Е.С., Архаров И.А., Мохов К.В. Переходные процессы в установках разделения воздуха // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2018. №11. С.27-30 (0,13 п.л./0,29 п.л.).
4. Navasardyan E.S., Arkharov I.A., Mokhov K.V. Transient processes in Air Separation Plants // Chemical and Petroleum Engineering. 2019. Vol.54, Issue 11-12. P.821-826 (0,19 п.л./0,33 п.л.).