

**Министерство образования и науки РФ
Тверской государственный технический университет**

На правах рукописи



Бакасов Сабир Румович

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ
ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ НА ОСНОВЕ
НЕЧЁТКИХ ИМПУЛЬСНЫХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность 05.13.06 –Автоматизация и управление технологическими процес-
сами производствами (в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тверь 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ)

Научный руководитель:

Богатилов Валерий Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Тверской государственный
технический университет».

Официальные оппоненты:

Егоров Александр Фёдорович,
доктор технических наук, профессор, заве-
дующий кафедрой, ФГБОУ ВО «Россий-
ский химико-технологический университет
им. Д.И. Менделеева»,

Тарасов Валерий Борисович,
Кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Московский государствен-
ный технический университет имени Н.Э.
Баумана

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего об-
разования «Тамбовский государственный
технический университет»

Защита состоится 18 октября 2019 года в 15.00 часов на заседании диссертацион-
ного совета Д 212.262.06 в ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический
университет» (адрес: 170026, г. Тверь, наб.А. Никитина, 22).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ТвГТУ» и на сай-
те www.tstu.tver.ru.

Автореферат разослан “_____” _____ 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.физ.-мат.н., профессор

Дзюба С.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Вопросы организации управления системами обеспечения безопасности, которые относятся к классу сложных современных систем промышленного сектора, в настоящее время обретают все большую значимость. В настоящей работе предложено решение этого вопроса посредством разработки и внедрения на промышленных предприятиях системы управления технологической безопасностью.

Согласно современным стандартам безопасности, промышленные объекты повышенной опасности оснащаются системами диагностики состояний и системами, позволяющими проводить оценку возможных рисков. В своей совокупности они представляют собой сложные человеко-машинные системы, предполагающие взаимодействие человека и «разумного» компьютера.

Принятие решений в данном случае осуществляется в слабоструктурированной и плохо формализуемой среде. Успешно решить такие задачи можно лишь с помощью применения интегрального подхода, сочетающего в себе как классическую математику, так и современные достижения в области методов искусственного интеллекта.

Данное исследование, посвящённое решению проблемы безопасности промышленного производства, опирается на основополагающие работы как российских учёных: - В.В. Кафарова, В.П. Мешалкина, Б.В. Палюха, А.Ф. Егорова, Т.В. Савицкой, В.К. Дедков, Г.В. Дружинин, А.Н. Катулев, А.С. Можаяев, И.А. Рябинин, Н.А. Северцев, Е.Д. Соложенцев, так и зарубежных авторов: - Г. Груна, Х. Кумамото, В. Маршала, В. Нойманна, Э. Дж. Хенли и других.

Таким образом, создание современных методов проектирования новых и совершенствования существующих систем управления технологической безопасностью является актуальной задачей.

Объектом исследования является технологическая безопасность процесса селективной очистки газов.

Предметом исследования является анализ технологических угроз и уязвимостей процесса селективной очистки газов и алгоритмы управления технологической безопасностью системы.

Цель работы и задачи исследования.

Повышение эффективности реактора селективной очистки производства неконцентрированной азотной кислоты за счет создания системы управления безопасностью на основе нечётко-определённых импульсных моделей.

Для достижения цели работы, необходимо решить такие задачи, как:

- анализ методов оценки состояний типовых процессов промышленных технологий, и принятие решений в условиях неопределенности на основе расчета уровня риска;
- разработка модели управления системы технологической безопасностью процесса селективной очистки газов, главным критерием в которых является достижение минимального уровня риска;
- разработка математического и алгоритмического обеспечения системы управления технологической безопасностью на примере адаптивной системы управления химико-технологическим процессом селективной очистки.

Научная новизна работы:

- разработана методика создания моделей промышленных технологий на основе нечётко-определённой импульсной модели по критерию риска на примере процесса селективной очистки хвостовых газов;
- разработана функциональная структура системы прогностного управления для оценки состояний процесса, что повышает скорость реакции системы на возникающие нештатные ситуации;
- разработаны алгоритмы и программы, реализующие систему прогностного управления процессом селективной очистки газов, которые учитывают неопределённость информации о параметрах технологического процесса и улучшают качество управления процессом.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика определения состояний объекта на основе нечётко-определённой импульсной модели количественной оценки риска ведения технологического процесса.
2. Методика расчёта управляющих воздействий по критерию риска для процесса селективной очистки хвостовых газов на основе оценки, сложившейся в данный момент времени технологической ситуации.
3. Модель системы управления поиска решений на основе импульсной модели оценки уровня риска ведения технологического процесса.

Методы исследования. Методы теории системного анализа химико-технологических процессов, математического моделирования промышленных систем, методы теории нечёткой логики, методы построения промышленных информационных систем.

Основная теоретическая значимость. В работе предлагается нечётко-определённая импульсная модель оценки уровня риска при работе системы управления, которая учитывает возможные потери от внезапных и постепенных отказов, что повышает эффективность функционирования системы управления.

Практическая значимость. Результаты теоретических исследований, представленные в работе, предлагается использовать как методическую основу для разработки АСУ ТП потенциально опасных производств, каким является производство неконцентрированной азотной кислоты. Построенная система управления позволяет повысить эффективность технологического процесса за счет повышения качества и оперативности управления.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования были изложены в виде научных докладов на следующих Всероссийских и Международных научно-практических конференциях, симпозиумах и школах-семинарах: Транспорт и логистика: инновационное развитие в условиях глобализации технологических связей. СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ. Рост. Гос. ун-т. путей сообщения. Ростов- н/Д, 2017; СОВРЕМЕННЫЕ СЛОЖНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ HTCS'2018, Сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции, Старый Оскол, 17–19 октября 2018 г., Москва – Старый Оскол, ИПУ РАН СТИ НИТУ «МИСиС», 2018; Актуальные вопросы современных научных исследований [Электронный ресурс] / Выдавецтва «Навуковы свет», Научно-издательский центр «Мир науки». – Электрон.текст. данн. (5,14 Мб.). – Минск: Выдавецтва «Навуковы свет», 2017.

Публикации. Основное содержание данного диссертационного исследования изложено в 9 публикациях, 3 из которых представлены в научных журналах, входящих в список рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, вывода, списка используемой литературы и приложения. Общий объем работы составил 196 страниц, включая 33 рисунка и 37 таблиц, список литературы содержит 105 источников. Приложение к работе содержит 62 страницы машинописного текста с 19 иллюстрациями и 31 таблицей.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы и положения, выносимые на защиту, сформулированы основные цели, задачи исследования, представлены методы их решения.

Кратко излагается содержание диссертации.

В первой главе рассматриваются особенности объекта управления – технологическая безопасность. На основе теоретико-множественного подхода даётся определение понятия технологической безопасности, рассматриваются основные проблемы и подходы к обеспечению безаварийной работы непрерывных технологических процессов промышленного производства. Выполнен анализ математических моделей и инструментальных средств, используемые в задачах моделирования безопасности технологических систем.

Формализованное концептуальное представление оценки технологической безопасности T_s^k может быть представлено в следующем виде:

$$T_s^k = \langle D^{k-1} (D^{k-2}, \dots), U^k (U^{k-1}, \dots), R, B^k (B^{k-1}, \dots), A \rangle$$

где: k – моменты времени оценки состояний; D^k – множество опасностей; U^k – множество управлений, направленных на устранение опасности; $R \subseteq D \times D \times U$ – отношения на множестве опасностей и управлений; B^k – множество оценок уровня безопасности, (например, это может быть интервалом $[0,1]$); A – семейство алгебраических операций. Для реального технологического процесса множества D и U конечные и счётные.

В настоящее время существует много различных подходов к решению проблемы диагностирования состояний. Это следующие модели: логико-вероятностные модели; модели нечёткой логики; байесовские модели; причинно-следственные модели; модели пространства состояний; интервальные параметрические модели; дискретные модели.

Нечёткий характер критериев выбора при проведении процедур диагностики состояний промышленных технологий, приводит к тому, что во многих случаях оказывается невозможным построение адекватной математической модели управления технологической безопасностью. Эта особенность задач данного типа приводит к необходимости использования экспертных оценок, которые часто оказываются единственной информацией для принятия решений. Вследствие этого, возникает необходимость разработки методов, позволяющих эффективно получать и обрабатывать нечёткую экспертную информацию. Одним из таких методов является метод разделения состояний, позволяющий проводить анализ состояний системы в условиях неопределенности информации о диагностируемом объекте.

В данной работе предлагается развитие этого метода в области оценки без-

опасности технологических процессов и поиска альтернатив поведения системы на основе теории нечётких множеств.

В заключении рассмотрена технология производства неконцентрированной азотной кислоты и сформулированы задачи, решаемые в данной работе.

Вторая глава посвящена исследованию теоретических вопросов управления технологическими процессами в условиях неопределённости. Рассмотрены концептуальные и математические основы построения модели оценки рисков потенциально опасных технологических процессов в условиях неопределенности. Сформулировано определение области и центра технологической безопасности химико-технологического процесса. Для количественной оценки безопасности процесса введены понятия уровня технологической безопасности, уровня урона и уровня риска. Все эти уровни характеризуются как степень нечёткого равенства состояния технологического процесса в данный момент времени (текущей ситуации) и состояния, соответствующего центру технологической безопасности процесса.

Обобщённая структура системы управления представлена на рисунке 1.

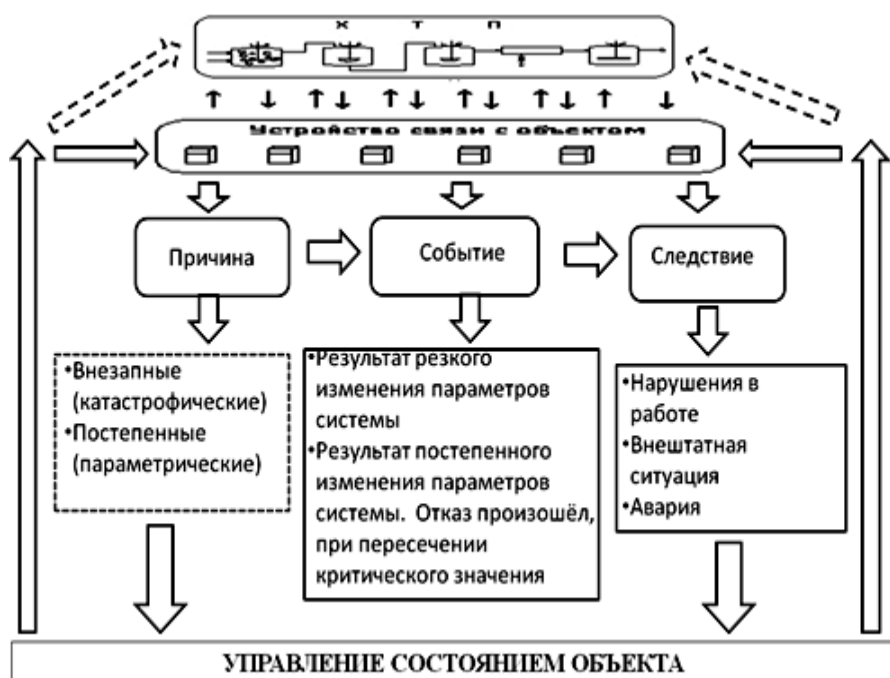


Рисунок 1 - Концептуальное представление системы управления технологической безопасностью

Методические принципы построения системы диагностики состояний, развиваемые в этой главе, опираются на понятие об-

ласти безопасного функционирования и центра безопасности объекта диагностики. Безопасность текущего состояния ХТП может быть оценена по индексу безопасности, который содержательно формулируется как степень удалённости текущего состояния процесса от центра безопасности, и вычисляется через степень включения текущей нечёткой ситуации в нечёткую ситуацию центра безопасности. Также во второй главе приводится методика определения области безопасно-

го функционирования на множестве состояний ХТП.

Для определения области технологической безопасности функционирования процесса для каждого из параметров в области его существования выделяются интервалы значений параметров, которые характеризуют определённые режимы работы технологии. Выбор недоминируемого интервала для области каждого параметра осуществлялся на основе нечёткого отношения предпочтения во множестве альтернативных интервалов. Прделав эту процедуру для всех технологических параметров процесса, получим набор интервалов, которые характеризуют состояние области центра безопасности:

$S_0 = \{\Delta t^1_0, \Delta t^2_0, ..., \Delta t^n_0\}$, Δt^i_0 – наиболее благоприятный интервал для i -го параметра.

Выделение центра технологической безопасности позволяет не только качественно, но и количественно оценить безопасное состояния процесса. Множество всевозможных ситуаций, возникающих в результате функционирования ХТП, может использовать соответствия между ситуацией и набором управляющих решений. Размер таблицы решений определяется числом ситуаций, которое, в свою очередь зависит от степени конкретизации значений, набора параметров, характеризующих данный ХТП.

Для определения центра безопасности в работе вводится лингвистическая переменная по каждому параметру технологического процесса – $\langle \beta_i, E_i, D_i \rangle$, где: β_i - название лингвистической переменной; $E_i = \{E^1_i, E^2_i, ..., E^{M_i}_i\}$ - терм-множество лингвистической переменной β_i ; D_i - базовое множество лингвистической переменной β_i . Каждому элементу терм-множества E_i , ставится в соответствие своя функция принадлежности (рисунок 2.). Для каждого параметра на основе экспертной информации определяется центр безопасности в области безопасного функционирования.

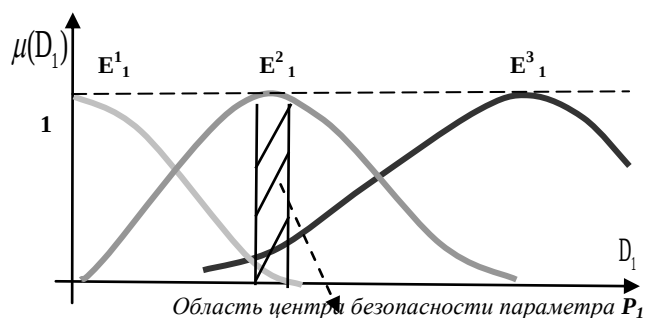


Рисунок 2 - Функции принадлежности лингвистической переменной $\langle \beta_i, T_i, D_i \rangle$

Множество, состоящее из набора лингвистических переменных β_i , нечётко определяет некоторое состояние технологического процесса, которое определяет нечёткую ситуацию. То есть нечёткой ситуацией является множество, состоящее из лингвистических переменных, пред-

ставляющих параметры ХТП.

Для определения индекса безопасности ХТП в качестве типовой нечёткой ситуации необходимо определить нечёткую ситуацию, которая характеризует центр безопасности. Обозначим эту ситуацию $\mathcal{S}_0$. Для определения индекса безопасности для текущего состояния процесса необходимо сравнить на нечёткое равенство входную нечёткую ситуацию $\mathcal{S}_0^*$ с нечёткой ситуацией, которая характеризует центр безопасности $\tilde{\mathcal{S}}_0$. При этом степень нечёткого равенства: $In(\mathcal{S}_0^*)_{\mathcal{S}_0} = \nu(\mathcal{S}_0^*, \mathcal{S}_0) \& \nu(\mathcal{S}_0, \mathcal{S}_0^*)$ и покажет величину, определенную как индекс безопасности ХТП ($\nu(\mathcal{S}_0^*, \mathcal{S}_0)$ и $\nu(\mathcal{S}_0, \mathcal{S}_0^*)$ - степень нечёткого включения $\mathcal{S}_0^*$ в $\mathcal{S}_0$ и $\mathcal{S}_0$ в $\mathcal{S}_0^*$).

$\nu(\mathcal{S}_0^*, \mathcal{S}_0)$ определяется выражением:

$$\begin{aligned} \nu(\mathcal{S}_0^*, \mathcal{S}_0) &= \bigwedge_{y_p \in Y} \nu(\mu_{s_i}(y_p), \mu_{s_j}(y_p)) = \\ &= \bigwedge_{T_k^p \in T^p} \nu(\mu_{\mu_{s_i}(y_p)}(T_k^p) \Rightarrow \mu_{\mu_{s_j}(y_p)}(T_k^p)), \end{aligned}$$

где $\mu_{s_i}(y_p)$ - функция принадлежности.

Индекс риска. В работе количественная оценка, характеризующая удалённость текущей рабочей точки процесса S^* от центра безопасности S_0 , учитывающая как параметры технологического процесса, так и ущербы, определена как индекс риска (внезапные отказа аппаратного оформления и системы управления). Под индексом риска принята следующая двойка:

$In_{Risk}(\tilde{S}^*) = \{ In(\tilde{S}_p^*), In(\tilde{S}_d^*) \}$. Для определения индекса риска текущего состояния процесса необходимо сравнить на нечёткое равенство входную нечёткую ситуацию $\mathcal{S}^*$ с нечёткой ситуацией, которая характеризует центр безопасности $\mathcal{S}_0$. При этом степень их нечёткого равенства будем называть индексом риска технологического процесса: $In_{Risk}(\mathcal{S}^*) = \nu(\mathcal{S}^*, \mathcal{S}_0) \& \nu(\mathcal{S}_0, \mathcal{S}^*)$,

где $In_{Risk}(\mathcal{S}^*)$ – индекс риска текущего состояния технологического процесса. Заметим, что индекс риска достигает своего минимального значения при совпаде-

нии рабочей точки процесса с центром технологической безопасности $B(\mathcal{S}_0) = 0$. При удалении рабочей точки процесса от ЦТБ индекс риска увеличивается. При выходе рабочей точки из области регламентного (безопасного) состояния, либо при достижении одной из границ этой области $In_{Risk}(\mathcal{S}^*) = 1$.

Введение индекса технологической безопасности и индекса риска связано с необходимостью учёта двух типов отказов. Один тип отказов связан с необходимостью учёта постепенных отказов, другой тип отказов – внезапные отказы.

Процесс протекает в области технологической безопасности, если его индекс риска не выходит за пределы некоторой величины l ($l \in [0,1]$), называемой границей технологической безопасности процесса по технологическим параметрам и ущербам $In_{Risk}(\tilde{S}^*) \leq l$. Для организации управления технологической безопасностью необходимо сформировать процесс получения достоверных сведений о технологических параметрах и ущербах в условиях неопределенности. С целью снижения влияния неопределенности следует объединить всю располагаемую информацию, представленную как накопленной статистикой, так и экспертными оценками.

Третья глава посвящена рассмотрению вопросов, связанных с построением системы диагностики состояний.

В целом процесс селективной очистки достаточно хорошо автоматизирован. В составе системы управления функционируют следующие контуры автоматического регулирования:

1. Регулирование соотношения расходов воздуха и газообразного аммиака, поступающих в смеситель. Это одна из основных схем автоматизированного регулирования, определяющая нагрузку на агрегат и поддерживающая безопасную концентрацию аммиака в аммиачно-воздушной смеси. Ведущим параметром является расход воздуха. В схеме предусмотрена коррекция расхода аммиака по температуре под сетками контактного аппарата.

2. Регулирование разности температур на выходе из реактора селективной очистки и входе в реактор путем изменения подачи газообразного аммиака в камеру сгорания.

Общая функциональная схема автоматизации узла селективной очистки производства неконцентрированной азотной кислоты приведена на рисунке 3.

На основе анализа технологического процесса были определены требования

к режимным параметрам узла селективной очистки газов, состоящим из реактора и газотурбинного агрегата (ГТТ-3), которые обеспечивают наилучшие условия рекуперации энергии и предельно возможное для этого узла значение показателя степени использования энергоресурсов.

Анализ этих требований, провёл к необходимости создания двухконтурной системы автоматического управления температурным режимом работы реактора очистки.

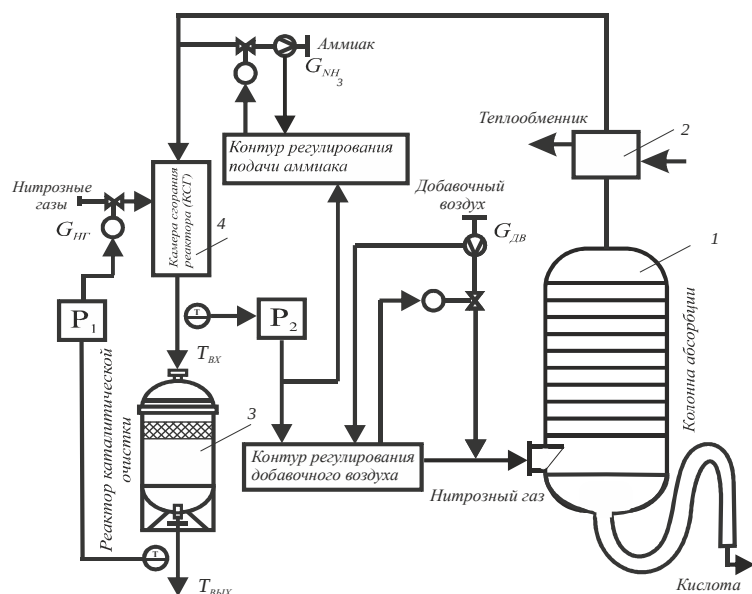


Рисунок 3 - Фрагмент технологической схемы с аппаратурой, определяющей работу узла селективной очистки

Структурно взаимовлияние названных управляемых и управляющих переменных может быть представлено как показано на рисунке 4.

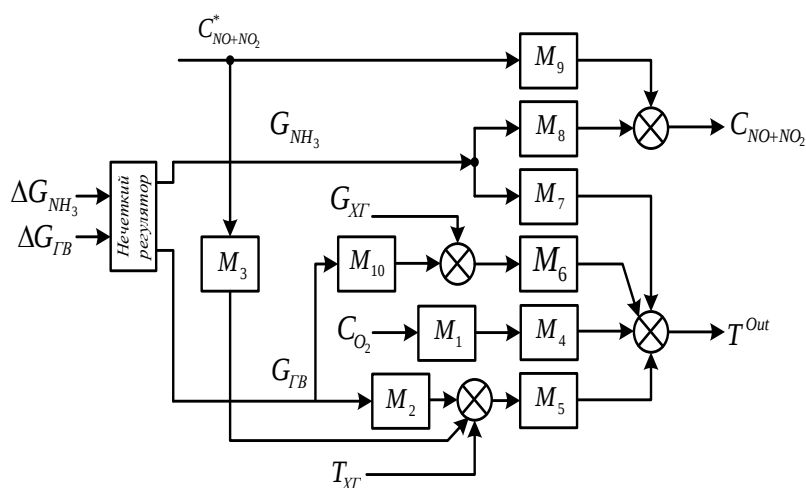


Рисунок 4 - Структурная схема САУ селективной очистки

Подачу аммиака на реакцию и добавочного воздуха в колонну абсорбции, следует осуществлять в определённом соотношении. Это обычно достигается введением регулятора соотношения на этих потоках. Отсюда следует, что реально существуют лишь два независимых управляющих воздействия – подача хвостовых газов в камеру сгорания реактора (воздуха) и подача аммиака в определённом соотношении для получения восстановителя.

Таким образом, в задаче управления имеется две управляемые ($T_{вх}$ и $T_{вых}$) и

две управляющие переменные, оказывающие друг на друга взаимное влияние.

Анализ свойств описанного объекта управления позволил сделать вывод, что температуру газов на выходе из реактора целесообразно стабилизировать с помощью изменения подачи NH_3 смеси в камеру сгорания реактора и воздуха. Поддержание необходимой температуры газа на входе в реактор, позволяющее максимизировать разность температур газа на входе и выходе реактора, рационально осуществлять с помощью изменения количества подаваемого на реакцию аммиака и воздуха.

По результатам экспериментального исследования были получены необходимые математические модели для синтеза системы управления узла селективной очистки. Определение настроек технологических регуляторов осуществлялось средствами пакета MatLab. Сводка результатов имитационного моделирования приводится в работе (использовался блок линейного анализа). Адекватность построенной модели оценивалась на основе статистических данных о работе узла селективной очистки газов ОАО «Новомосковская акционерная компания «АЗОТ». Оценка проводилась на основе схемы, представленной на рисунке 5. Можно отметить, что предлагаемые модели системы управления, построенные на основе нечётких моделей и MPC регуляторов, допускают отклонения по $M(x)$ и $D(X)$ основных параметров процесса составляют не более 5-10 %. Исходя из полученных результатов, необходимо отметить, что целесообразно строить систему управления на основе MPC регулятора и нечёткого регулятора.

В четвертой главе рассматривается разработка нечёткой математической модели узла селективной очистки газов для производства неконцентрированной азотной кислоты учитывающая постепенные отказы.

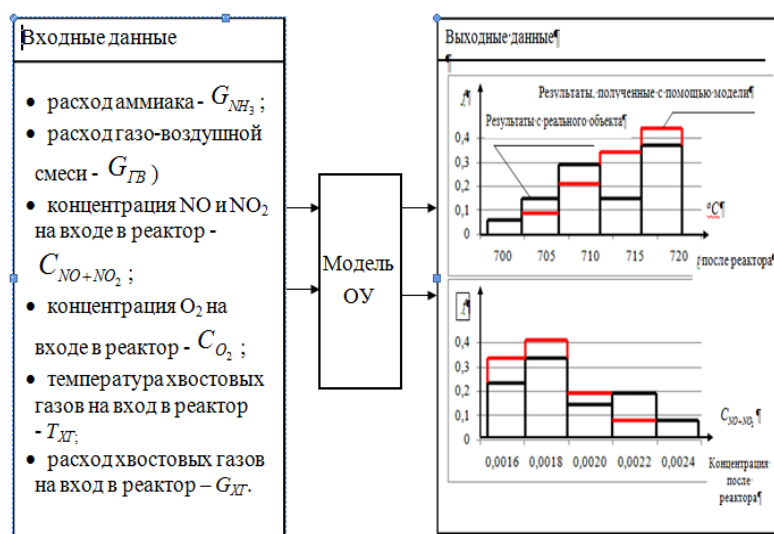


Рисунок 5 - Схема имитационного моделирования

Влияние постепенных отказов осуществлялось через изменение значений коэффициентов в математических моделях в зависимости от нагрузки по добавочному аммиаку и воздуху.

Проведено исследование полученной модели системы управления.

В пятой главе осуществлён синтез системы управления процессом, в которой учитывалось влияние постепенных и внезапных отказов.

Обобщённая структура системы управления приведена на рисунке 6.

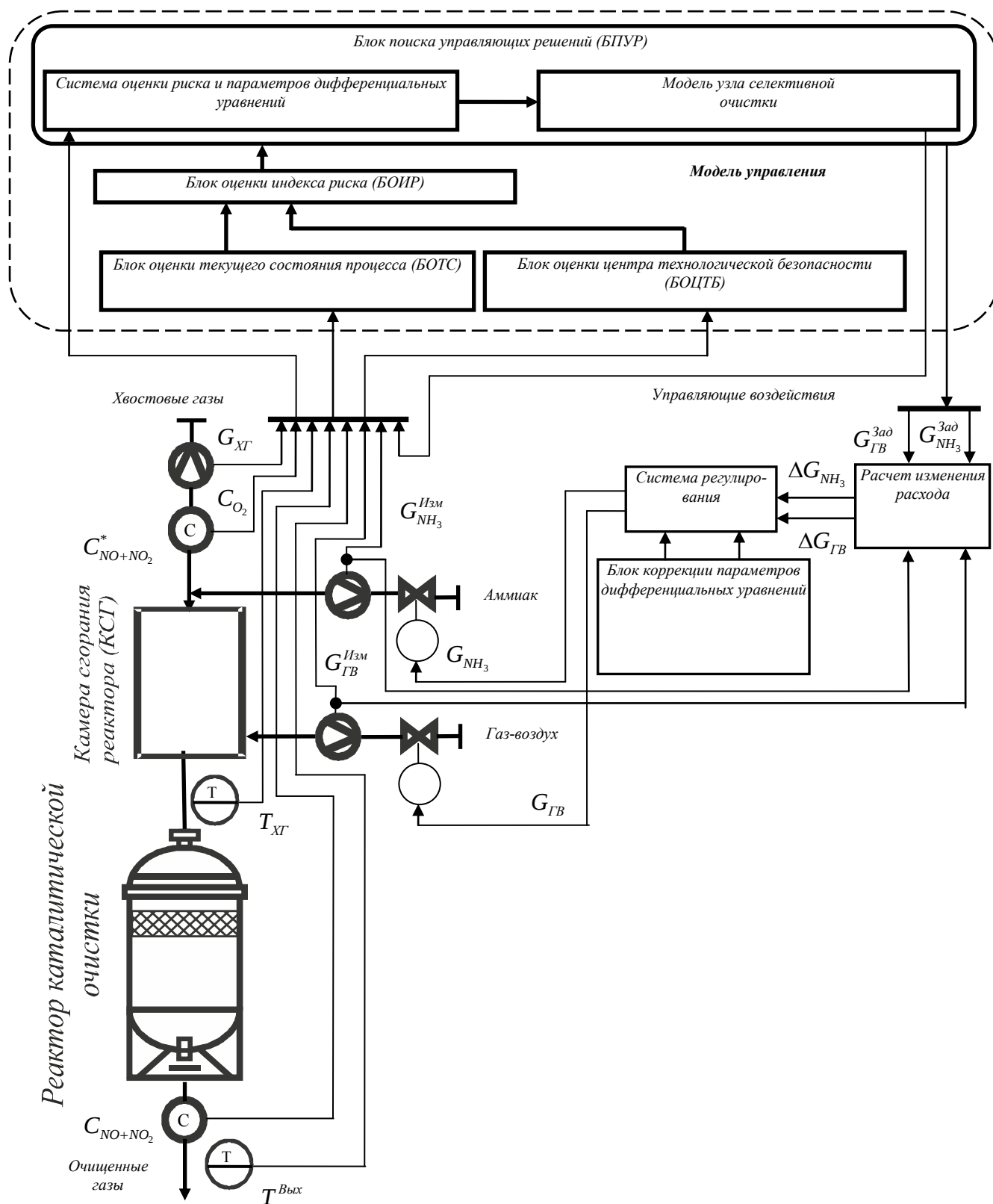


Рисунок 6 - Функциональная схема системы управления

В главе описаны результаты применения регулятора с предсказанием. Производительность контроллеров для случая ММО смоделирована с помощью MATLAB. Этапы работы системы управления технологическим процессом представлены на рисунке 7.

С помощью модели КИХ ℓ_2 регуляризованную задачу отслеживания выхода с входными ограничениями сформулировали следующим образом:

$$\min_{\{z,u\}} f = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \| \text{Ind}(z_{k+1}) - \text{Ind}^{zd}(r_{k+1}) \|_{Q_z}^2 + \| \Delta u_k \|_S^2 \quad (1)$$

где

$$z_k = b_k + \sum_{i=1}^n H_i u_{k-i} \quad k=1, \dots, N \quad (2)$$

$$u_{\min} \leq u_k \leq u_{\max} \quad k=0, \dots, N-1 \quad (3)$$

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u_k \leq \Delta u_{\max} \quad k=0, \dots, N-1 \quad (4)$$

$$z_k \leq z_{\max} + \eta_k \quad k=1, \dots, N \quad (5)$$

$$z_k \geq z_{\min} - \eta_k \quad k=1, \dots, N \quad (6)$$

При этом $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$ и Q_z, S – это веса регуляризации, а $\|z_{k+1} - r_{k+1}\|_{Q_z}^2$ является общим представлением норм метода наименьших квадратов по весу. Модель реализации системы управления в среде МатЛаб представлена на рисунке 7.

$\text{Ind}_{mn}^R, \text{Ind}_{cy}^R, \text{Ind}_{ob}^R$ – индексы риска технологического процесса, системы управления и оборудования.

$\text{Ind}(z_{k+1}), \text{Ind}^{zd}(r_{k+1})$ – расчетные значения риска работы технологии, заданные значения риска.

Управляющими переменными являются:

- подача аммиака (G_{NH_3}) в реактор, что определяет количество восстановителя в реакторе очистки;
- подача добавочного воздуха ($G_{ДВ}$) в колонну абсорбции, что определяет концентрацию кислорода перед реактором очистки, а значит, степень конверсии аммиака в реакторе.

Регулируемые параметры:

- температура газа на входе в реактор селективной очистки ($T_{ex.}$).
- температура на выходе из реактора селективной очистки ($T_{вых.}$).

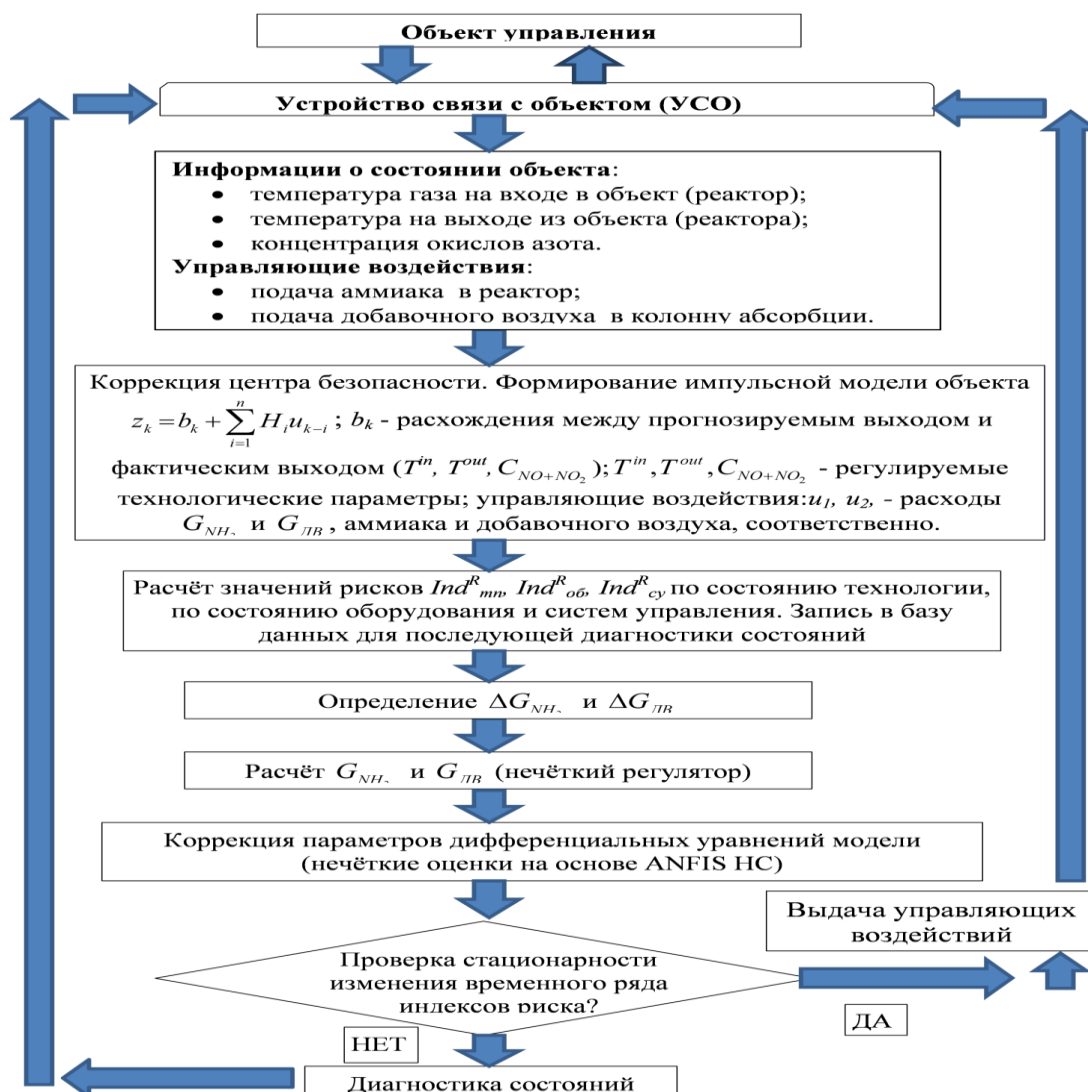


Рисунок 7 - Модель реализации системы управления в среде МатЛаб

Обобщённый алгоритм работы системы

1. Собираются данные с объекта.
2. Осуществляется коррекция точки центра безопасности.
3. Назначается $Ind^{zd}(z_{k+1})$ - уставка для регулятора в соответствии с режимом работы.
4. Обновляется импульсная нечёткая модель.
5. Осуществляется шаг в направлении $Ind^{zd}(z_{k+1})$ и по переменным состояния определяется индекс технологической безопасности для прогнозного $k+1$ интервала времени $Ind(z_{k+1})$.
6. Выполняется запись индексов безопасности в базу данных для последующей диагностики состояния процесса и его оборудования.
7. Если изменение временного ряда стационарно – выполняется выдача управляющих воздействий (Рисунок 7).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведено исследование теоретических и прикладных вопросов оценки свойств безопасности сложных промышленных производств, с целью создания системы ситуационного управления технологическим процессом.
2. Разработана методика построения нечётко-определённых моделей, включающих идентифицирующую, прогнозную и нечёткую составляющие.
3. Предложено в качестве критерия управления технологическим процессом использовать индекс риска.
4. Разработаны алгоритмы и программы управления, учитывающие неопределённость информации о параметрах технологического процесса.
5. Разработан комплекс программ для управления технологической безопасностью процесса селективной очистки газов.
6. Проведена апробация разработанной системы управления на примере адаптивной системы ситуационного управления технологическим процессом селективной очистки газов.
7. Проведена оценка качества разработанной системы управления.

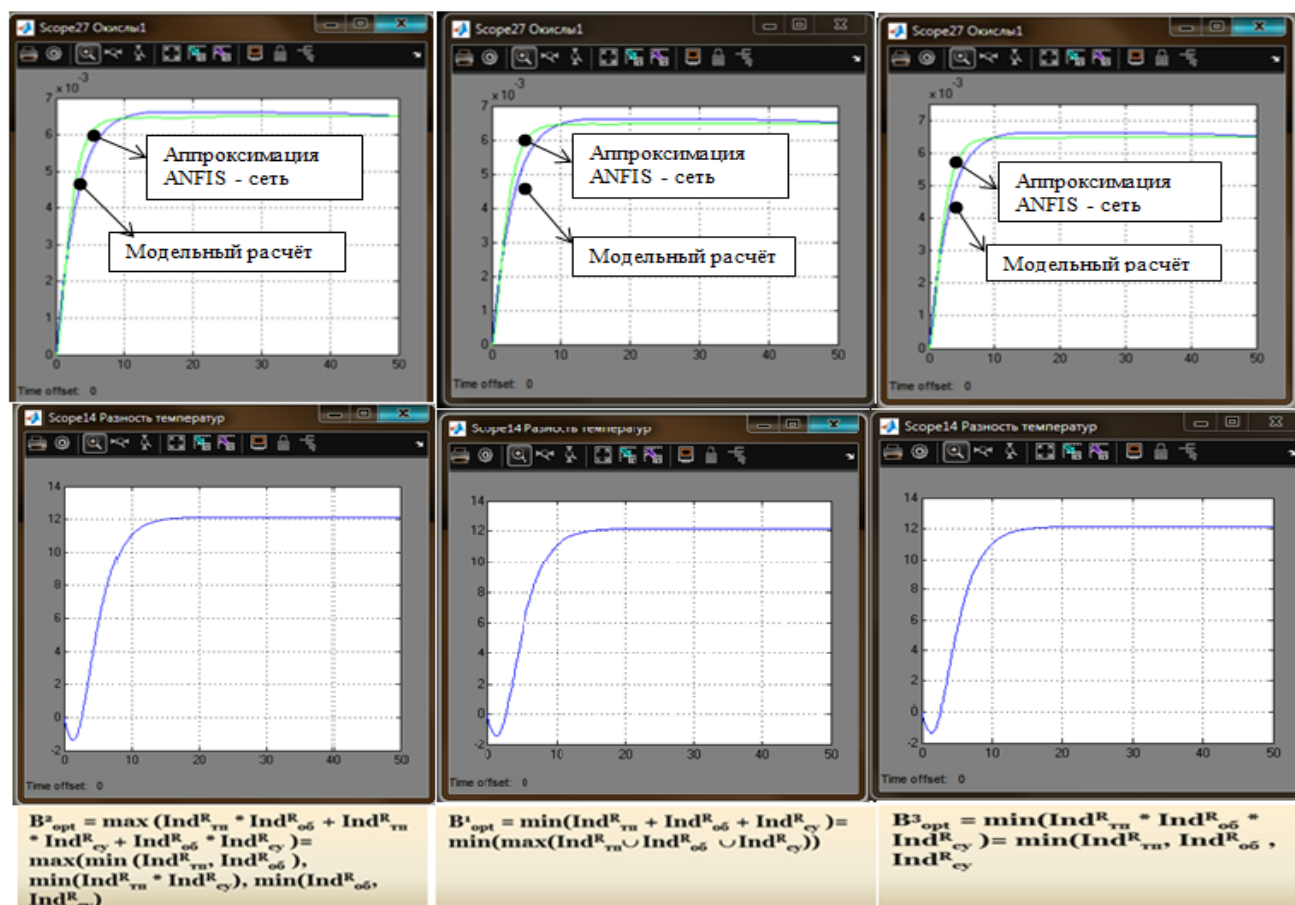


Рисунок 8 - Результат исследования динамических характеристик системы управления с MPC регуляторами

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, включенных в список ВАК:

1. Бакасов С.Р., Кириллов И.Е., Тоичкин Н.А., Пророков А.Е., Богатиков В.Н. Построение систем обеспечения безопасности на основе нечётко-определённых дискретных моделей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 12. Часть 1. Тула: Издательство ТулГУ, 2017. С. 48 – 54. https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2017_12_part_1&year=2017

2. Diallo A.B., Dim D.T., Bakasov S.R., Bogatikov V.N/ Implementing "method of successive concessions" in selecting the optimal variant to protect a corporate network. Вестник евразийской науки, 2018, №1, Том 10 (<https://esj.today>). URL статьи: <https://esj.today/PDF/25ECAVN118.pdf>

3. Диалло Амаду Бойе, Дим Дике Терфа, Бакасов С.Р., Пророков. А.Е., Богатиков В.Н. Исследование информационных рисков безопасной работы электролизёра на основе нечётких цепей Маркова. Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. Том 22, № 5, 2018. С. 75-83.

Прочие статьи, доклады и тезисы докладов на конференциях:

4. Бакасов, С. Р. Субъективно-рациональные методы принятия решения в задачах управления безопасностью техногенных систем // С. Р. Бакасов, А. Е. Пророков, В.Н. Богатиков, Г.П. Виноградов // Транспорт и логистика: инновационное развитие в условиях глобализации технологических связей. СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ. Рост. Гос. ун-т. путей сообщения. Ростов- н/Д, 2017. С. 54 – 59

5. Проектирование системы автоматизации процесса окислительного пиролиза / Г. Н. Санаева, А. Е. Пророков, В. Н. Богатиков, С. Р. Бакасов // Современные сложные системы управления HTCS'2018: сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции / под общ. ред. Ю. И. Еременко. — Москва: ИПУ РАН; Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС; Старый Оскол: ТНТ, 2018. — С. 185–188.

6. Определение центра технологической безопасности процесса каталитической очистки газов производства слабой азотной кислоты / Пророков А.Е., Бакасов С.Р., Борисов А.Л., Кемайкин В.К. // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. 2017. С. 31-42.

7. Алгоритм оценки текущей нечёткой ситуации управления технологическим процессом каталитической очистки газов производства слабой азотной кислоты / Пророков А.Е., Бакасов С.Р., Богатиков В.Н., Ключин А.Ю. // В сборнике: Теоретические и практические аспекты развития современной науки материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. 2017. С. 28-35.

8. Модель оценки качества системы ситуационного управления технологическим процессом каталитической очистки газов производства слабой азотной кислоты /Пророков А.Е., Бакасов С.Р., Борисов А.Л., Лопатин А.Г. // В сборнике: Новая наука: современное состояние и пути развития Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции [Электронный ресурс]. Под общей редакцией А.И. Вострецова. 2017. С. 56-63.

9. Модель оценки качества системы ситуационного управления технологическим процессом каталитической очистки газов производства слабой азотной кислоты / Пророков А.Е., Бакасов С.Р., Борисов А.Л., Лопатин А.Г. // В сборнике: Новая наука: современное состояние и пути развития Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции [Электронный ресурс]. Под общей редакцией А.И. Вострецова. 2017. С. 56-63.