

На правах рукописи



Ганджа Тарас Викторович

РАЗВИТИЕ МЕТОДА КОМПОНЕНТНЫХ ЦЕПЕЙ
ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Специальность 05.13.18
Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Томск-2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный консультант – **Дмитриев Вячеслав Михайлович,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Горюнов Алексей Германович,** доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой электроники и автоматики физических установок Национального исследовательского Томского политехнического университета

Каледин Валерий Олегович, доктор технических наук, профессор кафедры математики и математического моделирования Новокузнецкого института (филиала) Кемеровского государственного университета

Муравьева Елена Александровна, доктор технических наук, зав. кафедрой автоматизированных технологических и информационных систем Уфимского государственного нефтяного университета, филиала в г. Стерлитамак

Ведущая организация – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва

Защита состоится 14 декабря 2017 года в 15 часов 15 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.02, ТУСУРа по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте <https://tusur.ru/urls/lxag8k58> и в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146.

Автореферат разослан _____ 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Зайченко Татьяна Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. При добыче, переработке и использовании природного газа или его отдельных компонентов (веществ) находят широкое применение сложные технические управляемые системы (СТУС). Входящие в них химико-технологические системы (ХТС) допускают декомпозицию на взаимосвязанные элементы, между которыми под наблюдением устройства управления (УУ) протекают мультифизические энергетические и многокомпонентные вещественные потоки. Принцип действия УУ основан на получении, численной обработке и визуализации данных измерения наблюдаемых переменных ХТС и выработке на их основе управляющих воздействий на исполнительные устройства. В отличие от обычных алгоритмов, алгоритм функционирования УУ, называемый далее *алгоритмом управления*, представляет собой несколько параллельных цепочек обработки поступающих данных и получения управляющих воздействий. При его выполнении могут быть задействованы различные средства интеллектуализации: базы данных (БД), базы знаний (БЗ), нейронные сети, компьютерные модели и т.п.

Взаимодействие ХТС, представляющих собой совокупность элементов и аппаратов химической технологии, с УУ осуществляется исполнительными и измерительными устройствами. В ХТС происходят изменения физических свойств (давления и температуры), а также фазовые переходы и химические преобразования некоторых веществ, именуемых далее *компонентами потока*, каждый из которых характеризуется своей концентрацией.

Для автоматизации решения задач научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического характера, а также для проведения учебных экспериментов, целесообразным является использование компьютерных моделей (КМ) СТУС, адекватно описывающих протекающие в реальной системе процессы. Наличие энергетических обратных связей, зависимость коэффициентов уравнений математических моделей ХТС от гидравлических и термодинамических характеристик, концентраций и параметров компонент потока усложняют процессы реализации их моделей и проведения вычислительных экспериментов (ВЭ). Кроме них КМ СТУС должны включать в себя функциональные модели, адекватно описывающие алгоритмы проведения всех этапов ВЭ и работу УУ, а также развитые панели визуализации результатов и интерактивного изменения значений параметров модели. Интеграция КМ с реальными объектами и их устройствами управления позволит поддерживать модели ХТС в адекватном реальному объекту состоянии и при необходимости применять к нему результаты ВЭ.

Применение КМ СТУС на основе автоматизации ВЭ открывает возможности для решения следующих задач:

- формирования структуры, выбора элементов ХТС и определения значений их параметров, при которых наблюдаются требуемые режимы его функционирования;
- выбора исполнительных устройств, оказывающих непосредственные энергетические воздействия на ХТС, пропорциональные информационным

сигналам УУ и предназначенные для перевода объекта из текущего в требуемое состояние;

- формирования и отладки алгоритмов управления, лежащих в основе работы УУ исследуемой СТУС;

- определения значений управляющих воздействий, позволяющих устанавливать в ХТС режимы, удовлетворяющие заданным требованиям;

- разработки и отладки алгоритмов функционирования SCADA-систем, обеспечивающих интеллектуальное управление ХТС с подключением компьютерных моделей объекта в контур его управления;

- разработки на основе КМ СТУС компьютерных учебных программ по различным техническим дисциплинам и сетевых компьютерных тренажеров операторов-технологов, деятельность которых направлена на управление протекающими в ХТС процессами с целью поддержания требуемых режимов функционирования.

Для решения обозначенного круга задач применяются различные комплексы программ автоматизации ВЭ с реализованными моделями и методами моделирования. Зачастую они предназначены для анализа объектов конкретной физической природы (HYSYS, ChemCAD и др.), не допускают интеграции друг с другом, а их механическое соединение не приносит желаемого эффекта с точки зрения автоматизации решения перечисленных задач.

Актуальность проводимого исследования обусловлена необходимостью разработки нового подхода к автоматизированному решению задач исследования и функционального проектирования сложных технических управляемых систем газовой промышленности, развития метода компонентных цепей, заключающееся в построении многоуровневых компонентных цепей и разработке на их основе комплекса программ автоматизации вычислительного эксперимента над СТУС. Для эффективного решения задач развитие метода компонентных цепей должно позволять формировать и анализировать многоуровневые компонентные цепи СТУС (КЦ СТУС), в которых математические модели ХТС объединены с имитационными моделями автоматизированных экспериментов и устройств управления, а также с визуальными моделями панелей визуализации и управления.

Степень разработанности проблемы

Вопросы развития фундаментальных основ методологии и технологии вычислительного эксперимента рассматривались Г.И. Марчуком, А.А. Самарским, П.В. Петровым, В.А. Целищевым и другими. Разработаны различные методы и основанные на них комплексы программ для моделирования гидравлических, тепловых, электрических, механических и электромеханических объектов, а также систем автоматического управления. Помимо этого разработаны комплексы алгоритмов и комплексов программ для моделирования химико-технологических систем, не допускающих подключение моделей элементов и средств управления, а также построения функциональных моделей УУ для целей исследования алгоритмов их работы.

Одним из универсальных методов компьютерного моделирования и автоматизации ВЭ над мультифизическими объектами является метод компонентных цепей (метод КЦ), который в 70-е годы предложен В.М. Дмитриевым и Е.А. Арайсом. Данный метод развит в работах Т.Н. Зайченко, А.В. Шутенкова, Ю.А. Журавского, Э.В. Балакиной, И.Я. Клепака, О.С. Затик и Т.Ю. Коротинной при непосредственном участии автора диссертации. В настоящее время он требует своего развития и адаптации к компьютерному моделированию химико-технологических систем, что является важной народно-хозяйственной задачей для предприятий газовой промышленности.

Цель и задачи исследования: Развитие метода компонентных цепей для автоматизации решения задач исследования и функционального проектирования сложных технических управляемых систем и реализация на его основе комплекса программ моделирования химико-технологических систем.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Формирования формализованного представления сложных технических управляемых систем и математическая постановка задач их исследования на базе нового подхода к автоматизированному решению задач путём проведения вычислительного эксперимента над компьютерными моделями СТУС, включающими математические модели химико-технологических систем, имитационные (функциональные) модели устройств управления и визуальные модели панелей визуализации и управления экспериментом.

2. Построения многоуровневой компонентной цепи СТУС из трех взаимосвязанных уровней – объектного, логического и визуального, и разработки графического языка многоуровневых компонентных цепей, включающего три подязыка: язык химико-технологических систем, язык моделирования алгоритмических конструкций и язык виртуальных инструментов и приборов, и реализации их программно-алгоритмического аппарата.

3. Формирования графических нотаций языка моделирования химико-технологических систем, предназначенного для формирования их моделей на объектном уровне многоуровневой компонентной цепи. Разработки алгоритмов автоматизированного формирования и численного анализа вычислительных моделей ХТС с неоднородными векторными связями, обеспечивающими протекание между их компонентами информационных, мультифизических энергетических и многокомпонентных вещественных потоков, со встроенными в эти алгоритмы численными методами расчета характеристик многокомпонентных вещественных потоков.

4. Разработки структуры универсального вычислительного ядра и реализации в нем новых численных методов явно-неявного анализа, основанных на непосредственном определении значений единственной неопределенной переменной на этапе формирования уравнений для целей обеспечения повышения его быстродействия при анализе вычислительных моделей с неоднородными векторными потоками.

5. Разработки нотаций языка моделирования алгоритмических конструкций для построения имитационных алгоритмов проведения автоматизированных экспериментов с возможностями численной обработки результатов анализа моделей ХТС и интерактивного изменения значений параметров модели. Формирование системы отображения лексем языка моделирования алгоритмических конструкций в формат алгоритмических компонентных цепей.

6. Построения и исследования языка виртуальных инструментов и приборов, представленного набором визуальных компонентов для формирования на визуальном уровне многоуровневой компонентной цепи СТУС лицевых панелей приборов, к классу которых относятся панели визуализации результатов и интерактивного управления вычислительным экспериментом.

7. Формирования и реализации многоуровневой структуры библиотеки моделей компонентов, обеспечивающей хранение и использование компонентов трех подязыков языка многоуровневого компьютерного моделирования, а также создания программно-алгоритмических средств – генератора моделей компонентов, предназначенного для формирования программно-алгоритмического кода компонентов, и интерактивных панелей, оснащенных редактором математико-алгоритмических конструкций для автоматизации исследования новых моделей компонентов.

8. Разработки комплекса программ «Среда моделирования химико-технологических систем», основанного на развитии метода компонентных цепей и предназначенного для автоматизации вычислительных экспериментов над СТУС, а также его апробация на задачах научно-исследовательского, производственного и учебного характера.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются химико-технологические системы с многокомпонентными вещественными потоками в связях, взаимодействующие с устройством управления посредством измерительных и исполнительных устройств. *Предмет исследования:* методы, численные алгоритмы и комплекс программ моделирования химико-технологических систем.

Методологическая, теоретическая и эмпирическая база исследования. Методологической основой исследований является метод компонентных цепей, предложенный профессором В.М. Дмитриевым и Е.А. Арайсом. При решении поставленных задач, направленных на его развитие и многоуровневую интерпретацию для целей моделирования химико-технологических систем, применялись методы системного анализа, теории управления, математического, имитационного и визуального моделирования, теории графов. При построении компьютерных моделей ХТС применялись методы системного анализа объектов и процессов химической технологии, предложенные В.В. Кафаровым. Реализация новых численных методов явно- неявного анализа компьютерных моделей химико-технологических систем основана на алгоритмах неявного анализа, реализованных в рамках вычислительного ядра системы MAPC. Практическая реализация комплекса про-

грамм выполнялась с применением методов структурного и объектно-ориентированного программирования, унифицированного языка моделирования UML, языка программирования Visual C++.

Научная новизна диссертации заключается в том, что:

В области математического моделирования:

– предложен и обоснован новый подход к автоматизированному решению задач исследования и функционального проектирования сложных технических управляемых систем, заключающийся в многократном проведении вычислительного эксперимента над компьютерными моделями ХТС при варьировании значений параметров их компонентов согласно сценарию решения задачи, формируемому пользователем в графическом виде и связанному с графической панелью визуализации и интерактивного управления параметрами исследуемой модели (п. 5 паспорта специальности – комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента);

– осуществлено развитие метода компонентных цепей, открывшее возможности формирования и анализа многоуровневых компонентных цепей химико-технологических систем, которые помимо математических моделей аппаратов химической технологии с неоднородными векторными связями содержат имитационные модели сценариев проведения вычислительных экспериментов, включающие функциональные модели устройств управления, и визуальные модели панелей визуализации и интерактивного управления. (п. 1 паспорта специальности – разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений).

– сформирован новый язык виртуальных инструментов и приборов, представленный набором визуальных компонентов с едиными программно-алгоритмическими принципами их функционирования и обеспечивающий формирование и моделирование виртуальных приборов, обладающих визуальными панелями отображения результатов и интерактивного управления параметрами модели. В отличие от моделей, построенных в других системах, нелинейные модели виртуальных приборов не входят в общую систему уравнений исследуемой ХТС, что позволяет включать в них блоки численно-алгоритмического анализа результатов моделирования с целью их подготовки к визуализации. За счет такого разделения модели увеличивается точность расчета значений первичных переменных модели ХТС и значительно расширяются возможности численно-алгоритмической обработки результатов моделирования (соответствует п. 8 паспорта специальности – разработка систем компьютерного и имитационного моделирования).

В области численных методов:

– Предложен схемотехнический язык моделирования химико-технологических систем и разработаны программно-алгоритмические средства в виде интерпретатора языка ХТС и универсального вычислительного ядра. В основу их работы положены новые алгоритмы формирования вычис-

лительной модели ХТС с неоднородными векторными связями и новый численный метод ее явно-неявного анализа, основанный на непосредственном определении значений единственной неопределенной переменной, входящей в уравнение, на этапе их формирования. Повышение быстродействия алгоритма обеспечивается снижением общего числа элементарных операций, выполняемых в ходе формирования и решения неполной системы уравнений, а повышение его точности основано на отсутствии необходимости задания начальных условий (п. 4 паспорта специальности – разработка эффективных численных методов и алгоритмов в виде программно-ориентированных программ для проведения вычислительных экспериментов).

В области комплексов программ:

– сформированы лексемы и грамматические правила языка моделирования алгоритмических конструкций, отличительным признаком которого является возможность построения функциональных моделей устройств управления и имитационных моделей сценариев проведения экспериментов, включающих этапы первичной и циклической параметризации моделей ХТС, получения и численной обработки результатов их анализа. Предложена и реализована система отображения лексем языка моделирования алгоритмических конструкций в формат алгоритмических компонентных цепей, взаимосвязанных с моделью ХТС, и реализован алгоритм передачи сообщений с данными различных типов между компонентами логического уровня многоуровневой компонентной цепи СТус (п. 7 паспорта специальности – разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели)

– сформирована структура и разработан комплекс программ «Среда моделирования химико-технологических систем», основанный на развитии метода компонентных цепей. В отличие от существующих комплексов программ он включает в себя построенные на единых принципах метода компонентных цепей и объектно-ориентированного программирования средства математического, имитационного и визуального моделирования, обеспечивающие решение задач исследования и функционального проектирования сложных технических управляемых систем предприятий газовой промышленности (п. 4 паспорта специальности – реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплекса проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента).

– предложена и спроектирована новая многоуровневая структура библиотеки моделей компонентов. Основанная на принципах объектно-ориентированного программирования, она позволяет хранить и использовать в многоуровневых компонентных цепях компоненты трех подязыков языка многоуровневого компьютерного моделирования. Для автоматического формирования и исследования новых моделей компонентов реализованы интерактивные панели, содержащие в своем составе редактор математико-алгоритмических конструкций для ввода модели, и «Генератор моделей компонентов», обеспечивающий автоматизацию формирования программного

кода моделей с целью их добавления в библиотеку моделей компонентов (п. 3 паспорта специальности – разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий).

Теоретическая значимость. Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что в ней решена крупная народнохозяйственная задача создания нового подхода к автоматизированному решению задач исследования и функционального проектирования сложных технических управляемых систем газовой промышленности. Ее решение достигнуто путем теоретического развития метода компонентных цепей и реализации на его основе комплекса программ моделирования химико-технологических систем. На базе предложенной структуры многоуровневой компонентной цепи предложены и разработаны современные компьютерные учебные программы и сетевые компьютерные тренажёры операторов-технологов газовой промышленности.

Теоретическая значимость результатов диссертации также состоит в развитии методов компьютерного моделирования сложных технических управляемых систем, обеспечивающих одновременное моделирование непрерывных процессов, протекающих в ХТС, и дискретно-событийных процессов, описывающих сценарии проведения экспериментов и наблюдаемых в устройствах управления. Предложенные в диссертации принципы и методики построения многоуровневых компонентных цепей ХТС, а также реализованные графические языки их формирования и программно-алгоритмический аппарат их анализа направлены на развитие общей теории моделирования. Разработанные новые численные методы явно-неявного решения систем уравнений обеспечивают повышение эффективности и быстродействия многовариантного анализа и параметрической оптимизации моделей химико-технологических систем.

Практическая значимость.

1. Предложенная многоуровневая компонентная цепь СТУС позволяет автоматизировать процессы исследования и функционального проектирования химико-технологических систем, а также формирования и отладки сценариев устройств управления.

2. В разработанном комплексе программ, интегрированном с реальным технологическим объектом, может быть построена интеллектуальная система управления, в которой компьютерная модель ХТС используется для анализа поведения объекта и выработки управляющих воздействий, позволяющих устанавливать и поддерживать желаемые режимы функционирования.

3. Результаты диссертационного исследования были использованы ОАО «ТомскНИПИНефть» при разработке сценариев функционирования автономных компьютерных тренажеров операторов в рамках исполнения договора В042316/0760Д на выполнение проектных работ по объекту «Обустройство Куюмбинского месторождения. Интегрированная автоматизированная система управления и безопасности (Фаза 1.1)»

4. В комплексе программ «Среда моделирования химико-технологических систем» в виде многоуровневой компонентной цепи была построена компьютерная модель стерилизатора для обработки наполненных растворами ампул, инструмента и одежды, используемого в федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-производственное объединение по медицинским иммунобиологическим препаратам «Микроген» министерства здравоохранения Российской Федерации в филиале ФГУП «НПО «Микроген» Минздрава России в г. Томск «НПО «Вирион».

5. Результаты диссертационного исследования были использованы ЗАО НПФ «Сибнефтекарт» при разработке программного обеспечения автоматизированных систем управления автозаправочными станциями и нефтебазами в части анализа процессов хранения, реализации и учета нефтепродуктов; разработки компонентов языка моделирования, построения и отладки алгоритмов управления технологическими объектами; визуализации результатов вычислительных экспериментов с элементами интерактивного управления параметрами.

6. На базе комплекса программ «Среда моделирования химико-технологических систем» разработаны виртуальные и реально-виртуальные лаборатории по различным техническим дисциплинам, внедрённые в учебный процесс национального исследовательского Томского политехнического университета, Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Оренбургского государственного университета и.

7. В системе виртуальных инструментов и приборов, входящей в состав разработанного комплекса программ, реализованы клиентские части имитационной динамической модели «Виртуальный промысел», для использования которых реализовано приложение «MARS-Engine», предназначенное для использования подготовленных многоуровневых компонентных цепей отдельно от «Среды моделирования химико-технологических систем». Имитационная динамическая модель «Виртуальный промысел», реализованная совместно с научными сотрудниками кафедры химической технологии топлива и химической кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, внедрена в процесс обучения и переподготовке специалистов ОАО «Томскгазпром».

Научные результаты, выносимые на защиту

1. Новый подход к автоматизированному решению задач исследования и функционального проектирования сложных технических управляемых систем позволяет автоматизировать решение задач их исследования и функционального проектирования путём многократного вычислительного эксперимента над многоуровневыми компонентными цепями с возможностями интерактивного варьирования значений параметров компонентов химико-технологических систем, численно-алгоритмической обработкой и визуализацией результатов их анализа.

2. Развитие метода компонентных цепей обеспечивает графическое построение и автоматизированное функционирование многоуровневых компо-

нентных цепей СТУС, представленных на трех взаимосвязанных уровнях с применением трех схмотехнических языков построения моделей: языка управляемых технологических объектов, языка моделирования алгоритмических конструкций и языка виртуальных инструментов и приборов. Структура многоуровневой компонентной цепи сложных технических управляемых систем допускает проведение многовариантного вычислительного эксперимента над СТУС с применением математических моделей ХТС, имитационных моделей сценариев проведения экспериментов и устройств управления со встроенными в них блоками численной обработки результатов и расчета коэффициентов моделей ХТС, а также визуальных моделей панелей визуализации и интерактивного управления.

3. Схмотехнический язык химико-технологических систем обеспечивает построение компонентных цепей ХТС с неоднородными векторными связями, а его программно-алгоритмический аппарат в виде интерпретатора языка ХТС и адаптированного универсального вычислительного ядра позволяет анализировать процессы преобразования мультифизических энергетических и многокомпонентных вещественных потоков, протекающие в объектах газовой промышленности.

4. Новый численный метод явно-неявного анализа вычислительных моделей ХТС с неоднородными векторными связями с заложенной в нем возможностью непосредственного определения значений переменных на этапе формирования системы алгебро-дифференциальных уравнений и реализованный на его основе алгоритм анализа обеспечивают повышение точности и быстродействия анализа компьютерных моделей химико-технологических систем на 25-50 % по сравнению с неявными методами анализа. Это достигается за счет определения значений ряда переменных на этапе формирования вычислительной модели ХТС и их использования для вычисления значений коэффициентов и свободных членов формируемых уравнений.

5. Язык моделирования алгоритмических конструкций и его программно-алгоритмические средства обеспечивают построение и работу имитационных моделей алгоритмов автоматизированных экспериментов, включающих блоки параметризации и численной обработки результатов анализа компьютерных моделей ХТС, а также содержащих функциональные модели устройств управления протекающими в них процессами.

6. Язык виртуальных инструментов и приборов предназначен для построения лицевых панелей виртуальных инструментов и приборов и представлен совокупностью визуальных компонентов, осуществляющих визуализацию результатов измерения и моделирования и варьирование значений параметров исследуемых компьютерных моделей.

7. Сформированная новая структура библиотеки моделей компонентов обеспечивает загрузку, выбор и работу компонентов трех взаимосвязанных подязыков языка многоуровневых компонентных цепей, а также включает в себя средства исследования и формирования новых моделей компонентов,

представленные генератором моделей компонентов и совокупностью интерактивных панелей.

8. Структура комплекса программ «Среда моделирования химико-технологических систем», основанного на развитии метода компонентных цепей для моделирования сложных технических управляемых систем предприятий газовой промышленности, и совокупность методик и практических примеров его применения обеспечивают автоматизацию решения задач производственного, научно-исследовательского и учебного характера.

Достоверность результатов. Исследования адекватности построенных моделей подтверждают достоверность полученных результатов. Это было установлено: путем сравнения результатов с результатами, полученными в известных аналогичных программных комплексах, таких как Aspen Hysys, ChemCAD и прочие. Разработанные компьютерные модели в виде компонентных цепей химико-технологических систем являются непротиворечивыми, так как реализованы на основе известных уравнений, описывающих протекающие в них процессы. Численные методы сравнивались с результатами теоретических расчетов, а также с результатами, полученными в аналогичных комплексах программ. Достоверность разработанного программного комплекса подтверждается непротиворечивостью использования основных положений объектно-ориентированного программирования, а также полученными актами о его использовании для решения различных задач народно-хозяйственного значения, в том числе и для автоматизации процесса обучения и переподготовки специалистов газовой промышленности. Возможность практического использования подтверждается внедрением комплекса программ в учебный процесс Национального исследовательского Томского политехнического университета, Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Оренбургского государственного университета, а также реализацией сетевого тренажера, внедренного в ОАО «Востокгазпром».

Использование результатов исследований.

1. НИР «Метод компонентных цепей для компьютерного моделирования и управления эколого-экономическими системами», грант РФФИ 10-06-00084, 2010-2012 годы.

2. НИР «Метод многоуровневого моделирования алгоритмов управления технологическими процессами в сложных системах», грант РФФИ 11-07-00384, 2011-2013 годы.

3. НИР «Многоуровневые компьютерные модели для интеллектуального управления эколого-экономическими системами предприятий нефтегазового комплекса», грант РФФИ 13-07-00378, 2013-2015 годы.

4. Хозяйственный договор № 18/914-С1 от 16.04.2007 г. «Создание автоматизированной системы управления технологическими процессами системы оборотного снабжения метанолом УКПГ Мыльджинского газоконденсатного месторождения ОАО «Томскгазпром».

5. Хозяйственный договор № 18-9/07 Фр. от 12.09.2007 г. «Разработка и изготовление стендов для учебно-научных лабораторий».

Апробация результатов. Результаты диссертации докладывались, представлялись и опубликованы в материалах конференций: межд. конф. «Химия и химическая технология XXI века» (г. Томск, 2008, 2014, 2017); межд. конф. «Электронные средства и системы управления» (г. Томск, 2004, 2015); межд. конф. «Современная техника и технология» (г. Томск, 2001, 2012, 2013); межд. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (Абакан, 2010, Новосибирск, 2012, Новокузнецк, 2013, Томск, 2015, 2016); межд. конф. «Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике» (г. Новочеркасск, 2013); всеросс. школа-конференция «Управление большими системами» (г. Уфа, 2013); рег. конф. «Радиотехнические и информационные системы и устройства» (г. Томск, 2000); межд. конф. «Моделирование: теория, методы и средства» (г. Новочеркасск, 2010, 2011); межд. конф. «Современное образование» (г. Томск, 2014, 2015); межд. конф. «Научная сессия ТУСУР» (г. Томск, 2007, 2011, 2015); межд. конф. «Перспективы развития информационных технологий» (г. Новосибирск, 2014); межд. конф. «Информатизация процессов формирования открытых систем на базе СУБД, САПР и систем искусственного интеллекта» (г. Вологда, 2011); межд. конф. «Научная дискуссия: вопросы технических наук» (г. Москва, 2013).

Публикации: по теме диссертации опубликовано 54 работы, в том числе: 7 монографий и учебных пособий; 4 статьи в журналах, цитируемых в системе SCOPUS; 19 статей в журналах из перечня ВАК; 8 статей в научных сборниках; 5 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ; 16 докладов в трудах отечественных конференций.

Структура и объем диссертации. В состав диссертации входит введение, 7 глав, заключение, список литературы из 212 наим., приложения на 105 страницах. Объем диссертации без приложений – 371 с., в т.ч. 165 рисунков, 6 таблиц.

Личный вклад. Результаты диссертационной работы, соответствующие поставленным задачам и сформулированные в положениях, выносимых на защиту, получены автором лично. Вклад автора состоит в развитие метода компонентных цепей, заключающемся в построении многоуровневых компонентных цепей химико-технологических систем для автоматизированного решения задач исследования и функционального проектирования, непосредственном участии в разработке моделей ХТС, программно-алгоритмического аппарата подязыков языка многоуровневых компонентных цепей, а также в обработке и интерпретации данных численного моделирования, подготовке основных публикаций. Формирование теоретических основ развития метода компонентных цепей проводилось совместно с научным консультантом В.М. Дмитриевым. Программная реализация комплекса программ «Среда моделирования химико-технологических систем» выполнялась совместно с Т.Н. Зайченко, А.Н. Кураколовым, М.А. Ерошкиным, С.А. Пановым, В.В. Ган-

джей. Построение и реализация компьютерных моделей ХТС осуществлялось совместно с И.М. Долгановым и М.О. Писаревым. Некоторые результаты исследований получены совместно с соавторами опубликованных работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена актуальность работы, сформулированы задачи, научная новизна и защищаемые положения, обозначены теоретическая и практическая значимость исследований.

В первой главе выполнен системный анализ, сформулированы задачи исследования и функционального проектирования сложных технических управляемых систем (СТУС) газовой промышленности и предложен обобщенный алгоритм для их автоматизированного решения на основе многократного вычислительного эксперимента над их моделями.

Функционирование СТУС направлено на определение, установление и поддержание требуемых режимов функционирования химико-технологических систем (ХТС) газовой промышленности.

При разработке и функционировании СТУС их компьютерные модели могут быть применены для экспериментального определения требуемых режимов функционирования и функционального проектирования ХТС; выбора параметров измерительных и исполнительных устройств; формирования и отладки алгоритмов управления; разработки виртуальных лабораторий, компьютерных тренажеров для обучения и переподготовки специалистов; моделирования и разработки интеллектуальных систем управления.

Автоматизация решения поставленных задач достигнута путем теоретического развития предложенного В.М. Дмитриевым метода компонентных цепей, заключающегося в построении многоуровневых компьютерных цепей ХТС и адаптации программно-инструментальных средств для их анализа, а также реализации на её основе комплекса программ моделирования химико-технологических систем.

Для формирования структуры многоуровневой компонентной цепи СТУС, являющейся её компьютерной моделью в формате метода компонентных цепей (КЦ), был проведен системный анализ сложных технических управляемых систем. Его результатом является представленная на рисунке 1 их обобщенная структурно-функциональная схема.

Помимо управляемой ХТС, представленной взаимосвязанными преобразователями энергии и вещественных потоков, она включает устройство управления (УУ), функционирующее на основе алгоритмов и взаимодействующее с оператором с помощью элементов панели визуализации и интерактивного управления. Связь между ХТС и УУ обеспечивается исполнительными устройствами (ИспУ), оказывающими пропорциональные командам управления энергетические воздействия на объект, и исполнительными устройствами (ИзмУ), осуществляющими измерения наблюдаемых характеристик ХТС и доставку их значений устройству управления.

Химико-технологические системы предприятий газовой промышленности допускают декомпозицию на совокупность взаимосвязанных элементов и аппаратов химической технологии. В каждом аппарате ХТС осуществляются преобразования многокомпонентных вещественных потоков под воздействием энергетических потоков различной природы. В обобщенном виде ХТС может включать в себя ИспУ изменения давления и температуры, а также ИзмУ, представленные манометрами, термометрами, измерителями вещественного и теплового потока, а также измерителями концентраций веществ, называемых далее компонентами потока.

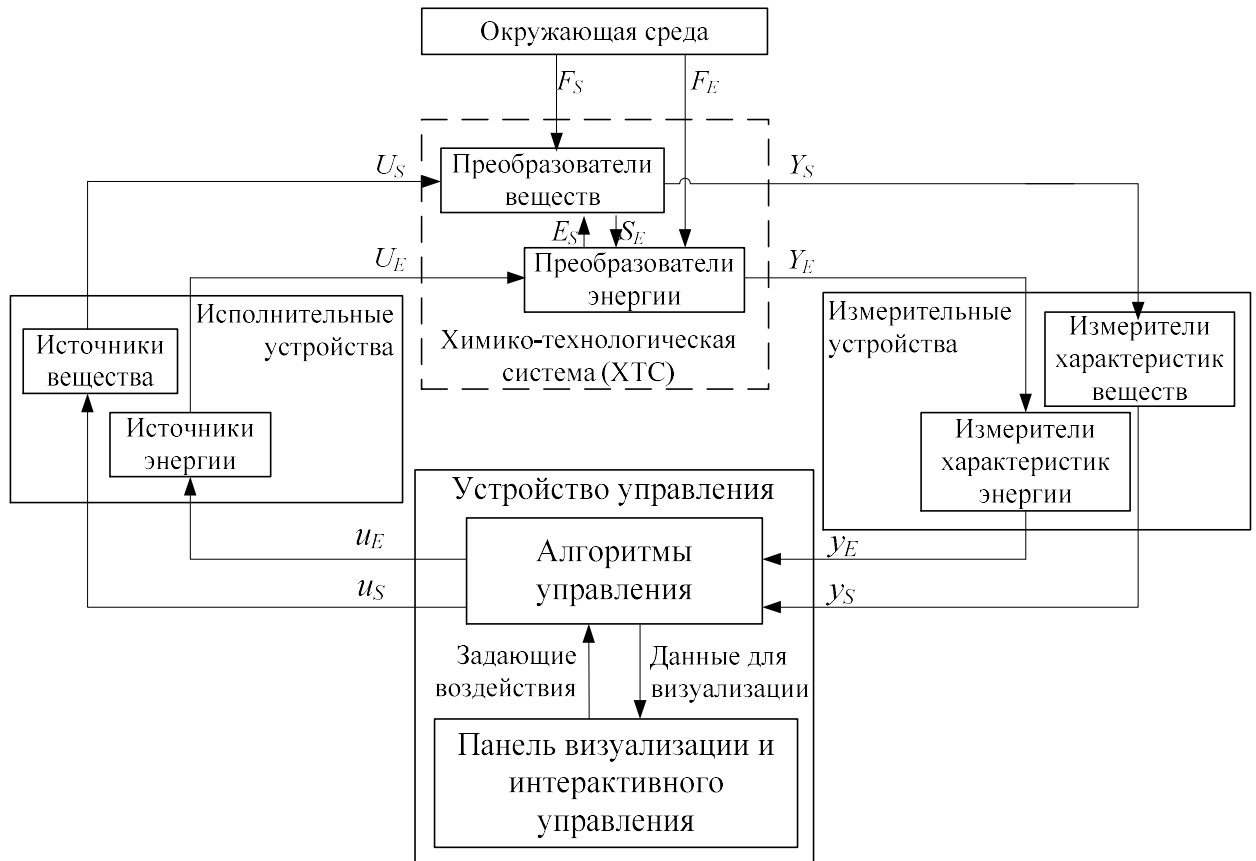


Рис. 1. Структурно-функциональная схема обобщенной сложной технической управляемой системы

Связи элементов и аппаратов, входящих в ХТС, являются физико-химическими и могут быть представлены в виде

$$S_{FCi} = \{S_{Gi} \cup S_{Ti} \cup S_{Ci}\} \rightarrow \{\{P_i, G_i\}, \{T_i, Q_i\}, \{C_i\}\}, \quad (1)$$

где $S_{Gi} \rightarrow \{P_i, G_i\}$ – гидравлическая связь, в которой P_i – давление, а G_i – объемный расход вещества; $S_{Ti} \rightarrow \{T_i, Q_i\}$ – термодинамическая связь, состоящая из T_i – температуры и Q_i – теплового потока; $S_{Ci} \rightarrow \{C_i\}$ – однородная векторная связь, содержащая вектор концентраций всех компонентов (веществ) C_i , составляющих данный поток.

Проблемы построения и исследования моделей ХТС освещены в работах В.В. Кафарова, В.П. Мешалкина, И.Н. Дорохова Т.Н. Гартмана, Э.Д. Иванчиной, Е.Н. Ивашкиной. Средствами компьютерного моделирования ХТС яв-

ляются комплексы программ HYSYS, ChemCAD и другие. В них отсутствуют возможности подключения к моделям ХТС моделей ИспУ и ИзмУ, построения и отладки сценариев управления, лежащих в основе функционирования УУ, а также отсутствует возможность взаимодействия с реальными ХТС.

Для эффективного решения задач исследования и функционального проектирования СТус на основе автоматизированного эксперимента разработана представленная в первой главе компьютерная модель СТус, включающая в себя модель ХТС и имеющая возможность интеграции с реальной системой (рисунок 2). Такая модель имеет связь с библиотекой прототипов-аналогов,

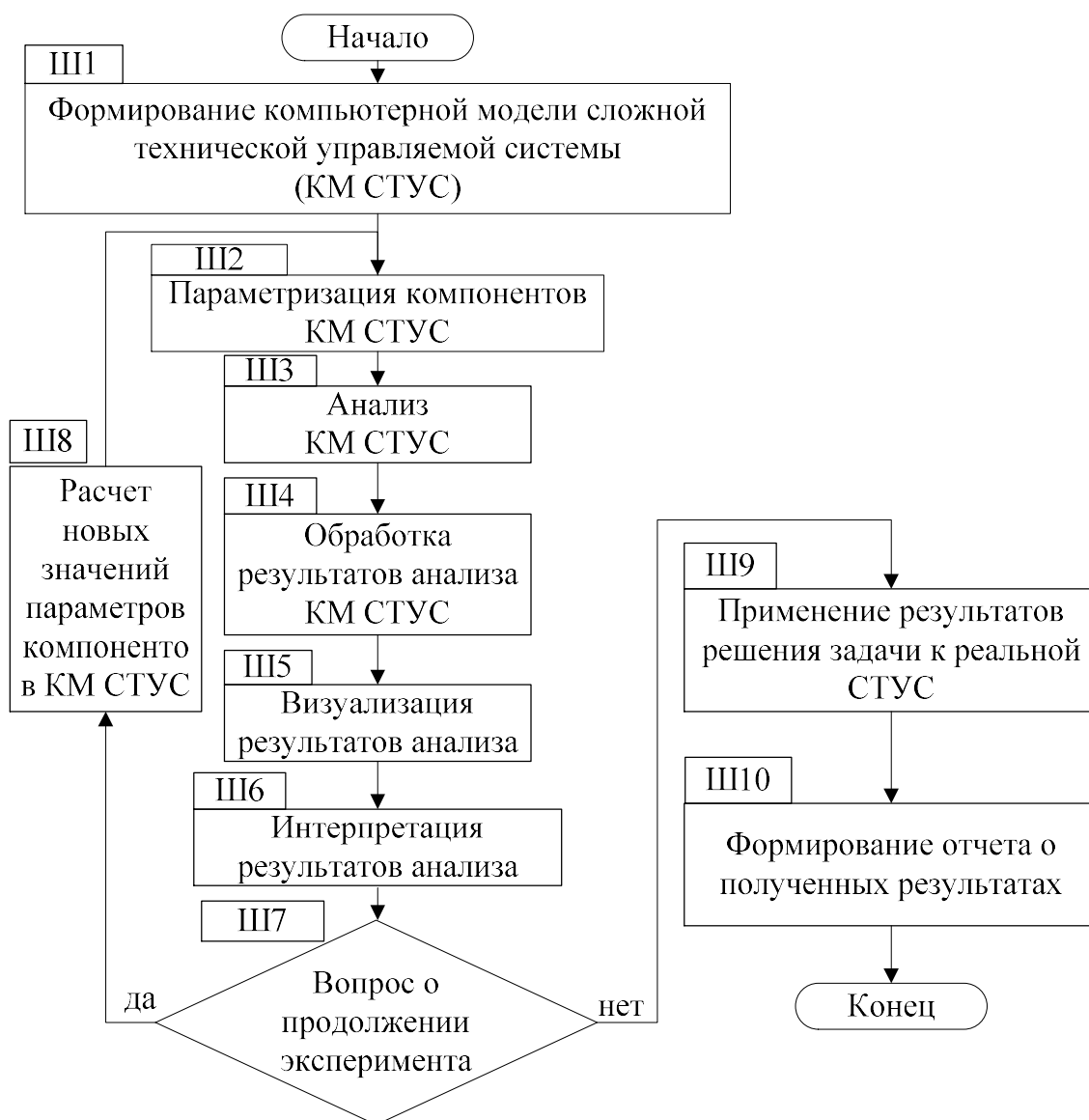


Рис. 2. Алгоритм проведения автоматизированного эксперимента над моделями СТус

организованную модулем документирования и системой поиска аналогов. Взаимодействие с пользователем-экспериментатором обеспечивается средствами визуализации и средствами управления.

На основе анализа литературы и математической подстановки задач исследования и функционального проектирования СТус для целей их автома-

тизированного решения предложен обобщенный алгоритм (рисунок 2). Его основной особенностью является то, что каждый его шаг должен быть представлен алгоритмической моделью, интегрированной с моделью ХТС.

Для автоматизации алгоритма эксперимента над моделями СТУС предложена его многоуровневая схема, положенная в основу разработки многоуровневой компонентной цепи (МКЦ) СТУС.

Вторая глава посвящена теоретическим вопросам формирования многоуровневых компонентных цепей сложных технических управляемых систем и построению языков, предназначенных для графического построения моделей каждого уровня МКЦ СТУС, называемых далее подцепями.

Для целей моделирования сложных технических управляемых систем, предполагающих многократный численный анализ моделей ХТС, в главе осуществляется развитие предложенного профессором В.М. Дмитриевым метода компонентных цепей. Он позволяет в графическом формате формировать компьютерные модели объектов и систем с информационными и энергетическими потоками в связях. Базовыми понятиями метода КЦ являются понятия компонента и компонентной цепи. Компонент является формальным отображением функционального блока моделируемого объекта, процесса или системы. Он реализует математическую или математико-алгоритмическую модель компонента (МК), формируемую на основе четырёх основных аспектов: геометрического, топологического, физического и математического (математико-алгоритмического). Каждый аспект в формируемой МК представлен в ее программно-алгоритмической реализации в виде соответствующего блока.

Компонентная цепь – это произвольная совокупность компонентов, связи которых, именуемые *ветвями*, объединяются в общих точках, называемых *узлами цепи*

$$C = (K, B, N), \quad (2)$$

где K – множество компонентов; B – множество ветвей; N – множество узлов.

Расширением метода КЦ является метод подцепей, согласно которому КЦ C (2) может быть представлена совокупностью подцепей

$$C = (C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_n). \quad (3)$$

Для проведения некоторых видов одновариантного и многовариантного анализа технических объектов на базе метода КЦ разработан комплекс программ «Среда компьютерного моделирования МАРС», позволяющий осуществлять моделирование технических объектов с информационными и энергетическими связями. В его основу положен алгоритм анализа КЦ технических объектов, представленный на рисунке 3.

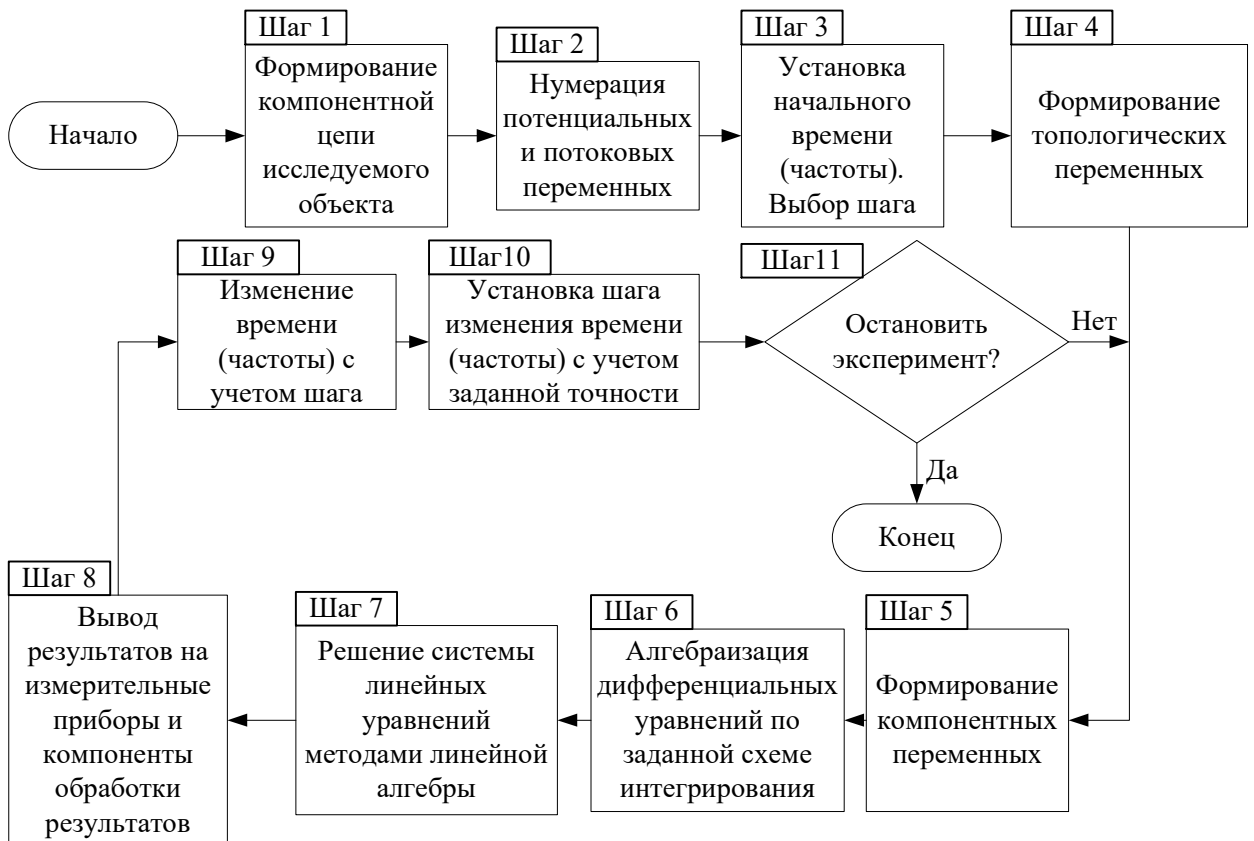


Рис. 3. Алгоритм анализа КЦ ТО в рамках комплекса программ «Среда компьютерного моделирования МАРС»

В формате метода КЦ компьютерная модель СТУС, структурно-функциональная схема которой приведена на рисунке 1, может быть представлена в виде компонентной цепи

$$C_{STUS} = \{C_{ChTS} \cup C_{IZ} \cup C_C \cup C_{IS} \cup C_V\}, \quad (4)$$

где C_{ChTS} – КЦ управляемой ХТС; C_{IZ} – КЦ ИзмУ; C_C – КЦ алгоритмов функционирования УУ; C_{IS} – КЦ ИспУ; C_V – КЦ элементов, расположенных на панели визуализации и интерактивного управления.

Математическая модель СТУС, сформированная в формате МКЦ, представлена в виде

$$M_{STUS} = [M_{ChTS} \cup M_{IZ} \cup M_{IS} \cup M_C], \quad (5)$$

где $M_{ChTS} = [M_{K_ChTS} \cup M_{T_ChTS}]$ – математическая модель ХТС, представляющая собой совокупность компонентных и топологических уравнений; $M_{IZ} = [M_{K_IZ}]$ – математические модели измерительных компонентов, осуществляющие выборку значений соответствующих переменных из общего вектора решения; $M_{IS} = [M_{K_IS}]$ – математические модели исполнительных компонентов, осуществляющих установку энергетических воздействий на ХТС, пропорциональных сигналам УУ; $M_C = [M_{K_C}]$ – модель УУ, представляющая собой совокупность уравнений с включенными в них алгоритмическими блоками.

Математической модели СТУС (5) соответствует векторно-матричная модель вида

$$\begin{bmatrix} \Phi_{KN}^{ChTS} & \Phi_{KB}^{ChTS} & 0 & 0 & \Phi_{S2}^{IS} \\ 0 & \Phi_T^{ChTS} & 0 & 0 & 0 \\ \Phi_{ZN}^{ChTS} & \Phi_{ZB}^{ChTS} & \Phi_{Z1}^{IZ} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Phi_{Z2}^{IZ} & \Phi_{U1}^C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Phi_{U2}^C & \Phi_{S1}^{IS} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_N^{ChTS} \\ V_B^{ChTS} \\ V_Z^{IZ} \\ V_u^C \\ V_U^{IS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_K^{ChTS} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $\Phi_{KN}^{ChTS}, \Phi_{KB}^{ChTS}, \Phi_{S2}^{IS}, \Phi_T$ – матрицы коэффициентов при соответствующих переменных в компонентных и топологических уравнениях модели ХТС; $\Phi_{ZN}^{ChTS}, \Phi_{ZB}^{ChTS}, \Phi_{Z1}^{IZ}$ – матрицы коэффициентов в уравнениях моделей измерительных компонентов; $\Phi_{Z2}^{IZ}, \Phi_{U1}^C$ – матрицы коэффициентов при соответствующих переменных уравнений компонентов УУ; $\Phi_{U2}^C, \Phi_{S1}^{IS}$ – матрицы коэффициентов в уравнениях моделей ИспУ.

В силу возможности явного выражения выходных переменных из уравнений измерительных M_{K_IZ} и исполнительных M_{K_IS} компонентов, и уравнений УУ M_{K_C} , матрицы $\Phi_{Z1}^{IZ}, \Phi_{U1}^C, \Phi_{S1}^{IS}$ векторно-матричной модели (6) будут иметь вид отрицательной квадратной матрицы

$$-I = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Из полученного на основе такой матрицы матричного уравнения

$$\Phi \cdot V_1 - I \cdot V_2 = 0 \quad (8)$$

элементы вектора V_2 могут быть выражены в явном виде

$$V_2 = \Phi \cdot V_1 \cdot (-I)^{-1}. \quad (9)$$

Матричное уравнение (9) может быть представлено совокупностью независимых друг от друга нелинейных уравнений, каждое из которых позволит определять конкретный элемент вектора V_2 . В этом случае более эффективным является представление уравнений моделей измерительных M_{K_IZ} и исполнительных M_{K_IS} компонентов, и уравнений УУ M_{K_C} в явном виде (9) и реализация математических выражений для вычисления значений элементов векторов $V_Z^{IZ}, V_u^C, V_U^{IS}$ непосредственно в моделях $M_{K_IZ}, M_{K_C}, M_{K_IS}$. В этом случае они будут относиться к имитационным моделям и допускать использование различных математико-алгоритмических конструкций. Это открывает возможности формирования сценариев проведения экспериментов на базе многовариантного анализа модели ХТС с включением в них функциональных моделей УУ. Компоненты КЦ C_V в своей модели содержат алгоритмы преобразования предназначенной к визуализации информации в соот-

ветствующие координаты экранных форм и обратное преобразование для управляющих компонентов.

На основе построения и исследования векторно-матричной модели СТУС (6), предложена структура многоуровневой компонентной цепи (МКЦ) вида

$$C_M = (C_V \cup C_A \cup C_O), \quad (10)$$

где C_V – КЦ средств визуализации результатов и интерактивного управления значениями параметров; C_A – КЦ сценария эксперимента, называемая далее *алгоритмической компонентной цепью*; C_O – компонентная цепь ХТС.

МКЦ СТУС вида (10) формируется графически в виде трех взаимосвязанных уровней в многослойном редакторе МКЦ. Представленная на рисунке 4, многоуровневая компонентная цепь включает в себя КЦ ХТС и средства подключения к реальной системе, имитационную модель сценария эксперимента, включающую функциональную модель УУ, а также взаимосвязанную с ним панель визуализации и интерактивного управления.

Под *уровнем многоуровневой компонентной цепи (уровнем моделирования)* будем понимать степень абстракции, способ представления и обработки информации об исследуемой СТУС, её моделях, методах обработки данных, средствах визуализации результатов экспериментов. МКЦ СТУС, предназначенная для автоматизации экспериментов, состоит из следующих взаимосвязанных уровней:

– *объектного уровня* (O_L), включающего в себя КЦ ХТС, в которую помимо компонентов-аппаратов химической технологии входят подключенные к ним компоненты ИзмУ и ИспУ, которые принадлежат модельному объектному уровню, и реальная ХТС, которая совместно с платами сбора данных и/или измерительными контроллерами образует реальный объектный уровень;

– *логического уровня* (L_L), на котором в формате алгоритмических КЦ отображается включающий алгоритм функционирования УУ сценарий вычислительного эксперимента, предполагающего многократный анализ КЦ ХТС объектного уровня;

– *визуального уровня* (V_L) отображения информации о текущих результатах выполнения шагов сценария исследования и функционального проектирования СТУС.

Взаимодействия между уровнями, называемые далее *межуровневыми взаимодействиями*, предназначены для передачи данных с одного уровня МКЦ на её другой уровень и обеспечиваются отображением определенных компонентов на двух её уровнях: объектном и логическом, или визуальном и логическом.

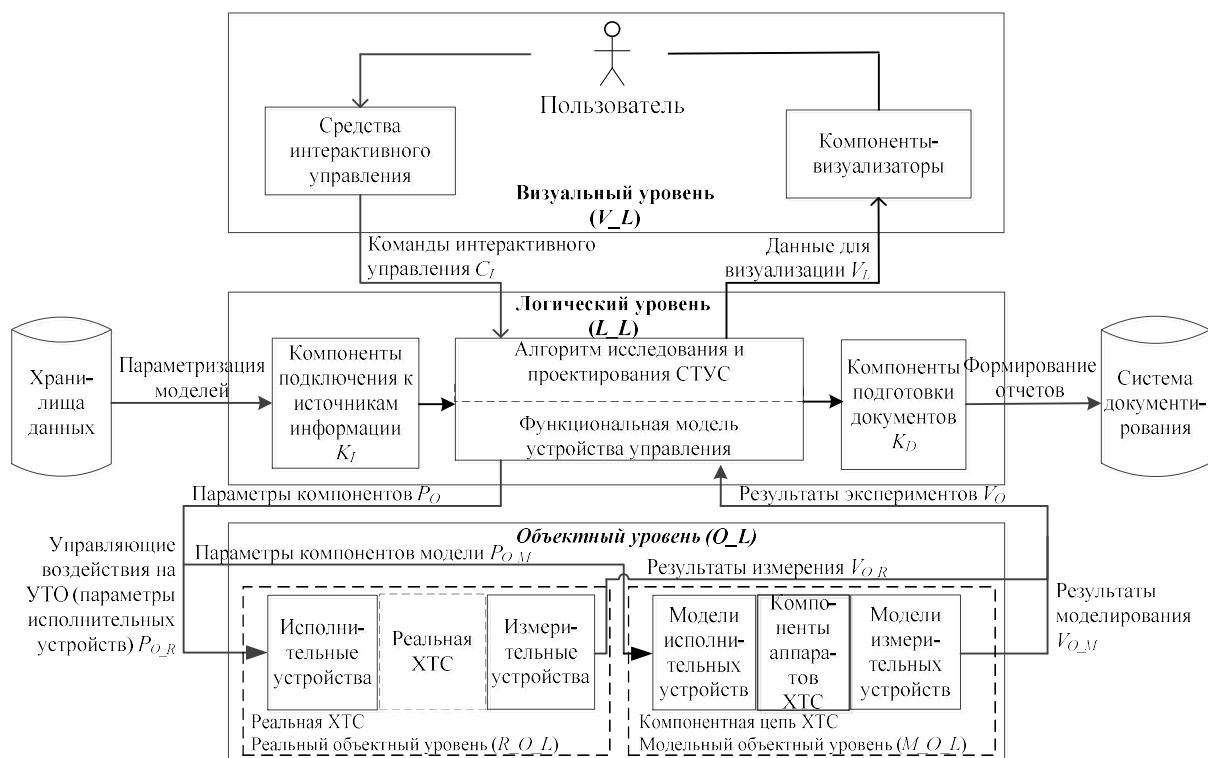


Рис. 4. Структура многоуровневой компонентной цепи СТУС

Формирование многоуровневой КЦ производится в многослойном графическом редакторе с использованием графического языка многоуровневых компонентных цепей (язык МКЦ). Язык МКЦ объединяет в себе три языка, являющихся его подъязыками:

1) *язык химико-технологических систем (язык ХТС)*, позволяющий на объектном уровне МКЦ СТУС представлять КЦ ХТС с подключенными в ней компонентами ИзМУ и ИспУ;

2) *язык моделирования алгоритмических конструкций (язык МАК)*, предназначенный для построения моделей сценариев экспериментов над МКЦ СТУС, включающих алгоритмы функционирования УУ;

3) *язык виртуальных инструментов и приборов (язык ВИП)*, в формате которого на визуальном уровне МКЦ СТУС формируются лицевые панели ВИП и панели визуализации и интерактивного управления параметрами СТУС.

Формально язык МКЦ можно представить виде объединения языков

$$\text{Язык МКЦ} = (\text{Язык ХТС}) \cup (\text{Язык МАК}) \cup (\text{Язык ВИП}). \quad (11)$$

Межуровневые взаимодействия представляют собой пересечения пар введенных подъязыков. Они реализуются отображением некоторых компонентов языка ХТС и языка ВИП одновременно на двух слоях многослойного редактора.

Формирование многоуровневой КЦ СТУС производится в формате языка МКЦ в многослойном редакторе. Каждый его слой соответствует определенному уровню многоуровневой компонентной цепи, представленному в формате соответствующего подъязыка языка МКЦ.

Основными нотациями языка ХТС являются: компоненты-источники и компоненты-преобразователи мультифизических энергетических и многокомпонентных вещественных потоков, а также компоненты-измерители потенциальных и потоковых переменных.

Алгоритмическая КЦ, формируемая в графическом виде на логическом уровне МКЦ, представляет собой подпрограмму сценария вычислительного эксперимента. Формально она представляется в виде

$$C_A = (K_A, B_A, N_A, M), \quad (12)$$

где K_A – множество алгоритмических компонентов, являющихся графическими отображениями языка МАК (11); B_A – множество связей компонентов алгоритмической КЦ C_A ; N_A – множество узлов, образованных соединениями компонентов множества K_A ; M – совокупность передаваемых по связям множества B_A сообщений с данными различных типов.

Каждый компонент множества K_A реализует представленную в явном виде некоторую математико-алгоритмическую модель

$$Y = F_A(P_A, X), \quad (13)$$

где P_A – параметры компонента; X – входные данные; Y – результат работы компонента.

Любой компонент множества K_A формируется с учётом четырёх основных аспектов: геометрического, топологического, физического и математико-алгоритмического. Он может быть источником, преобразователем или приемником данных различных типов.

На визуальном уровне МКЦ СТУС из визуальных компонентов, образующих множество K_V , формируются панели визуализации и интерактивного управления параметрами модели. Множество K_V включает в себя компоненты следующих множеств

$$K_V = (K_{V1} \cup K_{V2} \cup K_{V3} \cup K_{V4}), \quad (14)$$

где K_{V1} – множество компонентов статической информации (надписи, объединяющие панели и т.п.); K_{V2} – компоненты-визуализаторы результатов моделирования и измерения, представленных значениями числовых и нечисловых типов данных; K_{V3} – множество компонентов-регуляторов, предназначенных для ввода значений различных типов данных; K_{V4} – множество компонентов, обладающих специальными оконными интерфейсами для детального исследования динамических характеристик (таблицы, графики и др.).

В третьей главе для целей моделирования ХТС с протекающими в них преобразованиями физических характеристик и составов многокомпонентных вещественных потоков, предложены и

S_{vk}	
S_{E_1j}	S_{I_1j}
S_{E_2j}	S_{I_2j}
...	...
S_{E_Cej}	S_{I_Cij}

Рис. 5. Структура неоднородной векторной связи

разработаны компоненты с неоднородными векторными связями (НВС). Они позволяют на объектном уровне МКЦ формировать КЦ ХТС, адаптированные к анализу универсальным вычислительным ядром. Каждая НВС S_{vk} , структура которой приведена на рисунке 5, представляет собой произвольную совокупность взаимосвязанных друг с другом энергетических и информационных связей. Её векторная ветвь \mathbf{b}_k инцидентна её векторному узлу \mathbf{n}_k и имеет вид

$$S_{vk} = (\mathbf{b}_k \eta \mathbf{n}_k) = [S_{E_{1k}}, S_{E_{2k}}, \dots, S_{E_{Cek}}, S_{I_{1k}}, S_{I_{2k}}, \dots, S_{I_{Cik}}], \quad (15)$$

где $\mathbf{b}_k = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n]$ – векторная связь, являющаяся вектором размера Ce , номеров ветвей скалярных энергетических связей $S_{E_{1k}}, S_{E_{2k}}, \dots, S_{E_{Cek}}$; η – отношение инцидентности ветви \mathbf{b}_k узлу \mathbf{n}_k (указывается η^+ – когда ветвь \mathbf{b}_j направлена к узлу \mathbf{n}_j , и η^- – если ветвь \mathbf{b}_j ориентирована от узла \mathbf{n}_j); $\mathbf{n}_k = [n_1, n_2, \dots, n_{Ce}, n_{Ce+1}, n_{Ce+1}, \dots, n_{Ce+Ci}]$ – векторный узел, представляющий собой массив номеров узлов энергетических и информационных связей, входящих в состав неоднородной векторной связи S_{vk} ; Ce – количество энергетических связей, а Ci – количество информационных связей в составе НВС S_{vk} .

Каждая энергетическая связь $S_{E_{-i}} \subset S_{vk}$ описывает протекание энергетического потока определенной физической природы. Ей ставится в соответствие пара топологических координат – узел $n_{E_{-i}}$ и ветвь $b_{E_{-i}}$ – с потенциальной $V_{n_{-i}}$ и потоковой переменной $V_{b_{-i}}$ соответственно

$$S_{E_{-i}} = (b_{E_{-i}} \eta n_{E_{-i}}) \rightarrow \{V_{n_{-i}}, V_{b_{-i}}\}. \quad (16)$$

Каждой информационной связи, соответствующей определенному информационному сигналу в потоке, ставится в соответствие пара топологических координат – узел $n_{E_{-i}}$ и ветвь $b_{E_{-i}}$ – с одной потенциальной переменной

$$S_{I_{-i}} = (b_{I_{-i}} \eta n_{I_{-i}}) \rightarrow \{V_{mi}, \emptyset\}. \quad (17)$$

Характерные ранее для метода КЦ энергетическая (16) и информационная (17) связи далее рассматриваются как частные случаи НВС (15): для энергетической связи будет характерно $Cek=1$ и $Cik=0$, для информационной – $Cek=0$ и $Cik=1$.

Соединение НВС производится согласно сформулированным в главе правилам. На их основе разработан алгоритм интерпретатора языка ХТС, рассмотренный в главе 6 диссертации.

Каждая ХТС представляет собой совокупность элементов и аппаратов химической промышленности. Циркулирующие между ними вещественные потоки представляют собой многокомпонентные смеси веществ, обладающие различными видами энергии. Сумма концентраций веществ в любом многокомпонентном потоке в любой момент времени равна 1.

Для моделирования многокомпонентных химико-технологических систем в формате языка ХТС введен обобщенный компонент химико-технологической системы, представленный на рисунке 6.

Геометрический аспект предписывает условное графическое и буквенное обозначение компонента ХТС на объектном уровне МКЦ. С точки зрения *топологического аспекта* формируются совокупности

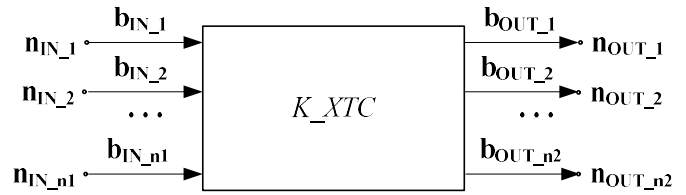


Рис. 6. Обобщенный компонент физико-химической системы

входных $\mathbf{S}_{IN_1}^{\Phi XC} = (\mathbf{b}_{IN_1} \eta^- \mathbf{n}_{IN_1})$,

$\mathbf{S}_{IN_2}^{\Phi XC} = (\mathbf{b}_{IN_2} \eta^- \mathbf{n}_{IN_2})$, ..., $\mathbf{S}_{IN_n1}^{\Phi XC} = (\mathbf{b}_{IN_n1} \eta^- \mathbf{n}_{IN_n1})$ и выходных $\mathbf{S}_{OUT_1}^{\Phi XC} = (\mathbf{b}_{OUT_1} \eta^- \mathbf{n}_{OUT_1})$, $\mathbf{S}_{OUT_2}^{\Phi XC} = (\mathbf{b}_{OUT_2} \eta^- \mathbf{n}_{OUT_2})$, ..., $\mathbf{S}_{OUT_n1}^{\Phi XC} = (\mathbf{b}_{OUT_n1} \eta^- \mathbf{n}_{OUT_n1})$ физи-

ко-химических связей. С позиций физического аспекта каждая связь представляет собой совокупность энергетических (12) и информационных (17) связей

$$\mathbf{S}_j^{\Phi XC} = \{S_j^G, S_j^T, S_j^C\}, \quad (18)$$

где $S_j^G = (b_j^G \eta n_j^G) \rightarrow \{n_j^G \rightarrow V_{nj}^G, b_j^G \rightarrow V_{bj}^G\}$ – энергетическая гидравлическая связь ($V_{nj}^G = P_j$ – давление, $V_{bj}^G = G_j$ – объемный, массовый или молярный расход вещества); $S_j^T = (b_j^T \eta n_j^T) \rightarrow \{n_j^T \rightarrow V_{nj}^T, b_n^T \rightarrow V_{bj}^T\}$ – энергетическая термодинамическая связь ($V_{nj}^T = T_j$ – температура, $V_{bj}^T = Q_j$ – поток теплоты); $S_j^C = (b_j^C \eta \mathbf{n}_j^C) \rightarrow \{\mathbf{n}_j^C \rightarrow \mathbf{V}_{nj}^C, b_j^C \rightarrow \emptyset\}$ – однородная векторная связь с вектором переменных $\mathbf{V}_{nj}^C = \mathbf{C}_j$, характеризующим концентрации веществ в описываемой им связи. Размерность данного вектора соответствует количеству веществ, циркулирующих во всей моделируемой ХТС. Далее такую связь будет называть *связью концентраций*.

С точки зрения *математического аспекта* процессы, протекающие в любом компоненте ХТС, будут описываться линейными, нелинейными и/или дифференциальными уравнениями с обыкновенными и частными производными, составленными относительно переменных связей компонента, образующих вектор его решения, соответствующий физико-химической связи (1)

$$V_{K_ФХС} = [\mathbf{P}_K \quad \mathbf{G}_K \quad \mathbf{T}_K \quad \mathbf{Q}_K \quad \mathbf{C}_K]^T, \quad (19)$$

где \mathbf{P}_K – вектор давлений во всех узлах, образованных соединением связей компонента со связями других компонентов; \mathbf{G}_K – вектор расходов вещества во всех его входных и выходных потоках; \mathbf{T}_K – вектор температур вещественных потоков; \mathbf{Q}_K – вектор тепловых потоков; \mathbf{C}_K – вектор концентраций веществ во входных и выходных потоках компонента ХТС.

Протекающие в нём гидравлические, термодинамические, массообменные и др. процессы зависят от геометрических размеров и физических свойств отображаемого им элемента или аппарата, а также от физико-химических свойств и концентраций веществ, составляющих многокомпонентные потоки. Зависимость коэффициентов уравнений математической модели обобщенного компонента ХТС от значений переменных, входящих в вектор (19) позволяют отнести их модели классу нелинейных, при анализе которых требуется выполнять несколько итераций на каждом шаге по времени.

На основе рассмотренных аспектов сформированная структура компьютерной модели ХТС, включающая блок расчета коэффициентов, взаимодействующий с базой данных характеристик компонент потока, представлена на рисунке 7. В диссертации подробно рассмотрен вопрос автоматического построения и решения вычислительной модели КЦ ХТС объектного уровня МКЦ.

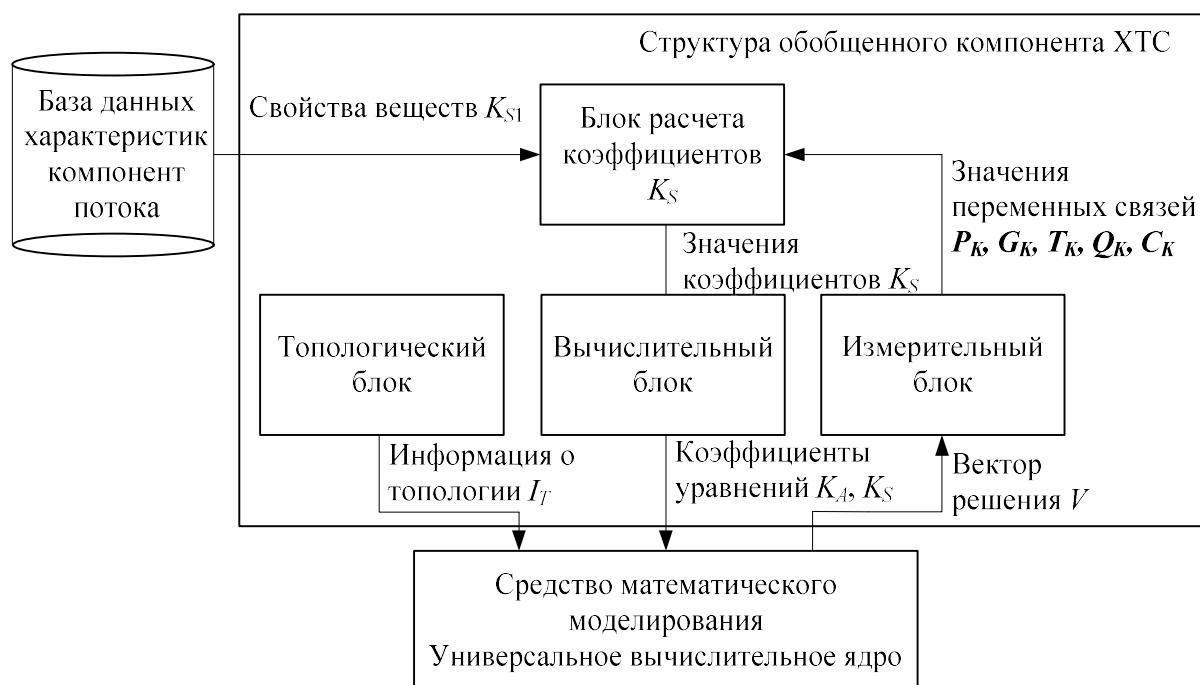


Рис. 7. Блочная структура обобщенного компонента ФХС

На базе представленного на рисунке 6 обобщенного компонента ХТС разработан набор компонентов, в который включены источник многокомпонентной смеси веществ, измерители давления, вещественного расхода, температуры, температурного потока и концентраций веществ, составляющих поток.

В качестве моделей основных аппаратов ХТС реализованы и исследования модели смесителя, теплообменника, сепаратора и абсорбера, протекающие в которых процессы описываются уравнениями материального и теплового баланса, а также уравнениями преобразования концентраций веществ в потоках. Данные уравнения могут быть линейными или нелинейными алгебраическими или дифференциальными в обыкновенных или частных производных.

На примере компонента «Теплообменник» рассмотрена возможность анализа моделей аппаратов ХТС с распределенными параметрами по длине теплообменного аппарата, уравнения математической модели которого являются дифференциальными с частными производными по длине. Компонент «Абсорбер» реализован на основе уравнения массопередачи и уравнений материального и теплового баланса абсорбции.

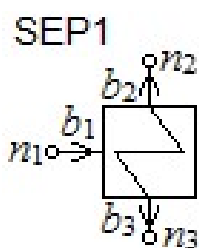


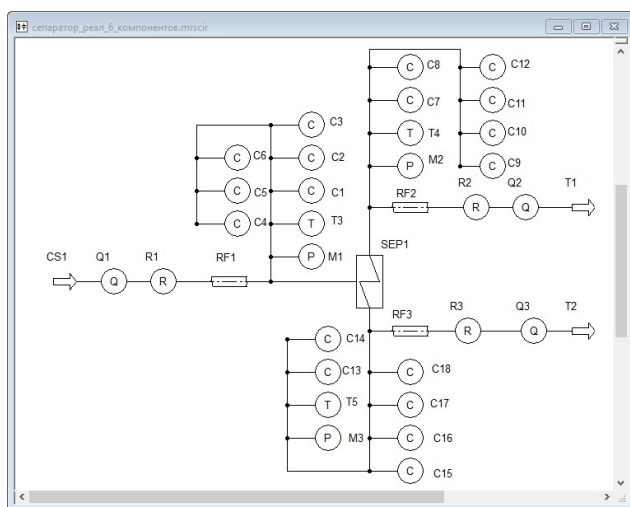
Рис. 8.
Компонент
«Сепаратор»

Для разделения фаз добытая на месторождении газожидкостная смесь проходит несколько ступеней сепарации с различными входными температурами. Для описания этого процесса реализован компонент «Сепаратор» (рис. 8), имеющий одну входную S_1 и две выходные связи S_2 и S_3 . Его математическая модель включает уравнения разделения вещественного потока на газовую и жидкую фазу. Расчет коэффициентов фазового равновесия K_i производится численной методикой решения уравнения Соави-Редлиха-Квонга. Определение доли пара e производится минимизацией целевой функции вида

$$F(e) = \sum_{i=1}^{CF} C_{In_i} \cdot \frac{K_i - 1}{1 + e \cdot (K_i - 1)}. \quad (20)$$

На рисунке 9, а приведена модель секции низкотемпературной сепарации газожидкостной смеси, подающейся на вход сепаратора под давлением 2 МПа и температурой -80°C . Она имеет следующий компонентный состав: метан – 0.7812; этан – 0.03; пропан – 0.02; изобутан – 0.0048; н-бутан – 0.001; азот – 0.163. результаты ее анализа представлены на рисунке 9, б.

Разработанные и представленные в данной главе компьютерные модели ХТС были отлажены путем проведения ВЭ и подтвердили свою адекватность при сравнении результатов с литературными источниками и существующими комплексами компьютерного моделирования ХТС.



а)

Доля отгона		
расход вход	9.557e-001	расход выход газ
1.000e+007	9.557e+006	4.426e+005
P вход	2.000e+006	P выход газ
2.000e+006	2.000e+006	2.000e+006
T вход	193	T выход газ
193	193	193
Q_1	3.554e+012	Q_2
3.554e+012	3.554e+012	3.554e+012
C метан вход	0.7812	C метан выход газ
0.7812	0.8021	0.3310
C этан вход	0.0300	C этан выход газ
0.0300	0.0228	0.1848
C пропан вход	0.0200	C пропан выход газ
0.0200	0.0049	0.3465
C изобутан вход	0.0048	C изобутан выход газ
0.0048	0.0003	0.1018
C н-бутан вход	0.0010	C н-бутан выход газ
0.0010	0.0000	0.0218
C азот вход	0.1630	C азот выход газ
0.1630	0.1699	0.0141
		расход выход жидкость
		2.000e+006
		T выход жидкость
		193
		Q_3
		3.554e+012
		C метан выход жидкость
		0.3310
		C этан выход жидкость
		0.1848
		C пропан выход жидкость
		0.3465
		C изобутан выход жидкость
		0.1018
		C н-бутан выход жидкость
		0.0218
		C азот выход жидкость
		0.0141

б)

Рис. 9. Компьютерная модель секции низкотемпературной сепарации природного газа
а) компьютерная модель; б) результаты моделирования

В четвертой главе рассматривается язык моделирования алгоритмических конструкций. С помощью его графических лексем на логическом уровне МКЦ СТУС формируются сценарии проведения экспериментов, включающие функциональные модели устройств управления. В качестве его аналогов рассмотрены G-язык, применяющийся при формировании кодов программ комплекса LabView, универсальный язык моделирования *UML*, язык функционального моделирования IDEF-0, а также графические языки программирования промышленных контроллеров международного стандарта МЭК 61131-3. Так как эти языки, позволяя строить модели сценариев функционирования УУ, не допускают или допускают со значительными затруднениями своей интеграции с моделями ХТС, в рамках языка МКЦ был разработан входящий в него язык моделирования алгоритмических конструкций.

Выражения языка МАК представляют собой последовательность операторов и операндов. К операторам относятся арифметические и логические операторы, а также операторы сравнения. Операндами являются константы, переменные и функции. Из них могут быть сформированы выражения присваивания, условного присваивания, уравнение, система уравнений, неравенство, система неравенств, а также выражения для циклов с параметром, с постусловием и с предусловием.

Построение алгоритмической КЦ вида (12) производится по правилам:

- 1) каждой константе или переменной, значение которой известно, ставится в соответствие компонент источник;
- 2) каждой переменной, значение которой подлежит определению, соответствует компонент-приемник;
- 3) каждой операции (операнду или функции) должно быть найдено отображение в виде компонента-преобразователя или алгоритмической КЦ (12), содержащей произвольное количество компонентов множества K_A .

Для отображения констант и переменных, значения которых определены, реализованы источники данных целочисленного, вещественного и комплексного типа данных, а также источник логического типа данных и источник постоянной строки. Отображение операторов и функций языка МАК в формат алгоритмических КЦ осуществляется с помощью реализованных компонентов арифметических и логических операторов, операторов сравнения, стандартных математических функций, блоков обработки данных с реализованными в них численными методами анализа временных, частотных и параметрических зависимостей. Функции пользователя представляют собой алгоритмические подцепи, распространяющие метод подцепей на класс алгоритмических КЦ.

В главе осуществлено отображение векторно-матричных конструкций в формат языка МАК. Оно включает в себя следующие компоненты: источник матрицы, взятие элемента матрицы; присваивание значения элементу матрицы; сложение, вычитание матриц; умножение матрицы на скаляр; умножение матриц; нахождение определителя и ранга матрицы.

Для ряда математико-алгоритмических конструкций приведены соответствующие им алгоритмические КЦ, разработанные на логическом уровне МКЦ. В качестве примера на рисунке 10 приведена алгоритмическая КЦ для сценария управления состоянием двух клапанов, управляющих поступающим потоком газа в баллон и выходящим из него.

Для проведения различных видов многовариантного анализа и построения алгоритмических КЦ, осуществляющих оптимизацию целевых функций на основе заданных критериев, разработаны компоненты языка МАК: «Построитель семейства выходных характеристик»; «Анализ чувствительности»; «Статистический анализ»; «Целевая функция»; «Безградиентный метод оптимизации»; «Градиентный метод оптимизации». Их применение для решения конкретных практических задач рассмотрено в главе 7.

Изменение значений параметров компонентов объектного и визуального уровня производится с помощью атрибутивных связей. При этом каждому варьируемому атрибуту компонента на логическом уровне МКЦ ставится в соответствие компонент «Атрибут», пример которого приведен на рисунке 11. Если по связи $S_1 = (b_1 \eta^+ n_1)$ принимается сообщение с типом данных, соответствующему типу данных атрибута, то атрибут получает значение, передаваемого в сообщении. С помощью описанного принципа использования атрибутивных связей осуществляется параметризация модели абсорбера данными, хранящимися в базе данных аппаратов химической технологии и в базе данных характеристик веществ.

Пятая глава посвящена рассмотрению языка виртуальных инструментов и приборов. Под виртуальным прибором (ВП) понимается оконный интерфейс, имитирующий на компьютере логику работы реального прибора и предназначенный для генерации сигналов на КМ и исполнительные устройства реальной ХТС, а также для отображения результатов моделирования и измерения. Он состоит из визуальных компонентов и компонентов языка МАК, описывающие сценарии его функционирования. ВП может быть обособлен в конкретную подцепь и прописан в библиотеку моделей компонентов.

В формате МКЦ виртуальный прибор представляет собой многоуровневую компонентную цепь, представленную на рисунке 12. Каждый ее уровень содержит:

– **Визуальный уровень** содержит лицевую панель ВП, состоящую из визуальных компонентов отображения данных в понятном пользователю виде и

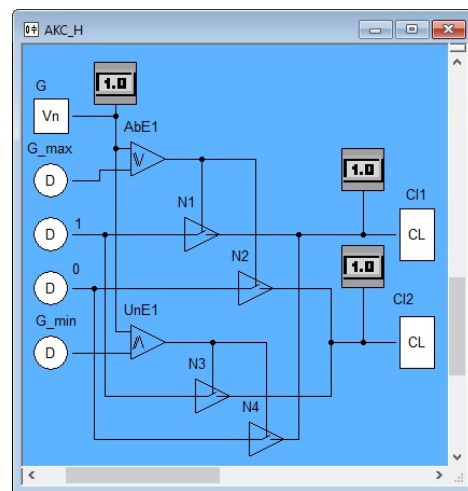


Рис. 10. Алгоритмическая КЦ управления состоянием клапанов



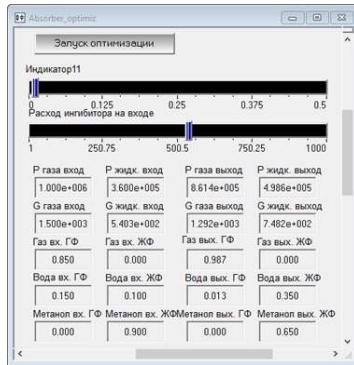
А1: площадь контакта фаз

Рис. 11. Компонент «Атрибут»

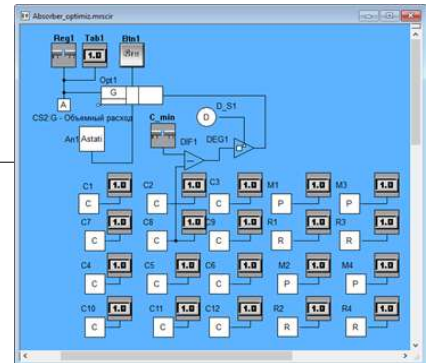
органов интерактивного управления параметрами и характеристиками прибора.

– На её **логическом уровне** располагается алгоритм функционирования прибора, представляющий собой одну или несколько алгоритмических КЦ (7);

Лицевая панель ВП



Алгоритм функционирования ВП



Компьютерная модель

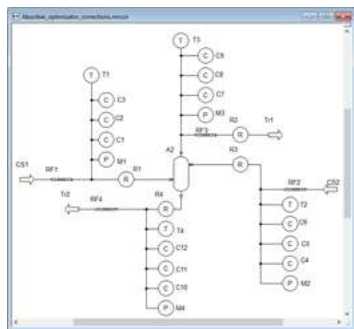


Рис. 12. Многоуровневая компонентная цепь виртуального прибора

– **Объектный уровень** представляет собой интерфейс взаимодействия ВП с исследуемой моделью или реальной ХТС.

С применением метода подцепей (3) виртуальный прибор формально может быть представлен в виде

$$C^{ВП} = (C_O^{ВП} \cup C_L^{ВП} \cup C_V^{ВП}), \quad (21)$$

где $C_O^{ВП}$ – объектный уровень МКЦ ВП, на котором формируется интерфейс его подключения к исследуемой КЦ ХТС; $C_L^{ВП}$ – алгоритмическая КЦ виртуального прибора вида (7), описывающая сценарии его функционирования; $C_V^{ВП}$ – совокупность визуальных компонентов, составляющих лицевую панель ВП.

Формирование ВП производится по чётко разработанной последовательности действий пользователя. Она состоит из этапов формирования технического задания на прибор; формирования лицевой панели прибора; разработки алгоритмов его работы; формирования интерфейсных связей прибора с КМ и/или реальным объектом; тестирования прибора и его добавление в библиотеку. В настоящее время разработаны ряд виртуальных приборов, использующихся в виртуальных и реально-виртуальных лабораториях, внедренных в учебный процесс Национального исследовательского Томского по-

литехнического университета, Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники и Оренбургского государственного университета.

Шестая глава посвящена описанию структуры комплекса программ моделирования ХТС. Он позволяет на основе сформированных в графической форме МКЦ СТУС автоматизировать решение задач исследования и функционального проектирования. Комплекс программ функционирует под управлением операционной системы *Windows*. Для его разработки использовались: объектно-ориентированный язык программирования *Visual C++* с библиотекой классов MFC; динамически загружаемая библиотека *ftd2xx.dll* для подключения к измерительно-управляющему контроллеру X-Mega, функционирующему на основе сценариев, написанных на языке X-Robot.

Автоматизация решения задач исследования и функционального проектирования СТУС достигнута благодаря тому, что разработанный комплекс программ в своей структуре, представленной на рисунке 13, содержит

- многослойный редактор многоуровневых КЦ СТУС, позволяющий в графическом виде формировать МКЦ СТУС на трех взаимосвязанных слоях;
- программно-алгоритмические средства языка моделирования ХТС: интерпретатор языка ХТС, осуществляющий построение КЦ химико-технологической системы на основе её КМ, представленной на объектном уровне; универсальное вычислительное ядро, реализующее представленный на рисунке 3 алгоритм анализа КЦ ХТС; измерительные компоненты, осуществляющие выборку соответствующих значений из вектора решения и их передачу с объектного уровня МКЦ СТУС на ее логический уровень;

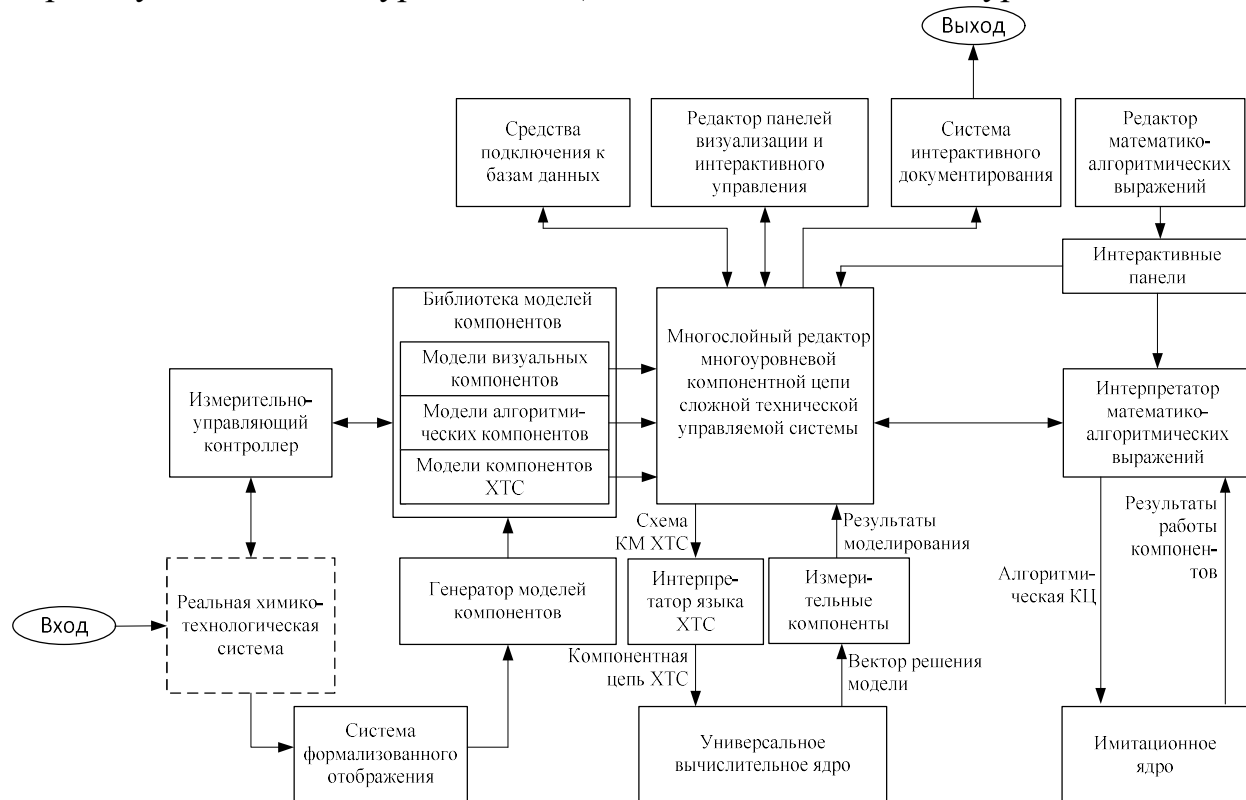


Рис. 13. Структура комплекса программ моделирования химико-технологических систем

– *программно-алгоритмические средства языка МАК*, реализованные в виде интерпретатора математико-алгоритмических выражений, имитационного ядра и интерактивных панелей, включающих в свой состав редактор математико-алгоритмических выражений. Помимо этого данные средства включают в себя средства подключения к базам данных и средства интерактивного документирования;

– *средства языка ВПП*, представленные редактором панелей визуализации и интерактивного управления и библиотекой моделей визуальных компонентов;

– *библиотека моделей компонентов*, в которой реализованы инструментальные средства хранения и использования компонентов всех трёх подязыков языка МКЦ.

В диссертации рассмотрены функции многослойного редактора и его интерфейсные связи с другими модулями комплекса программ. Они представлены в виде общего для всех компонентов интерфейсного класса *CComponent* и соединения между компонентами, представленного классом *CWire*.

Задачей интерпретатора языка ХТС является построение вычислительной модели объекта (10), КЦ которого, обладающая неоднородными векторными связями, сформирована пользователем на объектном уровне МКЦ СТУС. Для представления компонентов с НВС введен интерфейсный класс *IBaseUTOModel*, содержащий массив неоднородных векторных связей, каждая из которых представляется объектом класса *CVectorConnection*. Результатом работы интерпретатора является вычислительная модель ХТС, представленная экземпляром класса *CSchema*. В процессе работы алгоритма построения вычислительной модели, представленной в формате КЦ (2), каждой потенциальной и потоковой переменной с учётом основных топологических законов ставится в соответствие номер, уникальный в рамках формируемой КЦ ХТС. Результат работы интерпретатора передается универсальному вычислительному ядру.

Оно выполняет анализ КЦ в статическом или динамическом (во временной или частотной области) режиме и позволяет осуществлять расчет математических выражений, представленных в формате компонентных цепей. На основе этой возможности реализована система автоматизации математических вычислений «Макрокалькулятор».

В диссертации подробно описаны классы, реализованные в рамках универсального вычислительного ядра, приведено назначение их основных полей и реализованных в них методов. Основной акцент сделан на принципы формирования, внутримашинного представления и решения формируемой ядром системы уравнений, являющейся вычислительной моделью КЦ.

Для повышения эффективности решения задач исследования и функционального проектирования ХТС разработан численный метод и алгоритм формирования и анализа её упакованной вычислительной модели, называемый далее *алгоритмом явно-неявного анализа*. Он основан на том, что в результате сортировки компонентов по направлению движения многокомпо-

нентных потоков в анализируемой системе значения ряда переменных могут быть вычислены на этапе формирования уравнений. Для этой цели в векторе решения модели компонента ХТС выделены переменные трех множеств

$$V^{XTC} = [V_{IN}^{XTC}, V_{OUT_1}^{XTC}, V_{OUT_2}^{XTC}], \quad (22)$$

где V_{IN}^{XTC} – набор переменных входных связей компонента ХТС; $V_{OUT_1}^{XTC}$ – совокупность переменных выходных связей, допускающих свое явное определение в моделях соответствующих компонентов; $V_{OUT_2}^{XTC}$ – набор переменных выходных связей, не допускающих своего явного представления в моделях компонентов.

При реализации алгоритма помимо вектора решения цепи вводится вектор флагов решения

$$D = [[D_N][D_B]]. \quad (23)$$

Каждый его элемент $D_j = TRUE$ ($j = CN + CB$, где CN – количество потенциальных переменных, CB – количество потоковых переменных исследуемой цепи), если соответствующий ему элемент V_j вектора решения КЦ ХТС на данной итерации вычислительного эксперимента определен на этапе формирования топологических и компонентных уравнений.

Алгоритм явно-неявного анализа модели ХТС состоит из следующих этапов:

- 1) формирование топологического массива всех компонентов;
- 2) сортировка компонентов по направлениям потоков (от входов к выходам);
- 3) опрос вычислительного блока однополюсных компонентов (источников и терминаторов), в которых определены значения переменных связей. Такие компоненты добавляют соответствующие значения непосредственно в вектор решения и соответствующие им члены вектора D приобретают значения $TRUE$;
- 4) опрос топологического блока компонентов КЦ ХТС;
- 5) формирование и по возможности явное разрешение топологических уравнений, если в каждое из них входит только одна ранее неопределенная переменная;
- 6) опрос вычислительного блока компонентов с попыткой непосредственного разрешения каждого линейного или нелинейного уравнения по формуле

$$V_{m2[j]} = \frac{W}{m3_j} - \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{IB} \frac{m3_i}{m3_i} \cdot V_{m2[i]}, \quad (24)$$

где V – вектор решения КЦ; W – свободный член уравнения; $m2$ – массив переменных; $m3$ – массив коэффициентов при переменных, j – номер выражаемой переменной;

7) для оставшейся системы линейных алгебраических уравнений, если в ней имеется хотя бы два уравнения, вызывается метод её решения.

В диссертации осуществлена классификация компонентов, а также рассмотрен пример анализа модели на основе представленного алгоритма.

Предложенный алгоритм явно-неявного анализа модели ХТС за счет непосредственного определения значений ряда переменных КЦ, допускающих свое явное выражение на этапе формирования вычислительной модели цепи, позволяет сократить размер решаемой алгоритмами линейной алгебры системы линейных алгебраических уравнений, а, следовательно, минимизировать время проведения анализа КЦ ХТС.

Согласно представленной в диссертации методике формирования системы уравнений с учетом их класса линейные уравнения с постоянными коэффициентами, в том числе и топологические уравнения, формируются один раз за ВЭ (рис. 3). Линейные уравнения, коэффициенты которых зависят от параметров потока или варьируются пользователем с помощью представленного на рисунке 10 компонента «Атрибут», формируются на каждом шаге эксперимента, но не подвергаются алгоритму линеаризации и алгебраизации. Нелинейные и дифференциальные уравнения составляются на каждом шаге с их последующей линеаризацией и алгебраизацией. Благодаря этому, с учетом того, что в исследуемых моделях ХТС доля нелинейных и дифференциальных уравнений не превышает 30 %, наблюдается значительное сокращение времени на выполнение ВЭ в среднем на 65 % по сравнению с алгоритмами анализа, не учитывающими сортировку уравнений согласно их классу. Особенно это ощутимо при исследовании моделей на большом временном интервале и с небольшим шагом по времени.

Целью функционирования интерпретатора языка МАК является построение алгоритмических КЦ (12) на основе моделей алгоритмов исследования и функционирования СТУС, сформированный в графической форме на логическом уровне МКЦ СТУС. Для работы имитационного ядра информация об алгоритмической КЦ представляется в виде узловой матрицы, каждый элемент которой может принимать одно из значений

$$A_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{ветвь } i \text{ инцидентна узлу } j \text{ и информация} \\ & \text{передается от компонента к узлу} \\ -1 & \text{ветвь } i \text{ инцидентна узлу } j \text{ и информация} \\ & \text{передается от узла к компоненту} \\ 0 & \text{ветвь } i \text{ не инцидентна узлу } j \end{cases} \quad (25)$$

где $i = \overline{1, CB}$, $j = \overline{1, CN}$, CB – количество связей компонентов формируемой алгоритмической КЦ; CN – количество ее узлов.

Сформированная на основе правила (25) узловая матрица является членом класса *CAgorithmicCircuit*, объект которого, являющийся алгоритмической КЦ, формируется интерпретатором языка МАК и обрабатывается ими-

тационным ядром. Реализованный алгоритм формирования алгоритмической КЦ состоит из 4 последовательных шагов. Сформированная цепь передается имитационному ядру, обеспечивающему функционирование представленных ею сценариев исследования и функционального проектирования СТУС. Оно заключается в передаче сообщений с результатами выполнения отдельных операций от компонентов-источников к компонентам-приемникам. Каждое сообщение множества M из (12) представляется в виде

$$M = (D, T, B, N), \quad (26)$$

где D – данные любого типа, передаваемые в сообщении между компонентами; T – тип данных, передаваемых в сообщении; B – номер ветви алгоритмической КМ, с которой передается сообщение M ; N – номер узла, которому передается сообщение.

Далее сообщение M передается другим компонентам, подсоединенным к узлу N согласно алгоритму передачи сообщений, основанному на анализе матрицы A (25). Структура каждого реализованного алгоритмического компонента, включает в себя топологический и функциональный блоки, взаимодействующие с соответствующими блоками алгоритмической КЦ и имитационным ядром.

Библиотека моделей компонентов (БМК) комплекса программ моделирования ХТС представляет собой совокупность модулей, содержащих программно-алгоритмические реализации компонентов всех трех подязыков языка МКЦ. Для взаимодействия с определенным модулем комплекса программ класс конкретного компонента наследуется от определенного интерфейсного класса, содержащего основные методы взаимодействия компонента с модулем. Все компоненты языка моделирования ХТС для передачи математических моделей универсальному вычислительному ядру должны быть наследованы от интерфейсного класса *IMarsComponent*.

Набор численных методов расчета параметров и коэффициентов уравнений компонентов ХТС реализованы в интерфейсном классе *IFizChimInterface*. Он включает в себя средства подключения в базе данных характеристик компонент потока, и программную реализацию численных методов определения коэффициентов и характеристик: коэффициента потерь на трение многокомпонентного вещественного потока о стенки элементов и аппаратов ХТС; метод формирования вектора концентраций веществ в некоторой вещественной связи; методы расчета плотности, вязкости и теплоемкости многокомпонентного вещественного потока. Также в данном классе реализованы численные методы расчета констант фазового равновесия согласно численным методикам Шилова и Соава-Редлиха-Квонга. Для реализации последнего разработан алгоритм определения максимального вещественного корня кубического полинома.

Для реализации визуальных компонентов языка ВИП реализован метод перерисовки изображения компонентов, а также интерфейсный класс *IMouseInterface*, содержащий методы обработки событий действий пользователя мышью с изображением данного компонента.

В разработанном комплексе программ реализованы программно-алгоритмические средства исследования новых моделей компонентов всех трех подязыков языка МКЦ и пополнения ими БМК. Генератор моделей компонентов представляет собой отдельный программный модуль, предназначенный для формирования программно-алгоритмического вида компонентов с последующей их компиляцией на языке Visual C++. На его вкладках пользователем формируется информация о классе компонента, узлах, изображениях на слоях редактора, свойствах класса и параметрах компонента, математической и имитационной модели компонента. Результатом его работы является заголовочный и исполнительный файлы, в которых реализуются методы компонента.

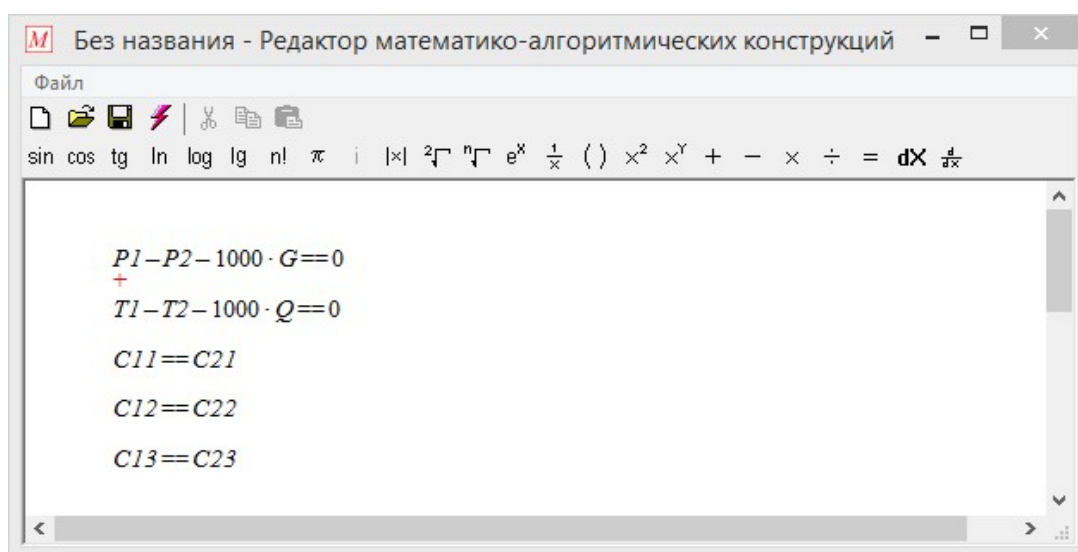


Рис.14. Редактор математико-алгоритмических конструкций

Для экспериментального исследования моделей компонентов перед их добавлением в БМК реализованы интерактивные панели объектного и логического уровней. *Интерактивной панелью* является компонент объектного или логического уровня МКЦ СТУС, представленный уравнениями или математическими выражениями относительно переменных связей компонента. Она включает в свой состав представленный на рисунке 14 редактор математико-алгоритмических конструкций, которые вводятся пользователем в естественно-математическом виде, а затем с помощью интерпретатора преобразуются либо в КЦ математического выражения, либо в алгоритмическую КЦ.

Интерактивная математическая панель (ИМП) объектного уровня позволяет исследовать модели компонентов с НВС. В её параметрах для каждой связи указывается количество входящих в нее энергетических и информационных связей. Математическая модель формируется пользователем в редакторе математико-алгоритмических конструкций, представленном на рисунке 13. На ее основе формируется компонентная цепь, которая встраивается в КЦ исследуемой цепи, в которую включена ИМП.

Интерактивная математико-алгоритмическая панель (ИМАП) логического уровня позволяет в формате языка МАК вводить совокупность выражений. Составленные относительно переменных входных связей компонента,

они будут являться его моделью. Расчет введенного выражения осуществляется имитационным ядром на основе алгоритма передачи сообщений.

Седьмая глава содержит описание построенных многоуровневых компонентных цепей СТУС, предназначенных для проведения вычислительных экспериментов научно-исследовательского, промышленного и учебного назначения. Их выполнение основано на алгоритме, представленном на рисунке 15. Он является развитием представленного на рисунке 2 вычислительного эксперимента и его интерпретацией на многоуровневые компонентные цепи.

С помощью разработанного алгоритма решению подлежат задачи: построения и отладки алгоритмов управления, лежащих в основе функционирования УУ; формирования набора исполнительных и измерительных устройств с поиском значений их параметров – коэффициентов усиления и постоянных времени; определение уставок и пороговых значений, относительно которых должны срабатывать ИспУ.

В диссертации рассмотрен процесс формирования и отладки сценария управления поддержания давления газа в баллоне (газохранилище). Для автоматизации этого процесса построена МКЦ, на объектном уровне которой реализована представленная на рисунке 16, а модель подачи газа в баллон и предоставление его потребителям. Управление клапанами С11 и С12 осуществляется подключенными к ним электромеханическими приводами, представленными компонентами аperiodических звеньев AZ1 и AZ2 с варьируемыми постоянными времени. На логическом уровне данной МКЦ с использованием значения текущего давления газа в баллоне, передаваемого с объектного уровня манометром М3, построена алгоритмическая КЦ сценария функционирования УУ, приведенная на рисунке 16, б. Открытие и закрытие клапанов осуществляется при достижении давлением газа в баллоне минимального и максимального пороговых значений, формируемых регуляторами d1 и d2. Визуализация процесса функционирования сценария управления состоянием баллона и клапанов осуществляется на визуальном уровне многоуровневой КЦ, представленном на рисунке 16, в. Пользователь в интерактивном режиме имеет возможность варьировать значения постоянных времени приводов клапанов и пороговых значений регуляторов.

С помощью средств многовариантного анализа разработана МКЦ определения точки росы по углеводородам, которая направлена на решение актуальной проблемы при транспортировке газа по трубопроводам. Поддержание температуры газа, соответствующей точке росы, направлено на снижение образования гидратов и поддержания пропускной способности трубопроводного транспорта.

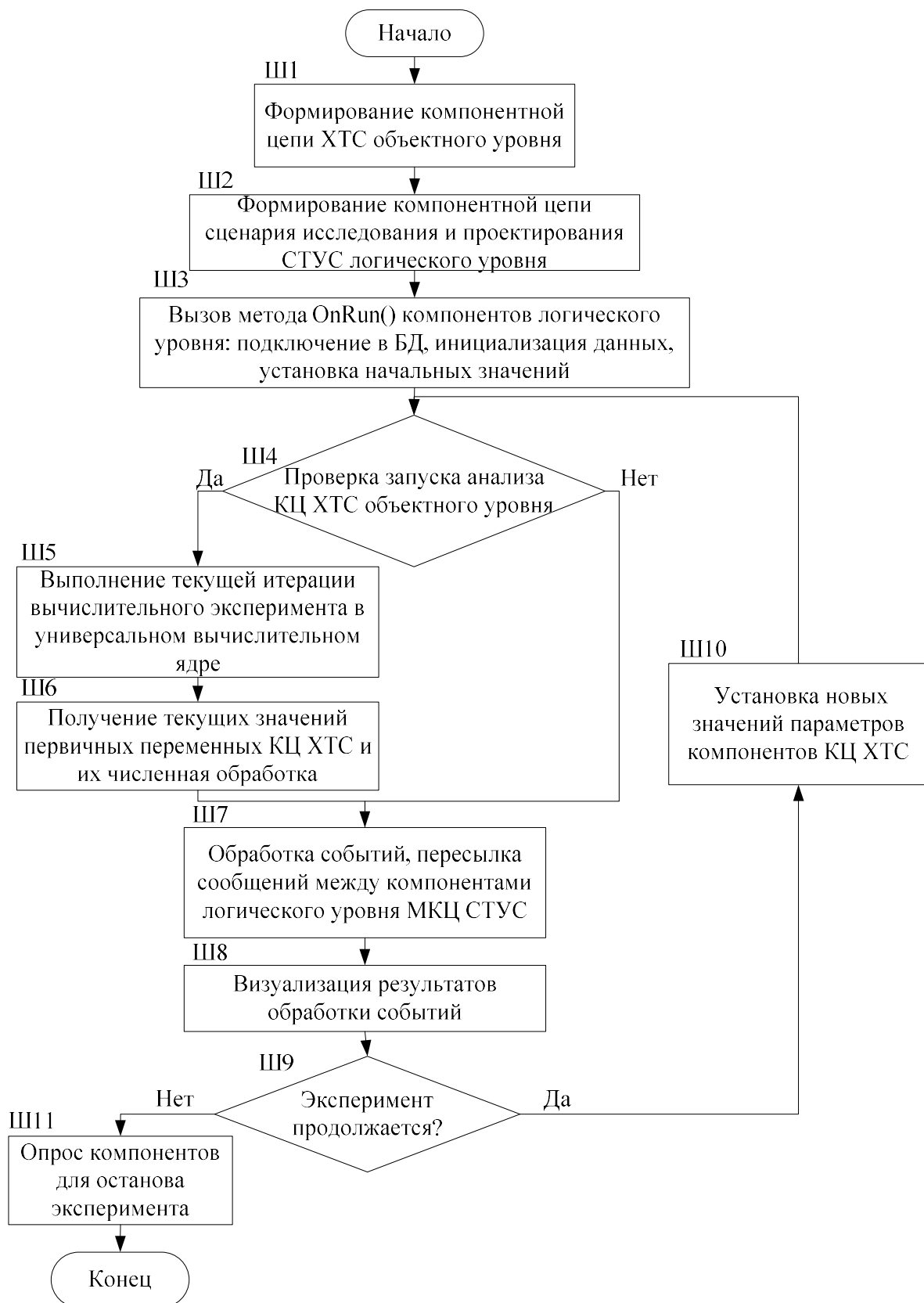
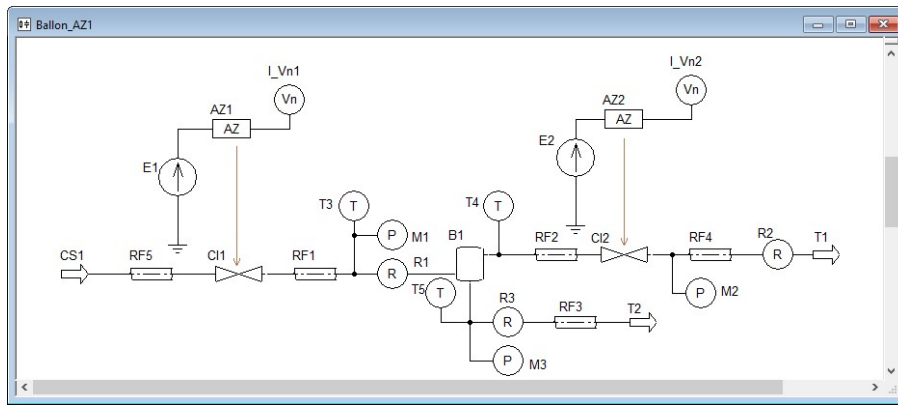
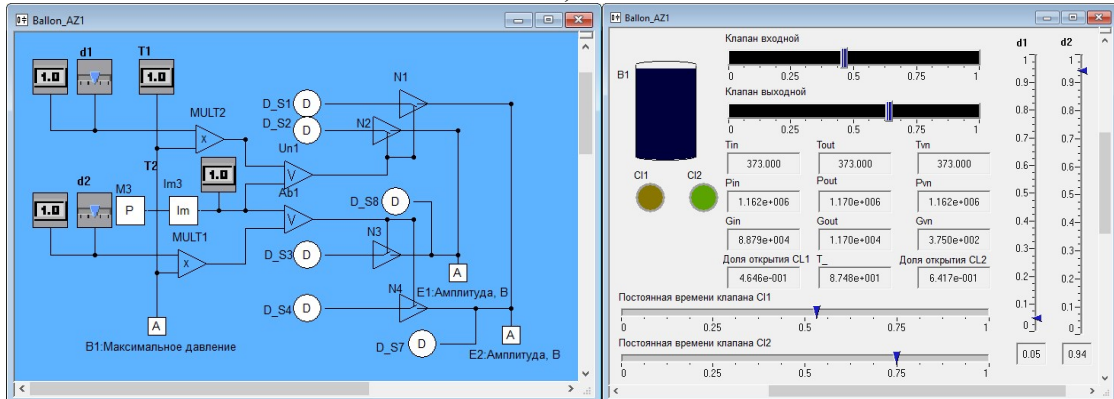


Рис. 15. Алгоритм решения задач исследования и функционирования СТУС с использованием многоуровневых компонентных цепей



а)



б)

в)

Рис. 16. Многоуровневая компьютерная модель поддержания давления газа в баллоне

а) объектный уровень; б) логический уровень; в) визуальный уровень

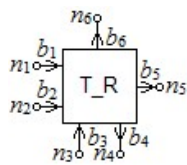


Рис. 17. Компонент «Определение точки росы»

Для определения точки росы на основе обобщенного компонента «Блока обработки данных» разработан компонент «Определение точки росы», представленный на рисунке 17. Его связи предназначены: $S_1 = (b_1 \eta^- n_1)$ – для получения вектора ко-

эффициентов фазового равновесия; $S_2 = (b_2 \eta^- n_2)$ – для получения вектора концентраций веществ потока;

$S_3 = (b_3 \eta^- n_3)$ – для получения сигнала о начале поиска; $S_4 = (b_4 \eta^+ n_4)$ – для пере-

дачи сигнала о проведении очередной итерации анализа; $S_5 = (b_5 \eta^- n_5)$ – для

передачи текущей температуры соответствующему источнику многоком-

понентного потока посредством компонента «Атрибут» (рис. 10); $S_6 = (b_6 \eta^+ n_6)$

– для передачи найденной температуры точки росы.

Анализ основан на измерении температуры первоначально в сторону её уменьшения. Температурой точки росы будет считаться максимальная температура, при которой выполняется равенство

$$\sum_{i=1}^{N_c} \frac{y_i}{K_i} = 1, \quad (27)$$

где y_i – концентрации компонентов в паровой фазе; K_i – константы фазового равновесия, определяемые на основе методики Соава-Редлиха-Квонга.



Рис. 19. Структура распределенной многоуровневой компонентной цепи для реализации сетевого тренажера

Аналогичным образом на основе разработанного в третьей главе компонента «Абсорбер», разработаны многоуровневые КЦ для коррекции параметров модели абсорбера и определения минимального расхода ингибитора при абсорбционной осушке природного газа, что является актуальной задачей предприятий газовой промышленности.

Для предотвращения предаварийных и аварийных ситуаций на объектах повышенной опасности, к которым относятся ХТС газовой промышленности, а также для приобретения навыков оперативного действия персонала в условиях возникновения таких ситуаций управляющий персонал предприятий должен помимо получения теоретических знаний проходить практические

занятия. Их целью является приобретение навыков совместного управления ХТС в сложившихся условиях, ликвидация последствий возникновения ситуация и приведения объекта к штатному режиму функционирования. Наиболее оптимальным их проведением является применение сетевых компьютерных тренажеров.

Для их реализации на базе среды моделирования химико-технологических систем разработана библиотека сетевого взаимодействия моделей, позволившая реализовать на рисунке 19 структуру сетевой компонентной цепи, которая легла в основу разработки сетевых компьютерных тренажеров.

В общем случае распределенная МКЦ состоит из одной серверной (Сервер) и нескольких клиентских (Клиент) частей. В их качестве используются виртуальные приборы, разработанные в редакторе панелей визуализации и интерактивного управления и представляющие собой отдельные приложения, которые открываются специальным движком MARS-Engine.

С помощью представленных тренажеров осуществляется проведение занятий по отработке совместных действий персонала в различных производственных ситуациях без вывода реального оборудования из технологического процесса, не подвергая опасности персонал предприятия, объекты окружающей среды и проживающее население.

Диссертационная работа явилась обобщением научных исследований и программно-алгоритмических разработок автора. В ней осуществлено развитие компонентных цепей и его адаптация к моделированию ХТС с неоднородными векторными потоками в связях компонентов. На его основе реализован комплекс программ моделирования химико-технологических систем предприятий газовой промышленности, позволивший автоматизировать решение задач исследования и функционального проектирования ХТС газовой промышленности, а также является инструментарием для создания различных компьютерных тренажеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате решения поставленных задач были получены следующие результаты, имеющие самостоятельное научное теоретическое и практическое значение:

1. На основе нового подхода к автоматизированному решению задач исследования и функционального проектирования СТус, предназначенных для управления химико-технологическими системами, предложено их новое формализованное представление, лежащее в основе формирования компьютерных моделей сложных технических управляемых систем.

2. Осуществлено развитие метода компонентных цепей, обеспечившее формирование многоуровневых компонентных цепей СТус в виде трех взаимосвязанных уровней в формате языка их графического формирования, состоящего из трех взаимосвязанных подязыков: языка химико-технологических систем, языка моделирования алгоритмических конструкций и языка виртуальных инструментов и приборов, алгоритмический аппа-

рат которых построен на единых принципах объектно-ориентированного программирования.

3. Сформированы графические нотации языка химико-технологических систем для формирования их компьютерных моделей на объектном уровне многоуровневой компонентной цепи. Разработаны алгоритмы автоматического формирования и численного анализа их вычислительных моделей с неоднородными векторными связями, описывающими передачу между компонентами ХТС информационных, мультифизических энергетических и многокомпонентных вещественных потоков.

4. Разработана новая структура универсального вычислительного ядра, адаптированного к анализу вычислительных моделей химико-технологических систем. В его составе реализованы новые численные методы явно- неявного анализа вычислительных моделей ХТС с неоднородными векторными связями с возможностями непосредственного определения значений переменных на этапе формирования системы алгебро-дифференциальных уравнений. Он обеспечивает повышение точности получаемых результатов, а также сокращение времени решения задач на 25-50 % по сравнению с методами неявного анализа, реализованными ранее в рамках универсального вычислительного ядра.

5. Сформирована грамматика языка моделирования алгоритмических конструкций, состоящая из лексем и грамматических правил построения имитационных моделей сценариев экспериментов, включая элементы численной обработки результатов анализа компьютерных моделей ХТС и интерактивного изменения значений параметров модели. Предложена и разработана система отображения лексем языка МАК в формат алгоритмических компонентных цепей и библиотека моделей компонентов основных операций, входящих в алгоритмы проведения вычислительных экспериментов.

6. Предложен и исследован язык виртуальных инструментов и приборов, а также реализован набор визуальных компонентов, предназначенных для формирования на визуальном уровне многоуровневых компонентных цепей лицевых панелей виртуальных приборов, к классу которых относятся панели визуализации и интерактивного управления вычислительным экспериментом.

7. Разработана многоуровневая структура библиотеки моделей компонентов, в которой хранятся компоненты трех подязыков языка многоуровневых компонентных цепей, обеспечивающие построение МКЦ СТЭС на соответствующих слоях многослойного редактора.

8. Сформирована структура и реализован комплекс программ «Среда моделирования химико-технологических систем», основе которого лежит развитие метода компонентных цепей и его адаптация к моделированию химико-технологических систем. Данный комплекс программ обеспечивает проведение автоматизированных вычислительных экспериментов над сложными техническими управляемыми системами предприятий газовой про-

мышленности, а также лежит в основе реализации сетевых компьютерных тренажеров операторов-технологов.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что все поставленные задачи диссертационного исследования успешно решены, а сформулированные цели достигнуты. Дальнейшим развитием исследований видится реализация программно-алгоритмического аппарата формирования распределенных SCADA-систем со встроенными в них компьютерными моделями объектов управления для интеллектуального управления технологическими объектами предприятий химических отраслей промышленности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии и учебные пособия

1. Интеллектуализация управления технологическими процессами на углеводородных месторождениях / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа**, Е.В. Истигечева, И.Я. Клепак. – Томск: В-Спектр, 2012. – 212 с.
2. МАРС – среда моделирования технических устройств и систем. Монография / В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, Т.Н. Зайченко, **Т.В. Ганджа**. – Томск: В-Спектр, 2011. – 278 с.
3. СВИП – система виртуальных инструментов и приборов / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа**, В.В. Ганджа, Ю.И. Мальцев. – Томск: В-Спектр, 2014. – 216 с.
4. Математика на Макрокалькуляторе: Учебное пособие / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа**, Е.В. Истигечева; Федеральное агентство по образованию. Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, Высший колледж информатики, электроники и менеджмента. – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 110 с.
5. Дмитриев В.М. ЛАРМ: Автоматизированный лабораторный комплекс по электротехнике и электронике: Учебное пособие для ВУЗов / В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, **Т.В. Ганджа**, А.Н. Кураколов. – Томск: В-Спектр, 2010. – 186 с.
6. Дмитриев В.М. ЛАРМ: Автоматизированный лабораторный комплекс по электротехнике и электронике: Учебное пособие для ВУЗов / В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, **Т.В. Ганджа**, А.Н. Кураколов. – Томск: В-Спектр, 2010. – 186 с.
7. Дмитриев В.М. Компьютерное моделирование физических задач / В.М. Дмитриев, А.Ю. Филиппов, **Т.В. Ганджа**, И.В. Дмитриев. – Томск: В-Спектр, 2010. – 248 с.

Статьи в зарубежных и отечественных журналах из списка Scopus

1. Dmitriev V.M., Structure of network simulator for training and retraining of operators of controlled technological objects of oil and gas industry / V.M. Dmitriev, **T.V. Gandzha**, I.M. Dolganov, M.O. Pisarev, I.O. Dolganova, E.N. Sizova, E.N. Ivashkina // Petroleum and Coal. – Vol. 57. – 2015. – Issue 6. – P. 691-695.
2. Дмитриев В.М. Архитектура универсального вычислительного ядра для реализации виртуальных лабораторий / В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, **Т.В. Ганджа** // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2004. – № 2. – С. 24-28.
3. Дмитриев В.М. Компьютерное моделирование визуальных интерфейсов виртуальных инструментов и приборов / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа**, В.В. Ганджа, С.А. Панов // Научная визуализация. – 2016. – Т. 8. – № 3. – С. 111-131.

4. Dmitriev V.M. An algorithm to improve the speed and accuracy of analysis of chemical process system operation / V.M. Dmitriev, **T.V. Gandzha**, I.M. Dolganov, Natalia V. Aksenova // *Petroleum and Coal*. – 2017. – Vol. 59. – Issue 4. – P. 429–441.

Статьи в отечественных журналах из перечня ВАК

1. **Ганджа Т.В.** Формализованное представление технически сложного объекта с компьютерной моделью в контуре управления // *Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика*. – 2012. – № 2. – С. 29-35.

2. Дмитриев В.М. Алгоритм формирования и вычисления математических выражений методом компонентных цепей / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа** // *Математические машины и системы*. – 2010. – № 3. – С. 9-21.

3. Дмитриев В.М. Расчетно-моделирующая среда для учебных и научных лабораторий / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа** // *Вестник Московского городского педагогического университета. Серия «Информатика и информатизация образования»*. – 2004. – № 3. – С. 40-45

4. Дмитриев В.М. Редактор виртуальных инструментов и приборов / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа**, Т.Ю. Коротина // *Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика*. – 2009. – № 6. – С. 19-24.

5. Дмитриев В.М. Компьютерная модель управляемых технически сложных объектов / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа** // *Информатика и системы управления*. – 2012. – № 3 (33). – С. 47-59.

6. Дмитриев В.М. Методика стратификации и интеграции компьютерной модели сложной технической управляемой системы / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа**, Т.Н. Зайченко // *Информатика и системы управления*. – 2016. – № 4. – С. 11-22.

7. Дмитриев В.М. Принцип формирования многоуровневых компьютерных моделей SCADA-систем для управления сложными технологическими объектами / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа** // *Информатика и системы управления*. – 2013. – № 2 (36). – С. 24-35.

8. **Ганджа Т.В.** Задачи и архитектура подсистемы документирования исследований в среде многоуровневого моделирования MAPC / **Т.В. Ганджа**, С.А. Панов // *Доклады ТУСУРа*. – 2011. – 2 (24). – Ч. 2. – С. 334-338.

9. Дмитриев В.М. Принципы построения моделей сложных технологических объектов с неоднородными векторными связями / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа**, С.К. Важенин // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2014. – № 1. – С. 104-111.

10. Дмитриев В.М. Построение компьютерных моделей многофракционных физико-химических систем газопромысловых объектов в формате метода компонентных цепей / В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, **Т.В. Ганджа** // *Доклады ТУСУРа*. – 2012. – № 2 (26). – Ч. 1. – С. 145-150.

11. Дмитриев В.М. Автоматическое регулирование расхода метанола при абсорбционной осушке природного газа в установке комплексной подготовки газа / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа**, И.Я. Клепак // *Приборы*. – 2008. – № 6. – С. 52-58.

12. **Ганджа Т.В.** Модели компонентов эколого-экономической системы нефтегазодобывающего комплекса в формате метода компонентных цепей / **Т.В. Ганджа**, О.С. Затик // *Известия Томского политехнического университета*. – 2009. – Т. 314. – № 5. *Управление, вычислительная техника и информатика*. – С. 114-116.

13. Дмитриев В.М. Формирование системы автоматизированного документирования методом компонентных цепей / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа**, С.А. Панов // Информатика и системы управления. – 2014. – № 3 (41). – С. 12-22.
14. Дмитриев В.М. Система визуализации и управления вычислительным экспериментом в среде многоуровневого моделирования МАРС / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа**, Т.Ю. Коротина // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 1 (21). – Часть 2. – С. 149-155.
15. Дмитриев В.М. Система виртуальных инструментов и приборов для автоматизации учебных и научных экспериментов / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа**, С.А. Панов. // Программные продукты и системы / Software & System. – 2016. – № 3. – Т. 29. – С. 154-162.
16. Дмитриев В.М. Генератор моделей компонентов физически неоднородных цепей на базе интерактивной математической панели / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа**, Т.Ю. Коротина // Доклады ТУСУРа. – 2009. – № 2 (20). – С. 94-99.
17. Дмитриев В.М. Построение и исследование активных компонентов в системах многоуровневого моделирования / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа** // Информатика и системы управления. – 2016. – № 4. – С. 11-22.
18. Дмитриев В.М. Методика построения многоуровневых компонентных цепей для моделирования химико-технологических систем / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа** // Доклады ТУСУРа. – 2017. – Т. 20. – № 3. – С. 82-87.
19. Дмитриев В.М. Определение значений параметров регулятора с помощью многоуровневой компьютерной модели / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа**, Т.Н. Зайченко // Доклады ТУСУРа. – 2017. – Т. 20. – № 2. – С. 91-95.

Статьи в рецензируемых сборниках трудов

1. Зайченко Т.Н. Виртуальная учебная лаборатория по курсу «Теория автоматического управления» / Т.Н. Зайченко, **Т.В. Ганджа** // Компьютерные технологии в образовании. Под ред. В.М. Дмитриева. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – Вып. 2. – с. 79-87.
2. **Ганджа Т.В.** Параметрический синтез технических объектов // Компьютерные технологии в современном образовании / Под ред. В.М. Дмитриева. – Томск: изд-во Том. ун-та, 2001. – Вып. 1. – С. 194-200.
3. Дмитриев В.М. Система отображения математических выражений в язык компонентных цепей / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа**, М.А. Ерошкин / Компьютерные технологии в образовании. Под ред. В.М. Дмитриева. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – С. 29-39.
4. Дмитриев В.М. Задачи построения и конфигурирования компьютерных тренажеров / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа** // Дистанционные образовательные технологии. Выпуск 1. Пути развития. Сборник научных трудов. – Томск: ТУСУР, 2004. – С. 70-77.
5. **Ганджа Т.В.** Алгоритм формирования компонентных цепей систем математических выражений // Труды выпускников аспирантуры ТУСУР. Под ред. В.И. Карнышева. – Томск: ТУСУР, 2005. – С. 49-57.
6. Ерошкин М.А. Язык представления математических выражений для реализации редактора Макрокалькулятора / М.А. Ерошкин, **Т.В. Ганджа** // Компьютерные технологии в образовании / Под ред. В.М. Дмитриева. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – Вып. 2. – С. 23-28.
7. Дмитриев В.М. Архитектура расчетно-моделирующей среды для виртуальных лабораторий / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа** // Дистанционные технологии в

образовании. Выпуск 1. Пути развития. Сборник научных трудов. – Томск: ТУСУР, 2004. – С. 62-69.

8. **Ганджа Т.В.** Применение интерактивной математической панели для реализации блоков обработки результатов / **Т.В. Ганджа**, Т.Ю. Коротина // Информационные технологии в социально значимых отраслях экономики (ИТСОЭ-3): Межвузовский сборник научных трудов / Том 3. Информационные технологии в обеспечении качества персонифицированных услуг. – Новосибирск: Редакционно-издательский центр Новосибирского государственного университета. – 2009. – С. 50-59.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612164. Среда компьютерного моделирования MAPC / В.М. Дмитриев, Т.Н. Зайченко, А.В. Шутенков, **Т.В. Ганджа**, В.В. Ганджа. – 15.02.2013. – М.: Роспатент, 2013.

2. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 10233. Библиотека моделей компонентов среды моделирования MAPC для автоматизированного решения задач параметрического синтеза технических объектов / **Т.В. Ганджа**, И.Я. Клепак. – М.: ОФАП, 2008. Оpubл. Компьютерные учебные программы и инновации. – 2008. – № 9. – С. 139.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014615349. Библиотека моделей компонентов системы автоматизированного документирования / **Т.В. Ганджа**, С.А. Панов. – 01.08.2014. – М.: Роспатент, 2014.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014662641. Генератор моделей компонентов среды моделирования MAPC / **Т.В. Ганджа**. – 04.12.2014. – М.: Роспатент, 2014.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009612036. Программное обеспечение «Расчетно-моделирующая среда» / **Т.В. Ганджа**, Т.Н. Зайченко, А.В. Шутенков, А.Н. Кураколов. – 22.04.2009. – М.: Роспатент, 2009.

Тезисы и доклады в трудах конференций

1. Зайченко Т.Н. Виртуальная учебная лаборатория по курсу «Электротехника и электроника» / Т.Н. Зайченко, **Т.В. Ганджа** // Электронные средства и системы управления. Материалы международной научно-практической конференции. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2004. – В трех частях. – Ч. 2. – С. 183-186.

2. **Ганджа Т.В.** Место подсистемы документирования в интеллектуальной SCADA-системе / **Т.В. Ганджа**, С.А. Панов // Современные техника и технологии: Сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 2. / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 317-318.

3. Дмитриев В.М. Компьютерные модели в контуре интеллектуального управления технологическими процессами нефтегазодобывающих предприятий для минимизации техногенного воздействия на окружающую среду / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа** // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-2012): доклады 18-й Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 15-17 октября 2012 г. / Отв. Ред. Л.С. Петрова, В.Н. Масленников. – Томск: САН ВШ; В-Спектр, 2012. – С- 203-207.

4. Дмитриев В.М. Структурно-функциональная схема SCADA-системы для управления технологическими процессами предприятий нефтегазовой промышленности / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа** // Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике: Материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. г. Новочеркасск, 12 марта 2013 г. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск, ЮРГТУ (НПИ), 2013. – С. 17-21.
5. Дмитриев В.М. Компьютерное моделирование SCADA-систем / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа** // Управление большими системами. Материалы X Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Том 3. / Уфимск. гос. техн. ун-т. 5-7 июня 2013 года. – Уфа: УГАТУ, 2013. – с. 75-78.
6. Зайченко Т.Н. Блок обработки результатов вычислительного эксперимента в системе автоматизации функционального моделирования электромеханических систем / Т.Н. Зайченко, **Т.В. Ганджа** // Современная техника и технологии. СТТ-2001. Труды VII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов. 26 февраля – 2 марта 2001 г. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2001. – С. 23-25.
7. Зайченко Т.Н. Многовариантный анализ характеристик технических объектов в системе МАРС / Т.Н. Зайченко, **Т.В. Ганджа** // Радиотехнические и информационные системы и устройства. Тезисы докладов региональной научно-технической конференции. – Томск, 2000. – С. 118-119.
8. Григорьева Т.Е. Методика статистического анализа технических объектов в среде многоуровневого компьютерного моделирования / Т.Е. Григорьева, **Т.В. Ганджа** // Научная сессия ТУСУР-2016: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 25-27 мая 2016 г. – Томск: В-Спектр, 2015. В 6 частях. – Ч. 3. – С. 97-99.
9. Дмитриев В.М. Интерактивная математическая панель для моделирования систем с информационными и энергетическими связями / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа** // Электронные средства и системы управления: Материалы Международной научно-практической конференции. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2004. – В трех частях. – Ч. 2. – С. 62-65.
10. **Ганджа Т.В.** Применение макрокомпонентов для решения задач функционального моделирования и проектирования / Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы X Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 5 апр. 2010 г. // Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2010. – С. 4-8.
11. Панов С.А. Автоматизация документирования в научно-исследовательской деятельности / С.А. Панов, **Т.В. Ганджа** // Современная техника и технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 2. / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 291-292.
12. **Ганджа Т.В.** Компоненты для работы с базами данных в среде многоуровневого компьютерного моделирования МАРС / **Т.В. Ганджа**, С.А. Панов // Перспективы развития информационных технологий: сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции / Под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2014. – С. 40-44.
13. Дмитриев В.М. Структура сетевого тренажера для обучения и переподготовки операторов управляемых технологических объектов нефтегазовой промышленности / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа**, И.М. Долганов, М.О. Писарев // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов XI Международной

конференции (25-27 ноября 2015 г.): В 2-х частях. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2015. – С. 279-284.

14. **Ганджа Т.В.** MARS-ENGINE – средство использования виртуальных приборов // Современное образование: практико-ориентированные технологии подготовки инженерных кадров: материалы междунар. науч.-метод. конф., 29-30 января 2015 г., Россия, Томск. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2015. – С. 49-50.

15. Дмитриев В.М. Исследование механики левого желудочка при сердечной недостаточности для компьютерного моделирования / В.М. Дмитриев, **Т.В. Ганджа**, В.Х. Ваизов // Моделирование: Теория, методы и средства. Материалы XI междунар. науч.-практ. конф. г. Новочеркасск, 31 марта 2011 г. / Юж-Рос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск, ЮРГТУ, 2011. – С. 69-75.

16. **Ганджа Т.В.** Единый подход к решению дифференциальных уравнений и систем на Макрокалькуляторе // Научная сессия ТУСУР-2007. Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 3-7 мая 2007 г. – Ч. 5. – С. 221-223.

