



Российская Академия Наук

ТРУДЫ

Кольского научного центра РАН

3/2015 (29)

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**

выпуск 6

Апатиты
2015

Российская Академия Наук

ТРУДЫ

3/2015(29)

издается с декабря 2010 г.

УДК 004.9

ISSN 2307-5252

ISBN 978-5-91137-317-7

Кольского научного центра

Главный редактор –
д.г.-м.н., проф. Ю.Л. Войтеховский

Заместители главного редактора:
д.г.-м.н., проф. В.П. Петров,
д.т.н., проф. В.А. Путилов

Редакционный совет:
академик Г.Г. Матишов,
академик Н.Н. Мельников,
чл.-корр. В.К. Жиров,
чл.-корр. А.Н. Николаев,
д.э.н. Ф.Д. Ларичкин,
д.т.н. В.А. Маслобоев,
д.г.-м.н. В.П. Петров (зам. главного редактора),
д.т.н. Б.В. Ефимов,
д.ф.-м.н. Е.Д. Терещенко,
к.г.-м.н. А.Н. Виноградов (отв. секретарь)

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**
ВЫПУСК 6

Редколлегия серии
«Информационные технологии»:
профессор, д.т.н. В.А. Путилов (отв. редактор),
д.т.н. А.Г. Олейник (зам. отв. редактора),
д.ф. - м.н. А.П. Афанасьев,
д.т.н. В.А. Маслобоев

184209, г. Апатиты Мурманская область, ул. Ферсмана, д.14
Кольский научный центр РАН
Тел. (81555)79393, 79380. Факс (81555)76425
E-mail: admin@apatitu.ru <http://www.kolasc.net.ru>

- © Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт информатики и математического моделирования технологических
процессов Кольского научного центра Российской академии наук, 2015
- © Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Кольский научный центр Российской академии наук, 2015

Серия «Информационные технологии» представляет результаты исследований и разработок в области создания и развития методов, моделей, информационных технологий и систем поддержки решения задач в широком спектре областей деятельности. Работы, результаты которых представлены в сборнике, выполнялись в рамках государственных заданий и целевых программ, а также при поддержке грантов РФФИ.

Сборник адресован специалистам в области создания и практического использования информационных систем и технологий в различных сферах управленческой и производственной деятельности, преподавателям и студентам вузов соответствующих специальностей.

СОДЕРЖАНИЕ

		Стр.
	Введение	9
А.В. Маслобоев В.А. Путилов	Системный анализ проблемы информационной поддержки сетцентрического управления региональной безопасностью	10
М.Г. Шишаев	Методические основы когнитивных интерфейсов мультипредметных ИС	33
П.А. Ломов Е.Ю. Данилов	Построение когнитивных фреймов на основе онтологических паттернов для визуализации онтологий	43
В.В. Диковицкий	Семантическое профилирование пользователей в задаче информационного поиска	54
А.А. Зуенко А.А. Алмамаев	Применение методов локального поиска при решении задач удовлетворения ограничений	59
А.А. Зуенко	Прямой и обратный вывод в продукционных системах с недоопределенными параметрами	75
А.В. Вицентий	Разработка технологии динамической когнитивной геовизуализации	87
С.Ю. Яковлев А.С. Шемякин	Планирование действий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций	94
А.А. Рыженко Н.Ю. Рыженко Е.В. Гвоздев	Моделирование элементов системы поддержки управления автономными структурами промышленных комплексов	103
Д.Н. Халиуллина С.Н. Малыгина	Основные аспекты комплексной безопасности региона	111
И.О. Датьев	Маршрутные метрики многошаговых беспроводных самоорганизующихся сетей	115
И.О. Датьев А.А. Павлов М.Г. Шишаев	Моделирование беспроводных многошаговых самоорганизующихся мобильных сетей	137
А.А. Туз Виллиам Браун-Аквей Форгор Лемпого А.Г. Кулаков В.Н. Богатиков	Управление с прогнозирующими моделями	151

О.В. Фридман	Анализ программных продуктов для автоматизации формирования учебного плана вуза	162
А.С. Опалев А.В. Щербаков	Разработка и внедрение энергосберегающей технологии обогащения железистых кварцитов на АО «Олкон»	176
В.Ф. Скороходов Р.М. Никитин В.В. Бирюков А.С. Степанникова	Вычислительный эксперимент над моделью процесса разделения минералов флотационным методом	185

3/2015(29)
Published since 2010

Russian Academy of Sciences
transactions

UDC 004.9
ISSN 2307-5252
ISBN 978-5-91137-317-7

Kola Science Centre

Editor-in-Chief –
Yu. L. Voitehovsky, Dr.Sc.,
(Geology and Mineralogy), Prof.

Deputy Editors-in-Chief:
V.P. Petrov, Dr.Sc.
(Geology and Mineralogy), Prof.
V.A. Putilov, Dr. Sci., Prof.

Editorial Council:
G.G. Matishov, Acad. of RAS,
N.N. Melnikov, Acad. of RAS,
V.K. Zhirov, Cor. Member of RAS,
A.N. Nikolaev, Cor. Member of RAS,
F.D. Larichkin, Dr.Sc. (Economics),
V.A. Masloboev, Dr.Sc. (Engineering),
V.P. Petrov, Dr.Sc. (Geology and Mineralogy),
B.V. Efimov, Dr.Sc. (Engineering),
E.D. Tereshchenko, Dr.Sc. (Physics and
Mathematics),
A.N. Vinogradov, Dr.Sc. (Geology and Mineralogy) –
Executive Secretary

**INFORMATION
TECHNOLOGIES**
series 6

V.A. Putilov, Dr.Sc., Prof. (Editor-in-Chief),
A.G. Oleynik, Dr.Sc. (Eng.) (Vice Editor-in-Chief),
A.P. Aphanasyev, Dr.Sc. (Phys. and Maths)
V.A. Masloboev, Dr.Sc. (Eng.)

14, Fersman str., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia
Tel. (81555)79393, 79380. Fax: (81555)76425
E-mail: admin@admksk.apatitu.ru <http://www.kolasc.net.ru>

© Establishment of Russian Academy of Sciences Institute for Informatics and
Mathematical Modelling of Technological Processes of the Kola Science Center
RAS, 2015
© The Branch of Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 2015

The series "Information Technology" represents the research and development results in the field of creation and development of methods, models, information technology and systems to support of tasks solving in a wide range of activity areas. Presented works were performed within the framework of governmental assignments and target programs, as well as with the support of RFBR grants.

The series is intended for experts in development and practical application of information systems and technologies in various fields of administrative and industrial activity, as well as for teachers and students of corresponding specialists of higher education.

CONTENTS

	Page
Introduction	9
V.A. Putilov A.V. Masloboev System analysis of regional security network-centric control information support problem	10
M.G. Shishaev Methodological basis for the cognitive interfaces of multisubject information systems	33
P.A. Lomov E.Yu. Danilov Construction of cognitive frames based on ontological for patterns ontologies visualization	43
V.V. Dikovitsky Semantic profiling of users in task of information retrieval	54
A.A. Zuenko A.A. Almamatov Using of local search methods for solving constraint satisfaction problem	59
A.A. Zuenko Forward and backward chaining inference in productions systems with subdefinite parameters	75
A.V. Vicentiy The dynamic cognitive geovisualization technology development	87
S.Yu. Yakovlev A.S. Shemyakin Planning of action for emergencies prevention and liquidation	94
A.A. Ryzhenko N.Yu. Ryzhenko E.V. Gvozdev Modeling elements system of support management industrial complexes autonomous structures	103
D.N. Khaliullina S.N. Malygina The main aspects of complex security of region	111
I.O. Datyev Routing metrics of multihop wireless ad-hoc networks	115
I.O. Datyev A.A. Pavlov M.G. Shishaev Modelling wireless multistep self-organizing mobile networks	137
A.A. Tuz William Brown- Acquaye Forgor Lempogo A.G. Kulakov V.N. Bogatikov Model predictive control	151

O.V. Fridman	Analysis software for automating development of educational plans of the university	162
A.S. Opalev A.V. Scherbakov	Development and implementation of energy saving technology of beneficiation of ferruginous quartzites in the jsc "Olkon"	176
V.F. Skorokhodov R.M. Nikitin V.V. Birukov A.S. Stepannikova	Computational experiment on a model of minerals separation by flotation	185

ВВЕДЕНИЕ

Компьютерные технологии и моделирование в настоящее время являются обязательными компонентами поддержки принятия решений в сфере управления системами различного уровня и назначения. Несмотря на богатый арсенал уже имеющихся решений и разработок, информационные технологии и методы моделирования продолжают развиваться, обеспечивая как новое качество решения известных задач, так и инструментарий для решения новых. Сохраняют свою актуальность исследования в области интеграции и совместного использования разнородных информационных ресурсов, представления и обработки семантической информации, совершенствования технологий формирования и эффективной эксплуатации сетей на основе мобильных устройств. Все большее внимание при совершенствовании информационных технологий уделяется аспектам взаимодействия человека с компьютерными системами, причем, с акцентом именно на восприятие информации человеком. Постоянный рост объемов перерабатываемой в процессе принятия решений информации требует развития «когнитивности» информационных систем, учета при их разработке ментальных возможностей и стереотипов взаимодействующего с компьютером пользователя.

Работы, вошедшие в шестой выпуск в серии «Информационные технологии» Трудов Кольского научного центра РАН в полной мере соответствуют мировым трендам исследований и разработок в области развития информационных систем и технологий. Исследования, результаты которых представлены в сборнике, охватывают довольно широкий спектр актуальных задач от развития теоретических методов представления и обработки информации до создания прикладных моделей и технологий. Достаточно традиционным для сборников данной серии является учет «арктических» особенностей при постановке ряда задач и разработке их решений. Данный аспект обусловлен тем, что работы, в основном, представлены членами научной школы, сформировавшейся в Институте информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, а также и исследователями, разрабатывающими средства информационной поддержки функционирования объектов, локализованных в Арктической зоне РФ.

УДК 004.89, 004.942, 338.24

А.В. Маслобоев, В.А. Путилов

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ*

Аннотация

В работе проведен системный анализ проблемы информационного обеспечения региональной безопасности с целью определения требований к разработке средств информационно-аналитической поддержки, обеспечивающих повышение эффективности сетецентрического управления безопасностью региональных социально-экономических систем в динамически изменяющихся условиях. Представлена структуризация задач информационной поддержки управления региональной безопасностью в соответствии со специфическими особенностями предметной области исследования. Предложены методы и средства решения этих задач на всех уровнях управления региональной безопасностью.

Ключевые слова:

системный анализ, сетецентрическое управление, региональная безопасность, информационная поддержка, жизненный цикл, кризисная ситуация, информационные технологии.

A.V. Masloboev, V.A. Putilov

SYSTEM ANALYSIS OF REGIONAL SECURITY NETWORK-CENTRIC CONTROL INFORMATION SUPPORT PROBLEM

Abstract

In this research work the system analysis of regional security information support problem in an effort to requirements identification of information and analytical support software tools development, providing decentralized control efficiency enhancement of regional social-economic system security within the dynamically varying conditions, has been carried out. Regional security management information support problem structing in accordance with research object domain specificity has been represented. The problem-solving methodological and instrumental framework at the each level of regional security management has been proposed.

Keywords:

system analysis, network-centric control, regional security, information support, life-cycle, crisis situation, information technologies.

Введение

Современный этап развития Российской Федерации характеризуется усложнением существующих и появлением новых задач управления социально-экономическими системами различного уровня. Эти задачи связаны, главным образом, с необходимостью адаптивного антикризисного управления развитием социально-экономических систем и обеспечения комплексной безопасности во всех сферах и уровнях организации общества в условиях быстро развивающихся

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №15-07-04290, №15-29-06973).

глобализационных процессов. Сложившаяся на сегодняшний день неблагоприятная геополитическая ситуация в мире обуславливает повышение существующих и формирование принципиально новых требований к средствам и технологиям управления безопасностью социально-экономических систем.

Особенно остро проблемы безопасности проявляются на региональном уровне. Это связано с тем, что регионы играют важную роль в социально-экономическом развитии страны, как на национальном, так и международном уровне, и являются основными источниками экономического, промышленного, инновационно-технологического и человеческого потенциала общества в целом.

Воздействие и динамика различного рода внутренних и внешних угроз безопасности региональных социально-экономических систем (РСЭС) приводят к возникновению множества труднопрогнозируемых чрезвычайных и кризисных ситуаций в социальной сфере, экономике, экологии и других сферах регионального развития. Это, в свою очередь, порождает негативные последствия, способные привести к дестабилизации систем более высокого уровня – национального, международного, мирового. В этом состоит специфика региональной безопасности.

Анализ современного состояния исследований проблем безопасности РСЭС [1-14] показывает, что в настоящее время управление региональной безопасностью недостаточно эффективно.

Для парирования угроз региональной безопасности и оперативного планирования антикризисных мероприятий требуется адекватная методическая и информационная поддержка управления безопасностью региональных систем, повышающая его эффективность и обеспечивающая возможность достижения желаемого или допустимого (с позиций концепции приемлемого риска) уровня безопасности элементов и подсистем РСЭС.

Несмотря на то, что в последние десятилетия вопросам безопасности на различных уровнях государственного управления уделяется большое внимание, до сих пор в решении проблем управления региональной безопасностью недооценивается стремительно растущий потенциал когнитивных информационных технологий, методов компьютерного моделирования, социальных сетей и интеллектуальных информационно-аналитических систем нового поколения, включая обучаемые нейронные сети, контекстно-управляемые, мультиагентные и кибер-физические (виртуальные) системы.

Важнейшей особенностью современных глобализационных процессов является повышение требований к информационному обеспечению безопасности РСЭС на международном, национальном и региональном уровнях. Данные требования выражаются, с одной стороны, в необходимости непрерывного информационного мониторинга и индикаторного оценивания объективных и, в большинстве случаев, очевидных угроз региональной безопасности, возникающих в результате проявления различных кризисных явлений в социально-экономической, военно-политической и других сферах. С другой стороны, эти требования выражаются в необходимости прогнозирования не столь явно проявляющихся и зачастую носящих неочевидный (скрытый) характер внешних и внутренних угроз конкретным территориальным образованиям [15]. В таких условиях адекватная информационная поддержка управления региональной безопасностью призвана повысить его эффективность.

Для наилучшего понимания проблематики информационной поддержки управления региональной безопасностью необходимо иметь четкое представление о современном состоянии этой предметной области. Далее рассматривается специфика и структура проблемы управления региональной безопасностью как объекта информационной поддержки.

Специфика проблемы информационного обеспечения региональной безопасности

Исследование проблемы информационной поддержки управления региональной безопасностью проводится применительно к Мурманской области, как наиболее изученному региону Арктической зоны России, стратегически значимому с точки зрения своего геополитического и геоэкономического положения, роли в социально-экономическом развитии и обеспечении обороноспособности страны, запасов природных ресурсов.

Арктические регионы, по сравнению с другими регионами России, имеют специфические особенности, важные в плане региональной безопасности. Эти особенности определяются как географическим положением регионов, так и спецификой хозяйственного освоения территорий. Географическое положение определяет экстремальные природно-климатические условия, низкую устойчивость экологических систем. Особенности хозяйственного освоения - это неразвитость инфраструктуры, очаговый характер промышленно-хозяйственного освоения территорий, низкая плотность населения, удаленность от основных промышленных центров, высокая ресурсоемкость, зависимость хозяйственной деятельности и жизнеобеспечения населения от других регионов России. Специфика добавляет и перегруженность территории объектами оборонно-промышленного комплекса. Эти факторы в совокупности обуславливают уязвимость РСЭС Арктической зоны в плане возникновения разнотипных чрезвычайных и кризисных ситуаций.

Основные причины низкой эффективности управления региональной безопасностью Мурманской области:

- отсутствие единой системы организационного управления региональной безопасностью, в том числе развитой информационной инфраструктуры региональной безопасности;
- децентрализованный характер управления безопасностью региона;
- сложность координации взаимодействия организационно разнородных и территориально распределенных субъектов безопасности на разных уровнях регионального управления;
- изолированное использование средств информационной поддержки деятельности субъектов управления региональной безопасностью;
- отсутствие единого регламента межведомственного информационного взаимодействия.

Управление региональной безопасностью заключается в создании благоприятных условий для обеспечения устойчивого поступательного развития РСЭС, подверженных воздействию динамически изменяющихся внутренних и внешних угроз различной природы. Эти условия определяются имеющейся инфраструктурой безопасности региона (информационной, правовой, транспортной, социальной и т.д.). Информационная среда региональной

безопасности является одним из важнейших компонентов этой инфраструктуры, поскольку на стратегическом, тактическом и оперативном уровнях управления безопасностью региона требуется адекватная информационно-аналитическая поддержка и координация процессов принятия управленческих решений на всех этапах жизненного цикла кризисных ситуаций – от зарождения и идентификации потенциальных угроз региональной безопасности до реакции и восстановления.

Для решения проблемы управления региональной безопасностью необходимо, чтобы процессы обеспечения региональной безопасности были управляемыми. Управляемость предполагает создание многоуровневой системы управления этими процессами. Подходом, призванным повысить качество управления безопасностью региона, является реализация адекватной информационной поддержки управления развитием и функционированием РСЭС посредством создания целостной многофункциональной информационной среды региональной безопасности [16]. Под информационной поддержкой управления понимается обеспечение субъектов управления необходимой информацией для выработки и реализации эффективных управленческих решений, а также средствами ее аналитической обработки.

Для удовлетворения актуальным требованиям к информационному обеспечению региональной безопасности, информационная среда должна быть целостной в смысле охвата всех этапов жизненного цикла угроз региональной безопасности, расширяемой и наделенной потенциалом к саморазвитию. Для создания подобных информационных сред необходимы соответствующие методы и информационные технологии получения, интеграции, анализа и обработки информации, обеспечивающие:

- формализованное представление знаний о предметной области, как основу для автоматизации отдельных аспектов управления региональной безопасностью;

- логическую интеграцию разнородных информационных ресурсов и сервисов;

- формирование и динамическое конфигурирование многоуровневых систем информационной поддержки сетецентрического управления с активными элементами и перестраиваемой структурой;

- мониторинг жизненного цикла угроз региональной безопасности;

- моделирование развития кризисных ситуаций;

- координацию процессов принятия решений на всех уровнях управления региональной безопасностью.

Управление региональной безопасностью и его информационная поддержка по своей структуре многофункциональны и в общем случае включает в себя такие функции управления, как целеполагание, стратегическое планирование, оперативное управление, а также функции контроля, учета, мониторинга и координации. Поэтому информационная поддержка управления региональной безопасностью является сложной, многоаспектной задачей. Во-первых, это обусловлено сложностью самого объекта информационной поддержки – процессов управления региональной безопасностью. Несмотря на то, что в последние десятилетия вопросам безопасности на различных уровнях государственного управления уделялось большое внимание, в настоящее время

термин «региональная безопасность» не имеет четкого определения и может трактоваться весьма широко [9, 17, 18].

Во-вторых, региональная безопасность имеет общие черты с другими видами безопасности (национальной, международной, глобальной и др.), но отличается множественностью форм проявления, учитывающих специфические особенности конкретных регионов. Регионы обладают собственной спецификой и относятся к классу слабоструктурированных сложных динамических систем. В связи с этим, проблематика информационного обеспечения безопасности таких сложных объектов управления, как РСЭС, во многом определяется их специфическими особенностями.

В-третьих, управление региональной безопасностью представляет собой сложный многоэтапный процесс. На каждом этапе задействованы разнотипные субъекты управления (государственные служащие, системные аналитики, менеджеры, военные, эксперты, ученые и т. д.), имеющие различную организационную подчиненность и ведомственную принадлежность. Субъекты преследуют собственные цели с учетом их сферы интересов и обладают разными компетенциями в плане решения вопросов по обеспечению безопасности. Вместе с тем, процессы обеспечения безопасности компонентов региональных систем разнородны по динамике и составу участников. Субъекты управления безопасностью, вовлеченные в эти процессы, как правило, территориально распределены. Следствием этого является отсутствие, в общем случае, единого, централизованного управления региональной безопасностью, структурная разнородность субъектов управления. При проектировании такой структуры и системы управления на задачи администрирования в плоскости информационного обеспечения региональной безопасности, заметно сужается круг потенциально применимых архитектур информационных систем.

Разнородность и территориальная распределенность субъектов, участвующих в процессах управления региональной безопасностью, в сочетании с динамичностью их состава и параметров, создает предпосылки для того, чтобы информационная среда региональной безопасности была интероперабельной и децентрализованной. В такой ситуации, в общем случае, уже не всегда применимы архитектуры и технологии корпоративных информационных систем, ориентированные на централизованное администрирование, хранение и обработку данных. Альтернативой им являются одноранговые архитектуры, которым характерны свойства открытости и расширяемости, а также потенциал самоорганизации [19].

Для повышения эффективности функционирования децентрализованной информационной среды региональной безопасности необходимо, с одной стороны, обеспечить качественные высокоскоростные коммуникации, а с другой – организовать адресный информационный обмен, то есть обеспечить получение той или иной информации только заинтересованными в ней субъектами. Это позволит снизить общий объем циркулирующей в распределенной среде информации и, следовательно, уменьшить нагрузку на реализующие ее программно-технические элементы. Одним из способов решения такой задачи является организация в распределенной информационной среде виртуальных управляющих центров [20, 21], в пределах которых концентрируется информационный обмен между близкими по сфере интересов, компетенциям и профилю деятельности субъектами.

Еще одним следствием разнородности и территориальной распределенности субъектов управления региональной безопасностью является технологическая и семантическая неоднородность информационной среды региональной безопасности. Для информационной поддержки управления региональной безопасностью характерна высокая степень не только технологической (использование различных форматов хранения, представления и обмена данными, разных СУБД и структур баз данных и т.д.), но и семантической разнородности информационных ресурсов (использование профильными ведомствами собственных тезаурусов и процедур, синонимия в именовании информационных объектов, использование различных оценочных шкал, и т.п.). Вместе с тем, в процессах управления региональной безопасностью участвуют специалисты из различных предметных областей, пользующиеся различной терминологической базой, использующие существенно отличные ментальные модели одних и тех же понятий, и процессов. Источником же технологической неоднородности информационно-вычислительных ресурсов является организационная разнородность субъектов управления безопасностью, которые, как правило, к моменту начала совместной деятельности уже имеют и используют свои собственные, отличные по архитектуре и используемым технологиям, информационные поддерживающие инфраструктуры. Эти особенности, зачастую, препятствуют формированию единого информационного пространства межведомственной деятельности в сфере управления региональной безопасностью. Решение проблем технологической и семантической неоднородности совместно используемых информационно-вычислительных ресурсов при решении задач информационной поддержки управления региональной безопасностью достигается на основе применения агентных технологий и онтологий [22].

На разных этапах жизненного цикла угроз региональной безопасности и на разных уровнях управления существенно различаются и задачи информационно-аналитической поддержки. Как следствие, спектр используемых в настоящее время методов и средств информационной поддержки управления региональной безопасностью оказывается весьма разнообразным. При этом ни одно из существующих решений не адресует проблему в комплексе.

Все это повышает роль информационной поддержки управления региональной безопасностью, заключающейся не только в сборе и предоставлении информации для поддержки принятия управленческих решений в этой сфере, но и в использовании методов и средств ее предварительного анализа и обработки для координации процессов децентрализованного управления безопасностью.

Перечисленные особенности обуславливают динамичность и разнородность информационной среды региональной безопасности, необходимость в механизмах координации управления взаимодействием образующих ее децентрализованных подсистем. Такая среда характеризуется сетецентричностью [23] и синтезируется на базе объединения многоуровневых систем управления региональной безопасностью. Сетецентричность предполагает сетевую структуру организационного управления с выделенными управляющими центрами. Это добавляет проблеме информационного обеспечения региональной безопасности дополнительные, нетрадиционные для существующих научно-методических и технологических решений, аспекты.

В условиях децентрализованного принятия решений и многокритериальности решаемых задач на разных уровнях управления региональной безопасностью, а также различий в целеполагании разнородных субъектов безопасности согласно результатам исследований [18, 23] помимо адекватной информационной поддержки необходимо обеспечивать межуровневую и внутриуровневую координацию взаимодействия между различными элементами многоуровневой распределенной системы управления безопасностью в процессе оптимизации показателей региональной безопасности.

Необходимость координации деятельности субъектов безопасности на всех уровнях управления в условиях пространственно-временных и ресурсных ограничений предъявляет высокие требования к качеству информационного обеспечения региональной безопасности. Для удовлетворения этим требованиям информационная среда безопасности региона должна строиться на базе технологий, обеспечивающих ее расширяемость, про-активность, способность к самоорганизации и саморазвитию, совмещению свойств открытости и информационной защищенности, а также достаточный уровень автономности и интероперабельности интегрируемых в ее рамках компонентов региональных информационных систем.

На основании выше сказанного, можно констатировать следующую ситуацию в сфере информационного обеспечения региональной безопасности и, через него – управления устойчивым (безопасным) развитием РСЭС в целом. С одной стороны, существует большое количество современных методов и информационных технологий, эффективно используемых изолированно друг от друга для решения ограниченного круга задач информационно-аналитической поддержки управления региональной безопасностью. С другой стороны, использование комплексного подхода к решению обозначенной проблемы содержит в себе потенциал для повышения эффективности сетецентрического управления в целом, который в настоящее время практически не используется.

Как объект управления и объект информационной поддержки региональная безопасность имеет ряд существенных особенностей. К ним относятся:

- большое количество, территориальная распределенность, функциональная и организационная разнородность, динамичность состава субъектов управления, участвующих в процессах обеспечения региональной безопасности;
- различная природа и неочевидный (скрытый) характер внешних и внутренних угроз региональной безопасности;
- длительный жизненный цикл и отложенность во времени результирующих воздействий угроз региональной безопасности, выражающихся в возникновении труднопрогнозируемых чрезвычайных и кризисных ситуаций;
- распределенность, технологическая, семантическая и организационная разнородность информационных ресурсов, необходимых на разных уровнях принятия управленческих решений в сфере региональной безопасности;
- наличие слабо формализуемых и трудно поддающихся автоматизации начальных этапов жизненного цикла угроз региональной безопасности, включающих зарождение и развитие потенциальных угроз и опасностей, а также проведение предупреждающих диагностирующих мероприятий.

Одной из ключевых особенностей региональной безопасности является организационная разнородность субъектов управления, вовлеченных в процессы обеспечения безопасности. Это обстоятельство затрудняет возможность использования для информационной поддержки управления региональной безопасностью существующих технологий централизованных информационных систем, являющихся, как правило, основой организации функционирования распределенных ситуационно-кризисных центров (СКЦ), в силу того, что последние подразумевают организацию пользователей в жесткую иерархическую структуру.

Существующие подходы к информационному обеспечению региональной безопасности в основном ограничены созданием и поддержкой разного рода мониторинговых информационно-аналитических систем для СКЦ и веб-ресурсов, обеспечивающих субъектам управления доступ к информационно-справочным материалам и нормативным документам на основе соответствующих информационных технологий. Эти ресурсы интегрируют в себе большой объем разноплановой информации о различных объектах безопасности, угрозах, инцидентах, событиях, кризисных ситуациях, планах совместных действий, составе участников кризисного реагирования, регламентах взаимодействия и т.д. Однако чаще всего ресурсы принадлежат разным ведомствам и не связаны между собой, разнородны по технологиям реализации и семантике содержимого. Для совокупного использования ресурсов пользователь должен многократно повторять процедуры согласования доступа к интересующей его информации, регистрации и поиска данных в каждой ведомственной информационной системе в отдельности и т.п. При этом низкий уровень интероперабельности интегрируемых компонентов ведомственных информационных систем, а также автоматизации процедур поиска исполнительных ресурсов (субъектов совместной деятельности) и формирования организационных структур управления безопасностью в разнотипных кризисных ситуациях приводит к тому, что, в условиях большого суммарного объема информации, необходимой для поддержки принятия оперативных и стратегических управленческих решений, практическая ценность поисковых и мониторинговых функций, в особенности на ранних этапах жизненного цикла угроз региональной безопасности, существенно снижается.

Таким образом, для решения проблемы сетецентрического управления региональной безопасностью и повышения его эффективности требуется в комплексе рассмотреть и решить четыре взаимосвязанных задачи:

- 1) задача обработки, анализа и интеграции семантически и организационно разнородной распределенной информации о состоянии компонентов РСЭС;
- 2) задача формализации экспертных знаний с последующим синтезом на их основе новых знаний об исследуемых объектах и процессах безопасности для поддержки принятия управленческих решений;
- 3) задача координации взаимодействия между субъектами управления безопасностью в процессе принятия стратегических, оперативных и тактических решений с учетом информации, поступающей в режиме реального времени;
- 4) задача формирования единой информационной среды (инфраструктуры) региональной безопасности.

Решение первой и второй задачи является основой для решения третьей и четвертой задачи.

Информационная поддержка управления региональной безопасностью на различных этапах развития кризисных ситуаций позволяет повысить качество принимаемых решений на стратегическом, тактическом и оперативном уровнях управления, с одной стороны, и сократить временные и материальные затраты на реализацию антикризисных мероприятий – с другой. Адекватная информационно-аналитическая поддержка обеспечивает сокращение продолжительности жизненного цикла угроз региональной безопасности за счет уменьшения времени отклика (реакции) на возникающие кризисные ситуации уже на начальных этапах их развития.

Структура проблемы информационного обеспечения региональной безопасности

Разнородность и динамичность состава участников процессов управления региональной безопасностью, а также многообразие выполняемых ими функций обуславливают структурную сложность и многоаспектность проблемы информационной поддержки управления региональной безопасностью. В связи с этим, важнейшим условием ее успешного решения является четкое понимание структуры и содержания составляющих ее подзадач.

В общем случае для решения этой проблемы необходимо как методическое, так и информационное обеспечение [24].

Методическое обеспечение управления региональной безопасностью, представляющее собой совокупность как уже существующих, так и разрабатываемых в настоящее время методов, и средств информационного мониторинга и целенаправленной обработки «сырых» и архивных данных, в том числе информации, поступающей в режиме реального времени. Методическое обеспечение, в основном, включает в себя методы и средства поддержки принятия решений, а также средства автоматизации отдельных функций управления региональной безопасностью:

- методы и средства поддержки принятия решений;
- методы интеллектуального анализа данных;
- методы имитационного моделирования динамики развития и поведения социально-экономических систем;
- модели и методы мониторинга и прогнозирования внутренних и внешних угроз региональной безопасности, а также вариантов поведения региональной системы в кризисных состояниях;
- средства оперативной аналитической обработки информации;
- методы и средства автоматизации процессов поиска и обработки информации;
- методы и средства интеграции разнородных информационных ресурсов;
- модели и методы системной оценки рисков возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в условиях пространственно-временных, ресурсных ограничений и неполноты информации;
- методы прогнозирования и стратегического планирования;

– методы координации децентрализованного управления и принятия решений.

Информационное обеспечение управления региональной безопасностью. Для эффективной информационной поддержки процессов принятия решений на разных уровнях управления региональной безопасностью необходимы соответствующие информационные ресурсы и сервисы. Информационные ресурсы играют роль своего рода «сырого материала», из которого путем адекватной переработки на основе соответствующих сервисов можно получать новые данные и знания, необходимые для обоснованного выбора и претворения в жизнь оперативных и стратегических решений по управлению региональной безопасностью в кризисных ситуациях.

К таким базовым информационным ресурсам относятся:

– различные базы данных ведомственных информационных систем, содержащие информацию об объектах и показателях безопасности, потенциальных угрозах и сценариях их развития, инцидентах, событиях, кризисных ситуациях, типовых планах организации антикризисных мероприятий, составе участников кризисного реагирования, регламентах взаимодействия и т.д.

– веб-ресурсы, обеспечивающие информационно-справочную поддержку и удобный унифицированный распределенный доступ к данным;

– средства телекоммуникаций, обеспечивающие абстрагирование от территориальной привязки субъектов управления и ресурсов безопасности.

Информационное обеспечение не ограничивается простым накоплением все больших и больших объемов разноплановой информации о потенциально возможных чрезвычайных и кризисных ситуациях и угрозах безопасности, а представляет собой набор различных информационных, облачных и веб-сервисов, реализующих:

– тренажерно-моделирующие комплексы;

– средства формирования имитационных моделей сложных процессов, протекающих в РСЭС;

– средства интеграции, обработки и анализа информации;

– средства мониторинга, прогнозирования и сценарного анализа социально-экономического развития;

– средства информационно-аналитической поддержки деятельности организационных структур управления региональной безопасностью и т.д.

Задача информационной поддержки управления региональной безопасностью также может быть структурирована в соответствии с тремя основными компонентами инфраструктуры безопасности региона, к которым относятся:

– ресурсы безопасности – организационные, административные, финансовые, информационные и другие;

– инфраструктура безопасности, обеспечивающая условия для реализации эффективного управления региональной безопасностью;

– антикризисное управление, обеспечивающее формирование планов антикризисных мероприятий и их реализацию.

В соответствии с этим, задача информационной поддержки управления региональной безопасностью включает несколько аспектов:

– создание информационных ресурсов для поддержки управления и принятия решений в сфере региональной безопасности – баз данных, словарей и прочих ресурсов, имеющих отношение к задачам управления безопасностью РСЭС, а также удобных средств оперативного распределенного доступа к ним;

– создание средств информационно-аналитической поддержки антикризисного управления, прежде всего – средств интеллектуальной поддержки принятия решений на базе когнитивного и имитационного моделирования процессов управления региональной безопасностью;

– создание информационной инфраструктуры региональной безопасности, обеспечивающей формирование проблемно-ориентированных групп субъектов управления безопасностью (организационных структур управления) и соответствующих информационных ресурсов и сервисов, предназначенных для поддержки отдельно взятой организационной структуры безопасности в рамках локализации (предотвращения) возникшей кризисной ситуации.

Структуризацию задачи информационной поддержки управления региональной безопасностью следует также произвести в соответствии с задачами, возникающими на разных уровнях управления. В работе предложено выделять три уровня управления региональной безопасностью: стратегический, оперативный и тактический. Оперативный уровень управления включает оперативно-стратегический и оперативно-тактический уровни. В силу очевидных и весьма существенных различий во внутренней структуре и локальной целенаправленности процессов, протекающих на разных стадиях развития кризисных ситуаций, существенно отличаются и требования к средствам информационной поддержки на различных уровнях управления региональной безопасностью.

На концептуальном уровне жизненный цикл угроз региональной безопасности представляет собой процесс развития кризисных ситуаций и включает совокупность взаимосвязанных этапов: зарождение угрозы, развитие угрозы, инициализация угрозы, воздействие угрозы, регенерация с возможным порождением новой угрозы.

Стадии жизненного цикла угроз региональной безопасности охватывают различные состояния РСЭС, ее элементов и подсистем, начиная с момента возникновения угрозы безопасности развития системы и заканчивая её воздействием на критическую область РСЭС и регенерацией, либо устранением угрозы на начальном этапе зарождения на основе превентивных (упреждающих) мероприятий (мониторинг, анализ, прогноз общей ситуации).

Угрозы соответственно порождают разнотипные кризисные ситуации.

Кризисная ситуация – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате техногенной аварии, опасного природного явления, стихийного бедствия, террористического акта, социально-экономического, геополитического или межнационального конфликта, которая повлекла за собой социальную нестабильность, человеческие жертвы, значительные материальные потери, угрожающие жизни и безопасности граждан, нормальной деятельности государственных и общественных институтов [25]. В работе [26] предложено качественное описание основных критериев кризисных ситуаций в регионах.

Основные виды региональных кризисных ситуаций [27]:

- изменения в демографической ситуации, приводящие к депопуляции населения, ухудшению генофонда страны и ее регионов;
- превышение рациональных норм техногенной нагрузки территории при размещении объектов, приводящее к ухудшению экосистемы региона;
- падение производства в отраслях специализации региона более чем на 50-60%;
- рост безработицы, превышающий 15% от численности экономически активного населения;
- изменение профиля региона, приводящее к необходимости массовой переквалификации кадров;
- появление в трудоизбыточных регионах беженцев, переселенцев и иностранных рабочих, приводящее к межнациональной и социальной напряженности;
- высокая и постоянно растущая степень зависимости промышленного комплекса (более чем на 50%) от межрегиональных и внешнеэкономических связей;
- низкая обеспеченность финансовыми ресурсами, дестабилизирующая ситуацию в регионе и усложняющая отношения с федеральным центром (например, дотации превышают 30% финансовых средств региона);
- низкая обеспеченность объектами инфраструктуры, ограничивающая возможность дальнейшего развития;
- и др.

Все виды региональных кризисных ситуаций объединяет важная деталь – процесс зарождения каждой из них является скрытым (неочевидным) и, как правило, начинается в нормальных условиях в результате накопления противоречий, источников уязвимостей и угроз, дефектов и постепенной деградации системы.

По динамике развития региональные кризисные ситуации классифицируются следующим образом:

– *мгновенные кризисные ситуации*, когда отсутствует резерв времени для принятия оперативных управленческих решений по локализации возникшей ситуации;

– *быстро протекающие кризисные ситуации* – ситуации, скорость нарастания и распространения которых ограничена, что создает резерв времени на принятие управленческих решений и их реализацию в виде целенаправленного воздействия на объект (систему) с целью его перевода из критического состояния в стабильное путем ликвидации сложившейся неблагоприятной ситуации или за счет снижения нанесенного ущерба;

– *медленно развивающиеся кризисные ситуации* – это ситуации, когда имеется достаточно большой резерв времени для принятия управленческих решений.

В ходе исследований рассматривались быстро протекающие и медленно развивающиеся кризисные ситуации, как наиболее типичные для региональных социально-экономических систем.

Жизненный цикл управления кризисной ситуацией содержит следующие фазы: идентификация угроз безопасности, планирование антикризисных

мероприятий, кризисное реагирование, ликвидация последствий (восстановление).

Жизненный цикл угроз региональной безопасности и развития кризисных ситуаций охватывает все уровни управления, на каждом из которых возникает необходимость в решении соответствующих задач информационной поддержки.

Наиболее сложным является начальный период зарождения и развития кризисных ситуаций. Этот этап является плохо формализуемым и трудно прогнозируемым в силу неочевидного (скрытого) характера угроз и их проявлений. В связи с этим, на этой начальной стадии жизненного цикла задача информационной поддержки выглядит наиболее расплывчато. На этапе зарождения угрозы, зачастую, даже не существует конкретного объекта информационной поддержки.

На этой начальной стадии жизненного цикла облик кризисной ситуации еще не сформировался, и главная задача информационного обеспечения заключается в создании наиболее адекватной среды для противодействия развитию потенциальных угроз и опасностей. Общеизвестным подходом к решению этой задачи, согласно исследованию [28], является использование методов и средств информационного и проблемного мониторинга социально-экономической обстановки в регионе с привлечением экспертного сообщества, на основе социологических опросов, сценарного анализа, анализа архивных статистических данных, а также с применением современных средств инфокоммуникаций - социальных сетей. Роль информационной поддержки на данном этапе достаточно высока: современные компьютерные технологии обеспечивают сбор, автоматизированную обработку и анализ больших объемов разноплановой информации для выявления потенциальных угроз и опасностей регионального развития и поддержки принятия адекватных сложившейся ситуации управленческих решений на основе этой информации. Вместе с тем, обеспечивается возможность создания виртуальных анализаторов (мониторов) - аналогов центров управления в кризисных ситуациях и центров мониторинга социально-экономического развития на базе мониторинговых информационно-аналитических систем, облачных, агентных и веб-технологий. Эти виртуальные аналоги, по сравнению со своими реальными объектами, хотя и теряют отдельные аспекты своей функциональности вследствие виртуализации, но взамен обеспечивают на порядки большие информационные и аналитические возможности, экономию ресурсов и снижение затрат, увеличивают потенциальное количество субъектов управления и экспертов, участвующих в процессах обеспечения региональной безопасности, обеспечивают интеграцию и обработку коллективных экспертных знаний с последующим синтезом на их основе новых знаний, что крайне важно для реализации адекватной информационной поддержки управления региональной безопасностью и повышения его эффективности в условиях децентрализованного принятия решений.

В настоящее время информационная поддержка данной фазы жизненного цикла, как правило, сводится в основном к созданию и поддержанию в актуальном состоянии различных баз данных ведомственных информационных систем, мониторинговых информационно-аналитических систем ситуационно-кризисных центров, а также информационно-справочных веб-ресурсов, содержащих семантически и организационно разнородную, часто

слабо-структурированную информацию об источниках потенциальных угроз и опасностей, кризисных ситуациях и их параметрах, планах антикризисных мероприятий, показателях безопасности, объектах и процессах обеспечения безопасности. Как правило, эти средства информационной поддержки используются изолированно друг от друга и принадлежат разным ведомствам (субъектам управления безопасностью). Подобные информационные ресурсы, несомненно, играют важную положительную роль в информационной поддержке управления региональной безопасностью на ранних стадиях развития кризисных ситуаций. Однако их использование подразумевает активный поиск информации со стороны субъектов управления безопасностью. Наличие у последних достаточно сильной мотивации к поиску необходимой информации для принятия эффективных управленческих решений появляется чаще всего уже после зарождения угрозы и претворения кризисной ситуации в жизнь. Таким образом, ведомственные и мониторинговые информационные системы обеспечивают, в большей степени, поддержку второго этапа жизненного цикла угроз региональной безопасности, когда осуществляется целенаправленный предметный поиск субъектов совместной деятельности, ресурсов и путей разрешения развивающихся кризисных ситуаций.

Эффективность использования информационно-вычислительных ресурсов ведомственных информационных систем для задач управления региональной безопасностью может быть увеличена за счет обеспечения совместного использования территориально распределенных разнородных информационных баз и частичной автоматизации обработки содержащихся в них данных. Современным средством решения задачи, автоматизированной интеллектуализированной обработки разнородной информации из различных источников, являются агентные технологии [29]. Программные агенты, будучи способными к целенаправленным активным действиям от лица своих владельцев, позволяют автоматизировать не только предметный поиск информации в разнородных территориально рассредоточенных источниках, но и обеспечивают возможность оценки потенциальных угроз региональной безопасности в многомерном пространстве критериев, а также поиск решений в условиях нечеткой постановки задачи, создавая тем самым возможность частичной автоматизации процесса управления региональной безопасностью.

Важной проблемой, которую необходимо решить для успешного использования агентных технологий автоматизированной обработки информации, является семантическая неоднородность информационных ресурсов, необходимых для задач информационной поддержки управления региональной безопасностью. Чаще всего, рассматривая проблему совместного использования распределенных разнородных ресурсов, имеют в виду их технологическую неоднородность – различный формат баз данных, различные программно-аппаратные платформы, на базе которых работают информационные хранилища и т.п. Решение проблемы технологической разнородности информационных ресурсов не представляет большой трудности при сегодняшнем уровне развития информационно-коммуникационных технологий. Более важной является проблема установления смысловой идентичности информационных элементов. Информационные ресурсы одной предметной области могут содержать отличающиеся внешне термины, понятия, сущности, которые, тем не менее, могут быть семантически связанными, близкими по смыслу, и, наоборот, имея

одинаковые названия, могут нести абсолютно разную смысловую нагрузку. Эффективным средством описания и анализа семантики разнородных ресурсов являются сетевые модели представления знаний [30], в частности онтологии [31] и концептуальное моделирование предметной области [32].

На остальных этапах жизненного цикла угроз региональной безопасности в основном решаются две группы задач информационной поддержки:

1. Задачи планирования и оперативного управления процессами обеспечения безопасности в кризисных ситуациях (ПОБ КС). На этапах планирования и оперативного управления ПОБ КС также решаются задачи синтеза и анализа ПОБ КС. Задача синтеза состоит в выборе на множестве альтернативных ПОБ КС наилучшей конфигурации ПОБ КС (состава исполнителей и плана антикризисных мероприятий) с учетом параметров кризисных ситуаций (источники угроз, степень опасности, потери, ущерб, время реагирования, требуемые ресурсы и т.д.), а также характеристик доступных в данный момент времени компетенций субъектов управления безопасностью (имеющиеся в наличии исполнительные ресурсы: техника, люди, информация, финансы, материальные затраты и т.д.). Задача анализа плана ПОБ КС состоит в проверке его выполнимости в реальных условиях функционирования. Задача оперативного управления ПОБ КС состоит из задач оперативного анализа (мониторинга) кризисной ситуации и реконфигурирования (синтеза нового структурно-функционального облика ПОБ КС) в случае изменения параметров кризисной ситуации в результате воздействия внешних факторов. Задача мониторинга состоит в как можно более раннем распознавании кризисных ситуаций и их источников, которые могут привести к отклонениям в функционировании РСЭС и ее элементов, а задачей регулирования – разрешение кризисных ситуаций с помощью определенных управляющих воздействий.

2. Задачи моделирования и автоматизации ПОБ КС. Задача моделирования ПОБ КС заключается в создании и исследовании моделей ПОБ КС с целью анализа и прогнозирования сценариев их развития и определения результативности их реализации для конкретных условий. Модели ПОБ КС могут быть также использованы для исследования динамики поведения активных элементов ПОБ КС. Задача автоматизации ПОБ КС состоит в разработке методов, технологий и программных средств получения, обработки и анализа информации для стратегического и оперативного управления кризисными ситуациями и информационной поддержки принятия решений на всех этапах жизненного цикла угроз региональной безопасности.

Различные задачи информационной поддержки определяют и различие используемых на разных этапах жизненного цикла угроз региональной безопасности методов, модельного инструментария, информационных технологий и средств автоматизации. Соотношение фаз развития кризисных ситуаций с задачами и технологиями информационной поддержки приведено на рис. 1 и 2.

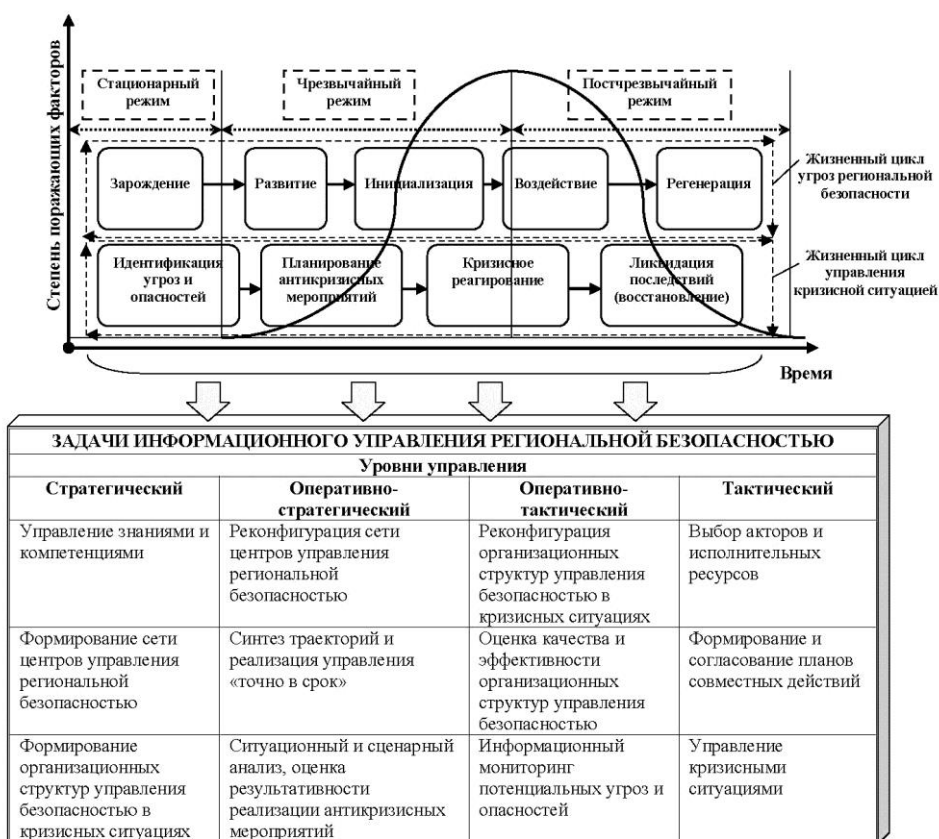


Рис. 1. Этапы жизненного цикла и задачи информационной поддержки

Информационная поддержка управления региональной безопасностью не может ограничиваться созданием отдельно взятых, изолированных ведомственных информационных систем, ориентированных на решение некоторой отдельно взятой задачи и на некоторый ограниченный круг пользователей. Информационное обеспечение региональной безопасности должно обеспечивать, прежде всего, многофункциональную расширяемую информационную среду, ориентированную на комплексную информационно-аналитическую поддержку и координацию процессов принятия решений на всех уровнях управления в сфере региональной безопасности. Для создания такой среды в настоящее время уже существуют и продолжают разрабатываться методы и информационные технологии, способные поддержать решение проблемы сетецентрического управления региональной безопасностью на разных этапах развития кризисных ситуаций.

Одной из ключевых проблем становится совместное использование этих разработок для информационной поддержки сквозного управления региональной безопасностью на всех этапах жизненного цикла – от зарождения и развития потенциальных угроз и опасностей до предотвращения и ликвидации возникших в результате их проявления чрезвычайных и кризисных ситуаций.

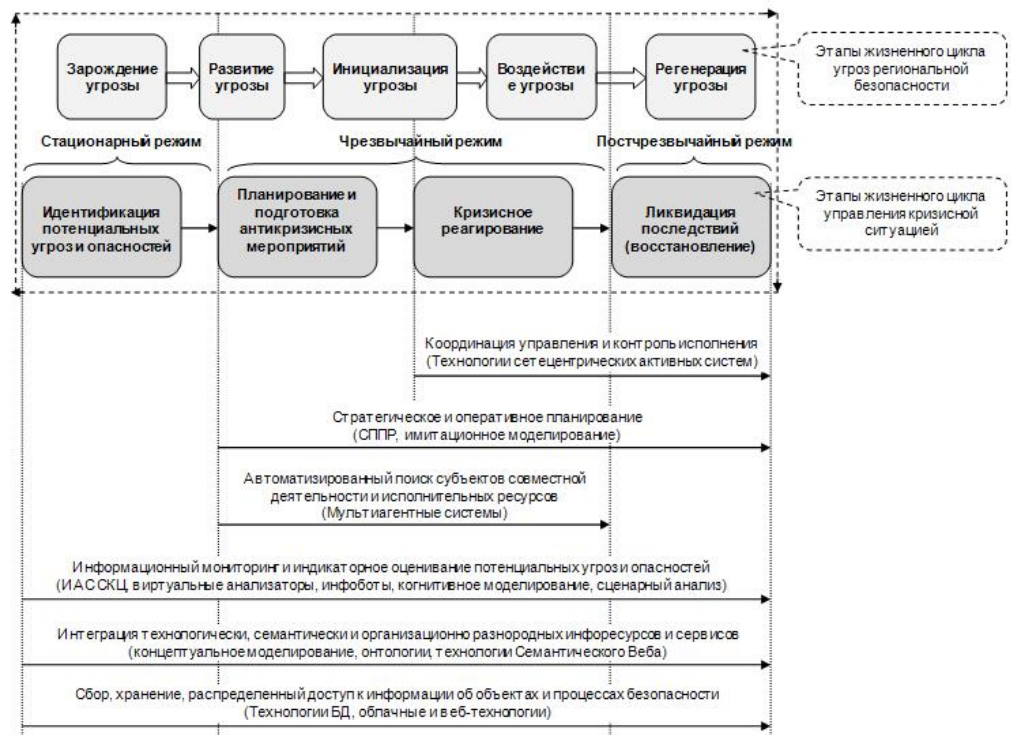


Рис. 2. Этапы жизненного цикла и технологии информационной поддержки

Еще одной важной задачей является обеспечение интероперабельности и потенциала к саморазвитию информационной среды региональной безопасности. Интероперабельность информационной среды будет способствовать более широкому и активному совместному использованию ее функциональных возможностей, ресурсов и сервисов в практической деятельности субъектов безопасности на всех уровнях управления с целью диагностики и локализации возникающих кризисных ситуаций, а также парирования дестабилизирующих факторов различной природы, носящих деструктивный характер. Наличие потенциала к саморазвитию и самоорганизации такой среды будет также способствовать расширению ее адаптационных возможностей в динамически изменяющихся условиях.

Таким образом, на различных этапах жизненного цикла угроз региональной безопасности и стадиях развития кризисных ситуаций соответственно возникают существенно различные задачи информационной поддержки процессов управления региональной безопасностью. Наиболее важными из них являются:

- сбор, хранение, обработка, анализ и распределенный доступ к информации;
- интеграция и формализация экспертных знаний о состоянии элементов и подсистем РСЭС с последующим синтезом на их основе новых знаний для информационной поддержки принятия управленческих решений;
- интеграция технологически и семантически разнородных информационных ресурсов и сервисов;

– автоматизированное формирование организационных структур управления безопасностью и поиск субъектов совместной деятельности для реализации антикризисных мероприятий;

– координация взаимодействия субъектов управления безопасностью и согласование локальных решений децентрализованного управления на разных уровнях организации системы;

– обеспечение субъектов безопасности эффективными средствами поддержки принятия решений на основе имитационного моделирования процессов управления региональной безопасностью;

– информационная поддержка начальных этапов жизненного цикла развития кризисных ситуаций (мониторинг потенциальных источников угроз и опасностей, анализ тенденций развития РСЭС);

– информационный мониторинг жизненного цикла угроз региональной безопасности;

– обеспечение свойств интероперабельности, расширяемости, адаптивности, сетцентричности и самоорганизации информационной среды региональной безопасности.

Перечислим основные задачи информационного обеспечения региональной безопасности, решаемые на разных уровнях управления.

На *стратегическом уровне* управления региональной безопасностью решаются следующие задачи информационной поддержки:

1) управление знаниями о разнородных объектах и процессах обеспечения безопасности;

2) управление компетенциями субъектов безопасности, участвующих в этих процессах;

3) формирование организационных структур управления безопасностью в кризисных ситуациях;

4) формирование сети центров организационного управления региональной безопасностью.

Основной задачей на этом уровне является формирование организационных структур управления безопасностью, обеспечивающих реализацию наилучшего плана антикризисных мероприятий для конкретных региональных кризисных ситуаций с учетом стоимостных затрат, пространственно-временных и ресурсных ограничений.

Оперативно-стратегический уровень управления региональной безопасностью предполагает решение следующих задач информационной поддержки:

1) ситуационный и сценарный анализ, оценка результативности реализации антикризисных мероприятий;

2) синтез траекторий и реализация управления «точно в срок»;

3) реконфигурация сети центров управления региональной безопасностью.

Оперативно-тактический уровень управления требует решения следующих задач:

1) информационный мониторинг потенциальных угроз и опасностей;

2) оценка качества и эффективности организационных структур управления безопасностью;

3) реконфигурация организационных структур управления безопасностью в кризисных ситуациях.

На *тактическом уровне* решаются задачи, связанные непосредственно с управлением кризисными ситуациями, выбором участников (авторов) и исполнительных ресурсов, необходимых для локализации угроз безопасности или кризисных ситуаций, а также формированием и согласованием планов совместных действий. Основной задачей на этом уровне управления является анализ профиля деятельности субъектов управления безопасностью. Это необходимо для определения соответствия их компетенций и возможностей участия в предотвращении текущих или прогнозируемых кризисных ситуаций. При этом спецификации кризисных ситуаций должны быть декомпозированы на подзадачи и распределены между субъектами управления безопасностью. В рамках этой задачи осуществляется подбор (композиция) компетенций субъектов управления безопасностью, представляющих собой совокупность предоставляемых ими ресурсов и услуг (сервисов), которые могут быть использованы в процессах обеспечения региональной безопасности.

Таким образом, задачи информационного обеспечения региональной безопасности пронизывают все уровни управления (стратегический, оперативно-стратегический, оперативно-тактический и тактический) и могут быть выделены в отдельную категорию. Информационная поддержка управления региональной безопасностью является одним из наименее исследованных подходов в управлении социально-экономическими системами. Это перспективная предметная область, появление которой обусловлено прогрессом как в развитии новых организационных форм управления сложными слабоструктурированными системами различной природы, так и прогрессом в сфере информационных технологий, которые позволяют на сегодняшний день говорить о возможности решения проблемы сетцентрического управления безопасностью региональных социально-экономических систем.

В настоящее время создано большое количество ресурсов и технологий, обеспечивающих информационно-аналитическую поддержку ряда задач в области управления региональной безопасностью. Большинство из них реализовано в виде мониторинговых информационно-аналитических систем, систем поддержки принятия решений в кризисных ситуациях, а также веб-ресурсов, обеспечивающих субъектам управления доступ к информационно-справочным ресурсам и нормативным документам на основе соответствующих информационных технологий. Аналитический обзор современных средств информационной поддержки управления региональной безопасностью представлен в работе [33].

Основными недостатками существующих разработок в плане исследуемой в работе проблемы являются:

- отсутствие методов и средств интеграции технологически и семантически разнородных информационных ресурсов, и сервисов;
- отсутствие возможностей автоматизированного синтеза спецификаций организационных структур управления безопасностью и поиска (подбора) субъектов совместной деятельности для реализации антикризисных мероприятий;

- отсутствие единых регламентов информационного взаимодействия субъектов управления безопасностью;
- отсутствие методов и средств координации локальных решений децентрализованного управления на разных уровнях организации системы обеспечения региональной безопасности;
- частичная информационная поддержка начальных этапов жизненного цикла развития кризисных ситуаций;
- каждая отдельная система – это изолированный, обособленный «островок» методов и технологий информационной поддержки и, как следствие, невозможность совместного использования в силу низкого уровня интероперабельности функциональных элементов;
- плохая адаптивность к динамически изменяющимся условиям.

Проведенный системный анализ проблемы информационного обеспечения региональной безопасности позволил сформулировать основные требования к разработке комплексных автоматизированных систем информационной поддержки сетецентрического управления региональной безопасностью. К этим требованиям относятся:

- учет активности субъектов управления безопасностью, то есть наличия у них собственных целей, сферы интересов, компетенций и т.д.;
- обеспечение кооперативности участников процессов управления безопасностью в кризисных ситуациях, то есть возможности формирования организационных структур (коалиций) управления безопасностью для совместной деятельности с целью предотвращения и ликвидации последствий кризисных ситуаций, обеспечения безопасности в целом;
- обеспечение адаптивности системы управления региональной безопасностью, то есть способности самостоятельно воспринимать окружающую среду и приспосабливаться к ее изменениям;
- обеспечение координируемости и децентрализации управления, то есть согласования локальных решений сетецентрического управления посредством переговорного процесса;
- обеспечение интероперабельности, расширяемости, интерактивности, мобильности, персонализации, а также возможностей к саморазвитию и самоорганизации информационной среды региональной безопасности.

Учет этих требований позволяет, с одной стороны, включать новых субъектов в процессы управления региональной безопасностью, а с другой – динамически формировать структуру и состав многоуровневой системы сетецентрического управления региональной безопасностью в зависимости от параметров конкретных кризисных ситуаций из множества доступных компонентов (субъектов, ресурсов, сервисов и т.д.).

Заключение

Системный анализ проблемы сетецентрического управления региональной безопасностью показал ее высокую актуальность, значимость для национальной экономики и обороноспособности страны. Это обусловлено необходимостью обеспечивать согласованность взаимодействия субъектов безопасности региона на всех уровнях управления устойчивым развитием и функционированием РСЭС в различных условиях неблагоприятного

воздействия внешних и внутренних факторов, как социально-экономического, природно-техногенного, геополитического характера, так и инспирированных человеком. Особенно актуальна эта проблема для арктических регионов России. Проблема до сих пор остается полностью не решенной.

Для решения проблемы в современных условиях необходимо повышение эффективности деятельности организационно разнородных и пространственно распределенных субъектов управления региональной безопасностью. Это достигается за счет адекватной информационной поддержки и координации процессов принятия управленческих решений в этой сфере. До настоящего времени задачи и средства информационной поддержки и координации сетцентрического управления региональной безопасностью не рассматривались в комплексе и не решали проблему в целом.

Анализ современного методического и программного инструментария, используемого в области информационного обеспечения региональной безопасности, позволил сформулировать общие и частные требования к разработке методологии и средств информационно-аналитической поддержки, ориентированных на решение проблемы сетцентрического управления региональной безопасностью. Эти средства реализуют интегрированную информационную среду, обеспечивающую повышение эффективности сетцентрического управления региональной безопасностью.

Средства информационно-аналитической поддержки управления региональной безопасностью должны быть ориентированы на непрограммирующего пользователя, учитывать его активность и сферы интересов, обеспечивать автоматизированный выбор методов решения поставленных задач, сопровождать процесс выработки и реализации управленческих решений в рекомендательном режиме.

Литература

1. Бурков, В.Н. Модели и методы управления безопасностью / В.Н. Бурков, Е.В. Грацианский, С.И. Дзюбко, А.В. Щепкин. - М.: Синтег, 2001.- 139 с.
2. Возжеников, А.В. Региональная безопасность: геополитические и геоэкономические аспекты (теория и практика) / А.В. Возжеников. - М.: Изд-во РАГС, 2006. - 260 с.
3. Глобальная безопасность: инновационные методы анализа конфликтов / А.И. Смирнов и др. - М.: Общество "Знание" России, 2011. - 272 с.
4. Кульба, В.В. Анализ устойчивости социально-экономических систем с использованием знаковых оргграфов / В.В. Кульба, П.Б. Миронов, В.М. Назаретов // Автоматика и телемеханика. - 1993. - № 7. - С.130–137.
5. Малинецкий, Г.Г. Управление риском. Риск, устойчивое развитие, синергетика / Г.Г. Малинецкий. - М.: Наука, 2000. - 432 с.
6. Маслобоев, А.В. Обеспечение глобальной безопасности регионального развития (постановка задачи) / А.В. Маслобоев, В.А. Путилов // Труды Института системного анализа РАН: Прикладные проблемы управления макро-системами. - 2010. - Т.59. - С.29-44.

7. Северцев, Н.А. Системный анализ и моделирование безопасности / Н.А. Северцев, В.К. Дедков. - М.: Высшая школа, 2006. - 462 с.
8. Управление рисками и безопасностью / под. ред. Д.С. Черешкина // Труды Института системного анализа РАН. - М.: УРСС, 2009. - Т.41. - 288 с.
9. Управление региональной безопасностью на основе сценарного подхода / В.Л. Шульц и др. - М.: ИПУ РАН, 2014. - 163 с.
10. Юсупов, Р.М. Наука и национальная безопасность. -2-е изд. / Р.М. Юсупов. - СПб.: Наука, 2011.- 369 с.
11. Яковлев, С.Ю. Современные тенденции в управлении безопасностью сложных систем / С.Ю. Яковлев // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. - Вып. 4. -5/2013(18). - Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2013. - С.29-39.
12. Blinc, R. Sustainable development and global security / R. Blinc, A. Zidansček, I. Šlaus // Proceedings of the Third Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems Energy. - June 2007. - Vol. 32, Iss. 6. - P.883-890.
13. DeTombe, D.J. Global Safety / D.J. DeTombe // Pesquisa Operacional. - 2010. - Vol. 30. - No. 2. -P.387-404.
14. Zgurovsky, M. Global simulation of quality and security of human life / M. Zgurovsky // Romanian Journal of Economic Forecasting. - 2009. - № 3. - P.5-21.
15. Диагностика и сценарный анализ внешних угроз региональной безопасности / В.Л. Шульц и др. // Национальная безопасность / nota bene. - 2014. - №5. - С.626-664.
16. Маслобоев, А.В. Мультиагентная информационно-аналитическая среда поддержки управления региональной безопасностью «Безопасный Виртуальный Регион» / А.В. Маслобоев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2013. - №4(86). - С.128-138.
17. Загребнев, С. Региональная безопасность в системе национальной безопасности Российской Федерации / С. Загребнев // Власть. - 2010.- №10. -С.90-92.
18. Маслобоев, А.В. Многоуровневая рекуррентная модель иерархического управления комплексной безопасностью региона / А.В. Маслобоев, В.А. Путилов, А.В. Сютин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2014. - №6(94). - С.163-170.
19. Сухорослов, О.В. Пиринговые системы: концепция, архитектура и направления исследований / О.В. Сухорослов // Труды Института системного анализа РАН: Проблемы вычислений в распределенной среде: прикладные задачи. - М.: РОХОС, 2004. - С.7-43.
20. Маслобоев, А.В. Виртуальные когнитивные центры как интеллектуальные системы для информационной поддержки управления региональной безопасностью / А.В. Маслобоев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2014. - №2(90). - С.167-170.
21. Маслобоев, А.В. Мультиагентная технология формирования виртуальных бизнес-площадок в едином информационно-коммуникационном пространстве развития инноваций / А.В. Маслобоев // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО.- 2009. - №6(64). - С.83-89.
22. Расселл, С. Искусственный интеллект. Современный подход / С. Расселл, П. Норвиг. - М.: Вильямс, 2007. - 1408 с.

23. Маслобоев, А.В. Координация в многоуровневых сетевых системах управления региональной безопасностью: подход и формальная модель / А.В. Маслобоев, В.А. Путилов, А.В. Сютин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2015. - Т.15. - №1. - С.130-138.
24. Маслобоев, А.В. Специфика и структура задачи информационной поддержки управления безопасностью региональных социально-экономических систем / А.В. Маслобоев, В.А. Путилов // Вестник МГТУ: труды Мурманского государственного технического университета. - 2015. - Т.18.- №3. - С.476-485.
25. Ямалов, И.У. Моделирование процессов управления и принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций / И.У. Ямалов. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. - 288 с.
26. Шпаговский, Ю.Г. Чрезвычайные ситуации как объект правового регулирования / Ю.Г. Шпаговский // Проблемы безопасности в ЧС. - 2004. - № 1. - С.85-93.
27. Вечканов, Г.С. Экономическая теория / Г.С. Вечканов. - СПб.: Питер, 2011 - 512 с.
28. Олейник, А.Г. Организация информационно-аналитической структуры поддержки управления региональным развитием / А.Г. Олейник, В.А. Путилов // Труды Института системного анализа РАН: Прикладные проблемы управления макросистемами. - 2010. - Т.59. - С.175-192.
29. Wooldridge, M. An Introduction to MultiAgent Systems. Second Edition / M. Wooldridge. - John Wiley & Sons, 2009. - 484 p.
30. Гаврилова, Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. - СПб.: Питер, 2000. - 384 с.
31. Ломов, П.А. Интеграция данных на основе онтологий для обеспечения информационной поддержки управленческих решений / П.А. Ломов, М.Г. Шишаев // Труды Института системного анализа РАН. - М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008. - Т.39. - С.159-173.
32. Олейник, А. Концептуальное моделирование региональных систем / А. Олейник. - Издательский Дом LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. - 204 с.
33. Маслобоев, А.В. Реализация трансграничных ИТ-проектов в сфере информационного обеспечения комплексной безопасности развития арктических регионов: состояние и перспективы /А.В. Маслобоев // Информационные ресурсы России. - 2014.- №3(139). - С.13-20.

Сведения об авторах

Маслобоев Андрей Владимирович – к.т.н., доцент, старший научный сотрудник,
e-mail: masloboev@iimm.ru

Andrey V. Masloboev - Cand. of Sci (Tech), associate prof., senior research fellow

Путилов Владимир Александрович – д.т.н., профессор, директор,
e-mail: putilov@iimm.ru

Vladimir A. Putilov - Dr. of Sci (Tech), professor, director

УДК 004.5

М.Г. Шишаев

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОГНИТИВНЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ МУЛЬТИПРЕДМЕТНЫХ ИС

Аннотация

В статье рассмотрены методические основы синтеза когнитивных интерфейсов мульти предметных информационных систем. Предложено определение когнитивного пользовательского интерфейса, подходы к его формальной оценке. Отдельно рассмотрены семантический и перцептивный аспекты когнитивных интерфейсов, понятия релевантности, пертинентности, гештальтов и перцептивных стереотипов.

Ключевые слова:

мультипредметная ИС, семантическая модель, пользовательский интерфейс, когнитивность, релевантность, пертинентность, гештальт, перцептивные стереотипы.

M.G. Shishaev

METHODOLOGICAL BASIS FOR THE COGNITIVE INTERFACES OF MULTISUBJECT INFORMATION SYSTEMS

Abstract

The article describes the methodological basis of the synthesis of cognitive interfaces for multisubject information systems. A definition of the cognitive user interface as well as approaches to its formal assessment are given. Special attention is paid to semantic and perceptual aspects of cognitive interfaces, the concept of relevance, pertinence, and gestalt perceptual stereotypes.

Keywords:

multisubject IS, semantic model, user interface, cognitive, relevance, pertinence, gestalt, perceptual stereotypes.

Введение

За последние десятилетия информационные системы (ИС) претерпели впечатляющую эволюцию. Современные ИС отличаются большим разнообразием: масштабы – от микрочипа до глобальных систем; функциональность – от тривиального хранения данных до искусственного интеллекта. Выросли объемы хранимой информации. По оценкам экспертов, совокупный объем данных, хранимый в сети Интернет, удваивается каждые два года. Современный человек за месяц получает и обрабатывает столько же информации, сколько человек XVII века - за всю жизнь. Рост объемов информации ИС, расширение их функциональных возможностей привели к широкому распространению крупных информационных систем, ориентированных на различные категории пользователей. Под различными категориями пользователей имеются в виду лица, принадлежащие разным возрастным категориям, различным социальным слоям, имеющие различные культурные традиции и области профессиональных интересов, и т.д. Мы назвали такие системы *мультипредметными*. Подобные

системы можно противопоставить специализированным или проблемно ориентированным ИС, нацеленным на решение некоторого ограниченного спектра взаимосвязанных прикладных задач или же информационную поддержку некоторого единственного сообщества пользователей, определяемого возрастом, профессиональными или досуговыми интересами, или другими признаками. Примерами мультипредметных информационных систем являются новостные сайты, ресурсы, предоставляющие справочную информацию о некоторой территории или ином объекте, представляющем интерес для пользователей различных категорий, разного рода интернет-порталы, и другие.

Мультипредметные системы выдвигают специфические требования к качеству их пользовательского интерфейса (ПИ). В некотором смысле, они должны «угодить всем» – обеспечить удобный интуитивно понятный механизм доступа и интерпретации информации для пользователей разных категорий. Совокупность свойств интерфейса, обеспечивающих его интуитивную понятность и способствующих эффективному пониманию информации, передаваемой в рамках интерфейса, мы будем называть когнитивными свойствами, а интерфейс, обладающий ими, *когнитивным интерфейсом*. Очевидно, что для разных категорий пользователей, вследствие различий в представлениях последних об окружающем мире (ментальных моделях), обеспечить когнитивные свойства в пределах одного статичного пользовательского интерфейса трудно. Выходом из ситуации может служить динамическое формирование интерфейса, адаптированного под актуального пользователя, в данный момент использующего систему. Сегодня уже существуют некоторые информационные технологии, в той или иной мере способствующие решению этой задачи – каскадные таблицы стилей, облака тегов, и т.п. Однако, упомянутые технологии решают лишь техническую задачу генерации пользовательских интерфейсов, отвечая на вопрос «КАК сформировать интерфейс», оставляя без ответа вопрос «КАКИМ должен быть интерфейс мультипредметного ресурса для данного пользователя». Для правильного ответа на данный вопрос, определяющего последующую успешность применения технологий динамической генерации пользовательских интерфейсов, необходимы четкие критерии качества (когнитивных свойств) интерфейса и соответствующие средства идентификации ментальных стереотипов пользователей. Мы исходим из довольно очевидного предположения, что когнитивное качество интерфейса зависит от того, насколько полно он соответствует ментальным стереотипам пользователя. Для формального определения этого соответствия необходимо, с одной стороны, иметь четкое формальное представление информации и знаний, хранимых в системе (суть – объекта передачи в рамках человеко-машинного интерфейса). С другой стороны, также необходимо понимание и формальное представление закономерностей человеческого восприятия и интерпретации информации. В данной статье рассмотрены ключевые понятия, связанные с эффективностью передачи информации и знаний между человеком и машиной – когнитивность, релевантность, пертинентность, гештальт, и другие, на основе которых возможно определение указанной меры соответствия.

Когнитивность как свойство человеко-машинного интерфейса

Современный словарь иностранных слов определяет термин «когнитивный» следующим образом: когнитивный [лат. *cognitio* - восприятие, познание] - относящийся к познанию, к функциям мозга, которые обеспечивают формирование понятий, оперирование ими и получение выводных знаний. [1]. Опираясь на данное определение, «когнитивный интерфейс» (КИ) можно представить, как интерфейс, обеспечивающий правильное формирование понятий в ходе человеко-машинного взаимодействия. При этом «правильность» в данном случае подразумевает возможность эффективного оперирования этими понятиями (в том числе – вывода новых знаний) для достижения стоящих перед пользователем целей.

В современной философии также существует еще одно понятие, тесно связанное с вопросами построения когнитивных человеко-машинных интерфейсов: «когнитивная информация». Коротко – это информация, порожденная на основе сигналов, извлекаемых из окружающей среды и необходимая живому организму для выживания. В работе [2] отмечается, что когнитивная информация (или знание) не содержится в окружающей среде как некая данность. Порождение этой информации требует наличия соответствующих условных алгоритмов – правил, устанавливающих условные связи между инвариантными сигналами, параметрами, инвариантными структурами, корреляциями и т.д. Эти правила реализуются когнитивной системой человека (рис. 1).

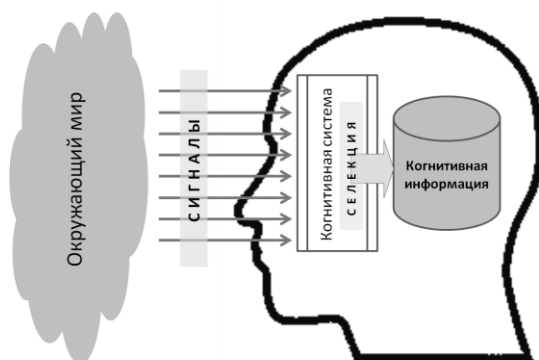


Рис. 1. Схема формирования когнитивной информации

Одной из первых моделей, описывающих процесс человеческого познания с точки зрения когнитивных процессов, является модель ранней селекции Бродбента [3]. В соответствии с данной моделью, поступающая извне в виде разнообразных сигналов информация подвергается фильтрации и последующему запоминанию с целью обработки. Изначально, Бродбент предполагал, что фильтрация осуществляется на основе лишь физических параметров сигналов (громкость, тональность, цвет, и т.п.). Однако впоследствии Дж. Греем и А. Ведденберном было доказано, что выбор каналов (селекция) осуществляется человеком с учетом семантики поступающей информации [4]. Таким образом, в когнитивном процессе задействован еще один компонент, обеспечивающий анализ семантики поступающей информации. Назовем его «анализатор семантики» или «менталитет» (рис. 2).

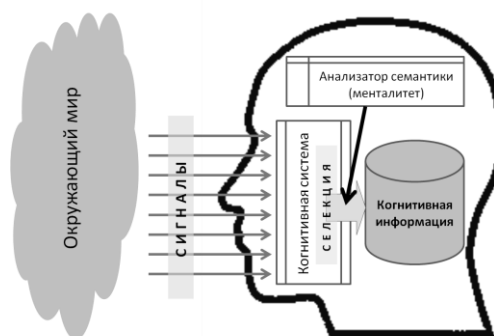


Рис. 2. Модель когнитивного процесса

В контексте человеко-машинного взаимодействия роль окружающего мира играет информационная система, формирующая некоторые образы, подлежащие восприятию человеком в рамках пользовательского интерфейса. Поскольку данные образы формируются целенаправленно, в рамках управляемого процесса, это означает, что информационная система может и должна быть активной, обладать внутренней интенциональностью. Мы предполагаем, что если при этом формируемые системой сигналы согласуются с менталитетом человека-пользователя, то когнитивный процесс будет более эффективен – человек быстрее и точнее построит правильные ментальные образы, составляющие когнитивную информацию. То есть, часть селективных функций будет делегирована от человека машине (рис. 3). Для реализации той или иной части когнитивных функций информационная система должна располагать представлением об ожиданиях пользователя. Назовем систему таких представлений «моделью менталитета пользователя» или «моделью ментальных стереотипов».

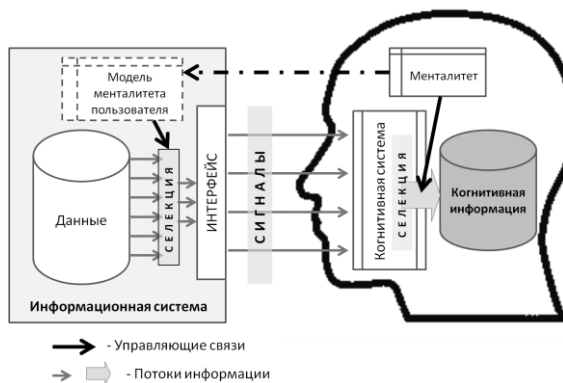


Рис. 3. Модель когнитивного интерфейса

Уточним определение когнитивного интерфейса с учетом сказанного: КИ – это интерфейс, реализующий часть когнитивных функций человека и обеспечивающий правильное и эффективное, в смысле скорости, формирование понятий на основе воспринимаемых сигналов. Тогда меру когнитивности ПИ можно определить, как долю когнитивных функций, делегированных системе. Очевидно, что теоретический предел этой доли зависит от точности модели

пользовательского менталитета и точности семантической модели данных информационной системы.

Правильность интерпретации предъявляемых в рамках интерфейса понятий обеспечивается, в первую очередь, корректностью семантической составляющей интерфейса: человеку должны быть предъявлены лишь значимые компоненты и отброшены второстепенные. Это, в свою очередь, обеспечивается корректностью модели ментальных стереотипов и соответствующих процедур селекции. Вместе с тем, важное значение имеет и способ визуализации отобранной информации: если при визуализации учитываются стереотипы зрительного (или иного - для "невизуальных" интерфейсов) восприятия, то скорость когнитивного процесса может быть существенно увеличена.

Таким образом, можно выделить две фазы формирования когнитивного интерфейса и, соответственно, два аспекта когнитивности ПИ - семантическую и перцептивную (рис. 4).

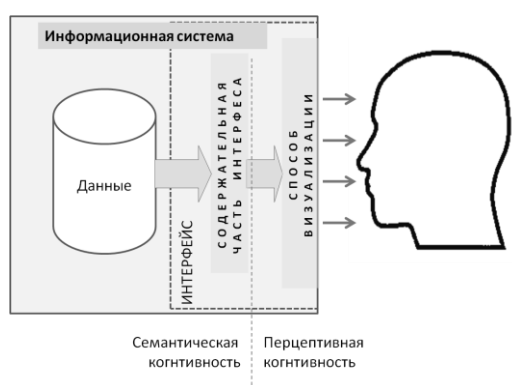


Рис. 4. Две составляющих когнитивности интерфейса

Семантическая когнитивность ПИ: модель ментальных стереотипов, релевантность и пертинентность

Если в сложных ситуациях информационная система не способна предложить пользователю уже готовое однозначное и правильное решение, то она вполне может и должна сформировать некоторое множество информационных потоков, передаваемых в рамках человеко-машинного интерфейса, облегчающее когнитивный процесс, то есть выявление человеком значащих факторов и их комбинаций для последующего принятия решения. Это становится возможным, если в рамках когнитивного интерфейса не пытаться смоделировать менталитет человека вообще, а сконцентрироваться на семантической модели задачи, решаемой в данный момент пользователем. В контексте отдельно взятой задачи (или некоторого класса схожих задач), пользователь, как правило, имеет в той или иной степени четкое представление об упомянутых значимых факторах, необходимых ему для решения. В рамках человеко-машинного взаимодействия (в семантическом смысле) это представление выражается в трудно формализуемом понятии *информационной потребности* пользователя: человек обращается к информационной системе в целях получения информации, адекватной его актуальным нуждам, суть – решаемым задачам.

Очевидно, что ключевым вопросом при синтезе когнитивного интерфейса, в указанной интерпретации, становится определение этих самых «значащих факторов» для последующего предъявления информационной системой. В случае узкоспециализированных (проблемно-ориентированных систем) дать ответ на этот вопрос не составляет труда – факторы, влияющие на решение задачи, заранее известны, также, как и их привычная для пользователей интерпретация и способ визуального представления и структуризации. Однако, все усложняется если нам необходимо предоставлять информацию из одного и того же набора разнородным пользователям, решающим существенно различные прикладные задачи и характеризуемым различными стереотипами восприятия и интерпретации информации [5]. В этом случае система должна сначала каким-то образом идентифицировать пользователя и затем сформировать представление информации, соответствующее специфике задачи и субъективным особенностям ее получателя. Практика показывает, что чем выше степень такого соответствия, тем более эффективен интерфейс в смысле скорости и точности восприятия информации пользователем [6].

Необходимо отметить важный нюанс: при взаимодействии с ИС человек далеко не всегда располагает полным и четким представлением о задаче и требуемой для ее решения информации. Если субъективной представлением достаточно полное и четкое, то пользователь способен сформулировать полный/четкий информационно-поисковый запрос, в ответ на который система выдаст, при наличии, в точности ту информацию, которую ожидает человек. И наоборот – если пользователь плохо представляет себе, что ему нужно, ему нужно обеспечить возможность «серфинга». Этим обусловлены два подхода к организации эффективного информационного взаимодействия между человеком и машиной – поисковый (эффективен в первом случае) и навигационный (эффективен во втором случае).

Для характеристики соответствия интерфейса ментальным стереотипам пользователя воспользуемся известными понятиями, используемыми при рассмотрении задач информационного поиска – релевантность и пертинентность. Под *релевантностью* принято понимать меру соответствия результатов поиска формулировке поискового запроса: «Релевантность – в поисковых системах – мера соответствия результатов поиска задачи, поставленной в запросе. Различают содержательную и формальную релевантности.» [7]. Однако, следует признать, что сама по себе формулировка запроса является субъективным языковым выражением ожиданий пользователя в отношении информации, выдаваемой системой в качестве результата. Для обозначения соответствия результатов запроса именно ожиданиям пользователя используют термин *пертинентность*: «Пертинентность – соответствие полученной информации информационной потребности пользователя» [8]. Рис. 5 иллюстрирует различие данных понятий.

Очевидно, что получить объективную оценку пертинентности автоматически, в результате машинных вычислений, невозможно в силу невозможности абсолютно точного моделирования пользовательских ожиданий. Некоторые авторы высказываются даже в пользу бесперспективности каких-либо попыток оценивать качество результатов поиска на основе формализованных оценок субъективных ожиданий пользователя [9]. Одной из ключевых проблем, возникающих при этом, является динамика пользовательских ожиданий во времени.

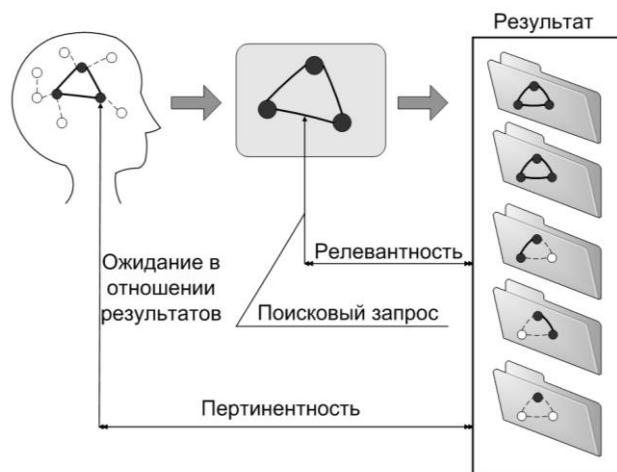


Рис. 5. Соотношение понятий релевантности и пертинентности

Тем не менее, сделать определенные приближения к указанной оценке, на наш взгляд, возможно. В частности, проблему динамичности пользовательских представлений можно, если обеспечить постоянный мониторинг пользовательской активности и коррекцию на его основе модели ментальных стереотипов (суть – ожиданий) пользователя. Одна из технологий такого мониторинга предложена в работе [10]. В данной работе предлагается строить модель ментальных стереотипов пользователя в виде семантической сети, которая постоянно обновляется в соответствии с содержанием пользовательских информационных запросов и семантической структурой документов, попадающих в фокус внимания пользователя. Попадание в фокус внимания при этом идентифицируется путем анализа времени работы с документами, выбранными человеком среди результатов поискового запроса.

В случае интерфейсов навигационного типа поисковый запрос не формулируется пользователем в явном виде. Тем не менее, в процессе «серфинга» по информационному контенту ИС пользователь всегда имеет некоторые ожидания в отношении содержания тех или иных разделов информационной системы. Это позволяет использовать то же понятия пертинентности и для оценки когнитивных свойств навигационного интерфейса. В этом случае под результатом поиска следует понимать способ структуризации информационных баз, предъявляемых пользователю. А пертинентность может быть формально определена как «невязка» между структурой информационных баз и способом структуризации знаний об окружающем мире, характерном для данного человека. Способ числовой оценки такой невязки предложен в работе [5].

Перцептивная когнитивность ПИ: гештальты и стереотипы восприятия

Общепринятые сегодня подходы к описанию процессов восприятия и структурирования ощущений человека сформировались в начале XX века в рамках школы научной психологии, получившей название *гештальтпсихология*. Основной идеей гештальтпсихологии является постулат целостности восприятия, означающий, что воспринимаемая человеком картина не является простой суммой ее составляющих. Человек всегда стремится интерпретировать

опыт как некоторое доступное пониманию целое. Ярким примером подобной структурной целостности восприятия является наблюдение о том, что известная человеку мелодия узнается даже в случае, если она транспонируется в другие тональности. Центральным понятием гештальтпсихологии является *гештальт* - целостная структура (от нем. *Gestalt* - образ, форма), в принципе не выводимая из образующих ее компонентов.

Согласно гештальтпсихологии, целостность восприятия и его упорядоченность достигаются благодаря следующим принципам:

– близость (стимулы, расположенные рядом, имеют тенденцию восприниматься вместе);

– схожесть (стимулы, схожие по размеру, очертаниям, цвету или форме, имеют тенденцию восприниматься вместе);

– целостность (восприятие имеет тенденцию к упрощению и целостности);

– замкнутость (отражает тенденцию завершать фигуру так, что она приобретает полную форму);

– смежность (близость стимулов во времени и пространстве; смежность может предопределять восприятие, когда одно событие вызывает другое);

– общая зона (принципы гештальта формируют наше повседневное восприятие наравне с научением и прошлым опытом; предвосхищающие мысли и ожидания также активно руководят нашей интерпретацией ощущений) [11].

На рис. 6 показан пример использования гештальт-принципа близости. Одни и те же графические примитивы (рис. 6 а) компактно визуализированные одним (рис. 6 б) или другим (рис. 6 с) образом воспринимаются как набор точек, треугольник или квадрат, соответственно.

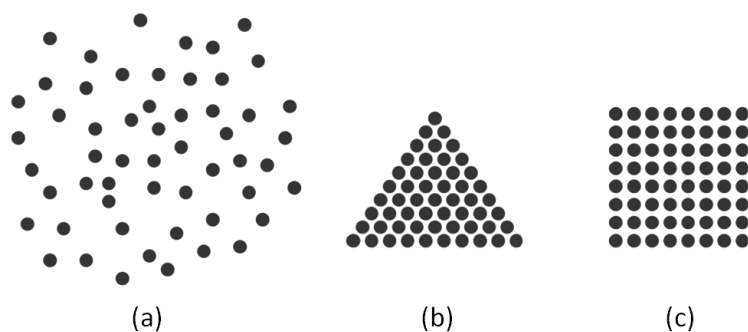


Рис. 6. Пример использования гештальт-принципа близости

Восприятие гештальтов можно считать одинаковым практически для всех людей. Вместе с тем, для групп людей объединенных общей культурой, образованием или профессией существуют свои, специфичные для группы, принципы восприятия. Эти принципы названы исследователями П. Фоули и Н. Моури *перцептивными стереотипами* [12]. Такие стереотипы устойчивы и остаются неизменными на протяжении всей жизни индивидуума. В отличие от гештальтов, перцептивные стереотипы отражают специфику некоторой проблемной области и могут рассматриваться как принципы, способствующие точному и быстрому восприятию объекта в контексте определенного спектра прикладных задач.

Примером может служить разная интерпретация красного и синего цвета учеными-физиками и большинством других людей. Для большинства красный цвет обычно считается «теплым», а синий - «холодным», но у физиков синий цвет вызывает ассоциацию с более нагретым телом (это объясняется известным соотношением между температурой черного тела и его спектром излучения). Еще один подобный пример связан с эксплуатацией электростанций. Обычно индикаторы, указывающие на нормальную работу агрегатов, делаются зелеными, а в случаях неисправности применяются индикаторы красного цвета. Но в электротехнике сложилось, что красный цвет используют для обозначения замкнутых цепей, по которым течет электрический ток, а зеленый – для разомкнутых цепей.

Эти примеры иллюстрируют тот факт, что для правильного и быстрого восприятия информации важно установить, какие стереотипы формируют восприятие пользователя. Тогда можно определить, как правильно отобразить данные. В тех случаях, когда наблюдатель находится в состоянии напряжения, в условиях дефицита времени или он устал, в восприятии проявляется тенденция выделять ожидаемые стереотипы (даже если в нормальных ситуациях восприятие ничем не затруднено). В этом случае важно представлять человеку информацию только в том виде, который соответствует его стереотипам восприятия.

Кроме способа визуализации информации, на скорость и адекватность ее восприятия влияет и ее количество. Человеческую память часто подразделяют на две составляющие: долговременную память, которая является постоянным источником информации о мире, и кратковременную, или оперативную, память – ограниченный запас «осознанной» информации, который является временным. В оперативной памяти удерживается ограниченное число несвязанных друг с другом элементов, даже если повторению уделяется все внимание; это число изменяется от 5 до 9 [13]. Из этого следует, что количество отображаемых данных нужно регулировать. Например, группировать данные и ранжировать по важности для отображения только самой важной информации.

Заключение

В рамках современных информационных систем накоплены огромные объемы информации. Современные ИС становятся все более интеллектуальными. Это существенно меняет характер и требования к организации человеко-машинного взаимодействия. Увеличивающиеся возможности автоматизированной обработки информации и знаний позволяют делегировать часть когнитивных функций в рамках человеко-машинного взаимодействия информационной системе. Такое делегирование порождает новый тип пользовательских интерфейсов, частично автоматизирующих интеллектуальные функции человека. Мы назвали такие интерфейсы когнитивными. Для синтеза когнитивных интерфейсов необходимо согласованное использование существующих моделей инженерии знаний и психологии восприятия.

Несмотря на субъективность ожиданий пользователя в отношении качества человеко-машинного интерфейса, учет психологических особенностей человека при разработке когнитивных пользовательских интерфейсов если и не позволит получить объективно лучший результат, то определенно повысит эффективность когнитивных процессов.

Литература

1. Словарь иностранных слов / Н.Г. Комлев. - М.: Эксмо-Пресс, 2000. - 1308 с.
2. Эволюция. Мышление. Сознание. (Когнитивный подход и эпистемология) / под ред. И.П. Меркулова. - М.: Канон +, 2004. - 352 с. (Серия «Современная философия»).
3. Broadbent, D.E. Perception and Communication / D.E. Broadbent. Elmsford, N.Y., 1958. -342 p.
4. Gray, J.A., Wedderburn, A.A. /Grouping strategies with simultaneous stimuli // J.A. Gray, A.A. Wedderburn. Quarterly Journal of Experimental Psychology. -1960. - №12. -Р.180-184.
5. Шишаев, М.Г. Формализация задачи построения когнитивных пользовательских интерфейсов мультипредметных информационных ресурсов / М.Г. Шишаев, П.А. Ломов, В.В. Диковицкий // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. -Вып.4. -4/2013(17). – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2013. –С.90-97.
6. Диковицкий, В.В. Технология формирования адаптивных пользовательских интерфейсов для мультипредметных информационных систем промышленных предприятий / В.В. Диковицкий, М.Г. Шишаев // Информационные ресурсы России. -2014. -№ 1(137). -С.23–26.
7. Финансовый словарь. -Режим доступа: http://dic.academic.ru/contents.nsf/fin_enc/
8. Жданова, Г.С., Словарь терминов по информатике на русском и английском языках / Г.С. Жданова, Е.С. Колобродона, В.А. Полушкин, А.И. Черный. - М.: Наука, 1971. -360 с.
9. Аветисян, Р.Д. Теоретические основы информатики / Р.Д. Аветисян, Д.О. Аветисян. -М.: РГГУ, 1997. -168 с.
10. Диковицкий, В.В. Методы интеллектуальной обработки и представления информации в мультипредметных информационных системах промышленных предприятий // Труды СПИИРАН. -2015. - Вып. 42. -С.56-76.
11. Koffka, K. Principles of Gestalt psychology /K. Koffka. N.Y., Routledge, 1935. - 720 p.
12. Салвенди, Г. / Человеческий фактор. –Т.3, Ч.1. Модели психической деятельности // Г. Салвенди. - М: Мир, 1991. -487 с.
13. Миллер, Дж. А. Магическое число семь плюс или минус два. О некоторых пределах нашей способности перерабатывать информацию / Дж. А. Миллер // Инженерная психология // под ред. Д.Ю. Панова и В.П. Зинченко. -М., 1964. -С.564-581.

Сведения об авторе

Шишаев Максим Геннадьевич - д.т.н., профессор, руководитель лаборатории региональных информационных систем,
e-mail: shishaev@iimm.ru

Maxim G. Shishaev - Dr.of Sci. (Tech. Sci.), professor, head of laboratory for regional information systems

УДК 004.682

П.А. Ломов, Е.Ю. Данилов

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

ПОСТРОЕНИЕ КОГНИТИВНЫХ ФРЕЙМОВ НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЧЕСКИХ ПАТТЕРНОВ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОНТОЛОГИЙ*

Аннотация

В работе предлагается решение проблемы передачи эксперту знаний, представленных в онтологиях посредством их визуализации на основе специальных структур – когнитивных фреймов. Рассматривается формирование когнитивных фреймов на основе распространенных онтологических паттернов, используемых при разработке онтологий. Представлен прототип программного средства визуализации.

Ключевые слова:

онтология, визуализация, шаблоны онтологического проектирования.

P.A. Lomov, E.Yu. Danilov

CONSTRUCTION OF COGNITIVE FRAMES BASED ON ONTOLOGICAL PATTERNS FOR ONTOLOGIES VISUALIZATION

Abstract

The paper proposes a solution to transfer expert knowledge represented in ontologies through their visualization based on special structures - cognitive frames. The formation of cognitive frames on the basis of common ontological patterns and prototype of visualization tool are considered.

Keywords:

ontology, visualization, ontological design patterns.

Введение

В настоящее время онтологические модели становятся распространенным средством представления знаний в сети Интернет. Однако применение для их описания языка веб-онтологий (Ontology web language, OWL), основанного на дескрипционной логике ALC (Attributive Language with Complement), хоть и позволяет обеспечить высокие выразительные возможности с сохранением разрешимости, но по мере роста онтологии (увеличении в ней числа логических утверждений - аксиом) создает проблемы ее понимания человеком. Целью предлагаемого подхода к визуализации онтологий является решение данной проблемы, то есть обеспечение эффективной (в смысле затрат труда и времени) передачи онтологических знаний пользователю. Для этого авторами предлагается использовать когнитивный фрейм (КФ) [1]. Под КФ, в общем случае, понимается визуализированный фрагмент онтологии, позволяющий передать человеку (эксперту) знания о некотором целевом понятии. Формирование КФ производится с учетом психологических особенностей восприятия и структурирования человеком информации, а также

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №15-07-03321).

принципов определения понятий в онтологии. По своей функции когнитивный фрейм близок к понятию «точка зрения» [2], однако в отличие от последнего он включает помимо набора фактов о понятии еще и соответствующий ему визуальный образ.

Формально определение когнитивного фрейма можно записать следующим образом:

$$KF(t) = \langle CT, VS \rangle, \quad (1)$$

где t - целевое понятие когнитивного фрейма, CT – содержание фрейма - множество дуг вида «понятие-отношение-понятие», отражающих смысловое значение целевого понятия, VS – визуальный образ, формируемый на основе содержания.

В прошлых работах мы рассматривали процедуру формирования КФ на основе инвариантных к предметным областям понятийных отношений [3, 4], таких как «таксономия», «партономия» и «зависимость». Это позволяло получить приемлемую визуализацию для простых онтологий, понятия которых заданы с использованием только данных отношений. В данной работе мы рассмотрим формирование КФ на основе паттернов онтологического проектирования, применяемых при разработке онтологий, а также с учетом гештальт принципов организации человеческого восприятия [5]. В завершении работы представлены результаты экспериментальной оценки когнитивных свойств, полученных КФ для прикладной онтологии.

Онтологические паттерны содержания как точки зрения на понятия онтологии

В работе [2] точка зрения (viewpoint) определяется как согласованный набор фактов, описывающий понятие с определенного ракурса. Визуализация понятия с учетом точки зрения, заданной разработчиком онтологии, облегчает и обеспечивает правильность интерпретации смысла понятия пользователем. Основной проблемой при оперировании точками зрения является извлечение из базы знаний фактов, соответствующих им (viewpoint extraction). Для произвольной базы знаний это может быть затруднительно в виду довольно абстрактных определений точек зрения, что позволяет реализовывать их произвольным образом.

В последние годы развивающимся подходом к построению онтологий является использование онтологических паттернов проектирования (Ontology design patterns, ODP) [6, 7]. ODP представляют собой рекомендуемые решения распространенных проблем онтологического инжиниринга. Их применение упрощает создание онтологии, а также делает ее структуру более понятной для других разработчиков, знакомых с ODP. ODP подразделяются на несколько типов в зависимости от решаемых задач: структурные паттерны (Structural ODPs), паттерны соответствия (Correspondence ODPs), паттерны содержания (Content ODPs), паттерны логического вывода (Reasoning ODPs), паттерны представления (Presentation ODPs), лексико-синтаксические паттерны (Lexico-Syntactic ODPs). В данной работе будет рассмотрено использование онтологических паттернов содержания (CDP), ввиду их сходства с понятием точки зрения. Они представляют собой небольшие фрагменты онтологий, на основе которых можно описать типовые положения вещей в предметной области

(участие в событиях, части целого, последовательность сущностей и др.). Отличием CDP является большая детализация структуры такого фрагмента и ориентация на онтологии, описанные OWL. Таким образом, CDP можно рассматривать как формализованное описание некоторой точки зрения, которое потенциально может быть использовано для определения понятий прикладных онтологий. Учет смысла CDP, использованных при определении понятий, позволит задать общий подход к формированию соответствующих им когнитивных фреймов.

Для определения CDP, которые могли бы быть использованы в качестве основы когнитивных фреймов, был произведен анализ паттернов, представленных в каталоге ODP [8]. В результате были отобраны инвариантные по отношению к области применения паттерны, такие как: «Агент-роль» (Agent-Role), «Роль участника» (Participant role), «Выполнение задачи» (Task execution), «Описание-ситуация» (Description-Situation), «Временной интервал» (Time interval), «Список» (List), «Набор» (Bag), «Последовательность» (Sequence).

Формирование когнитивных фреймов на основе онтологических паттернов содержания

Основными компонентами когнитивного фрейма для некоторого понятия онтологии являются содержание и визуальный образ. Рассмотрим формирование данных компонентов на основе ODP с учетом требований к когнитивному фрейму.

1. Формирования содержания когнитивных фреймов

Формирование содержания КФ на основе CDP предполагает в первую очередь их обнаружение (design pattern detection) [9, 10]. Данная задача заключается в выявлении факта использования того или иного паттерна в онтологии. После чего необходимо извлечь реализацию этого паттерна - фрагмент онтологии, соответствующий его структуре. Решение задачи извлечения вообще требует синтаксического и семантического анализа аксиом онтологии, что заслуживает отдельного исследования. На данном этапе обнаружение и извлечение реализаций паттернов осуществляется по упрощенной схеме путем обнаружения множеств понятий и отношений с идентификаторами IRI (Internationalized Resource Identifier), сходными с IRI элементов того или иного паттерна:

$$P_k = \{\langle c_i, c_j \rangle\}, \quad (2)$$

где P_k – реализация CDP в онтологии, $\langle c_i, c_j \rangle$ – отношение между понятиями c_i и c_j .

Таким образом, содержание КФ для некоторого понятия t определяется множеством реализаций паттернов, использованных для его определения:

$$CT = \bigcup_{k \in I} P_k, \quad (3)$$

где P_k – реализация CDP для целевого КФ понятия t .

2. Построение визуального образа когнитивных фреймов

Формируемый визуальный образ должен обеспечить быструю и правильную с точки зрения разработчика онтологии интерпретацию его смысла

пользователем. Именно это является главным показателем когнитивных свойств полученного образа.

Предполагается, что созданию «хорошей» визуализации способствует учет принципов организации восприятия, сформулированных сторонниками Гештальт-психологии [5]. Базовая предпосылка этих принципов состоит в том, что при восприятии человеком объектов окружающего мира самопроизвольно происходит упорядочивание полученных чувственных ощущений с образованием в итоге целостной структуры – гештальта. Тем самым сознание навязывает ощущениям определенные организационные принципы. Таким образом, их учет при формировании визуальных образов КФ позволит предопределить неосознанное формирование пользователем гештальта, соответствующего смыслу паттерна. Поэтому пользователь будет затрачивать меньше ментальных усилий при последующем осознанном анализе визуализации, так как сформированный бессознательно гештальт будет наводить его на правильную интерпретацию ее смысла.

В пользу предлагаемого подхода к формированию говорят результаты, полученные в работах [11], посвященных оценке когнитивной органичности онтологий. В них в частности отмечалось, что следование принципам гештальт-психологии при разработке онтологий позволит облегчить их понимание людьми.

При формировании визуальных образов КФ учитывались следующие принципы восприятия:

1. Принцип близости (Principle of proximity). Элементы расположенные близко во времени или пространстве воспринимаются совместно.

2. Принцип непрерывности (Principle of common fate). Связывание наблюдаемых элементов в непрерывную последовательность или придание им определенной ориентации.

3. Принцип сходства (Principle of similarity). Восприятие похожих объектов в виде групп.

4. Принцип замыкания (Principle of closure). Стремление завершить или дополнить представленный «неполный» образ.

5. Принцип симметрии (Principle of symmetry). Симметричное расположение элементов в процессе формирования образа.

6. Принцип включения В. Келлера. Тенденция воспринимать только большую фигуру, а не ту меньшую, которую она включает.

Данные принципы лежат в основе формирования в сознании «хорошего гештальта» (Good gestalt) – наиболее простого, неизменного, симметричного образа наблюдаемых объектов. Если наблюдаемый объект будет обладать деталями, не вписывающимися в «хороший гештальт», то они могут быть восприняты человеком только при последующем детальном рассмотрении объекта. Таким образом, при визуализации КФ, построенных на основе паттернов, необходимо, чтобы компоненты паттернов «попали» в «хороший гештальт».

С точки зрения сложности построения визуализации можно разделить рассматриваемые нами СДР на следующие группы:

- **Простые СДР.** Данные паттерны состоят из пары понятий, связанных некоторым инвариантным по отношению к предметным областям отношением. Например, к таковым паттернам можно отнести: «Агент-роль» (Agent-Role),

«Выполнение задачи» (Task execution), «Последовательность» (Sequence) и другие.

- **Составные CDP.** К данной группе были отнесены разновидности паттерна «Ситуация» (Situation) и «Описание-ситуация» (Description and situation), а также более специфические паттерны, имеющие сложную структуру, такие как «Передача сообщения» (CommunicationEvent), «Обработка сообщения» (EventProcessing).

Основной целью визуализации простых паттернов является обеспечение восприятия их элементов в виде отдельной группы, в также представление смысла отношения между ними. При этом важно исключить использование текстового наименования отношения. Это обусловлено тем, что данные CDP часто выступают в комбинациях с другими паттернами, поэтому необходимо делать их визуализации компактными. Исходя из этого, основными гештальт-принципами при формировании образа для них являются принципы близости и включения.

Далее при рассмотрении примеров визуализации паттернов будем использовать следующие обозначения:

$VC(c)$ - визуальный образ понятия c ;

$VR(<c,n>)$ - визуальный образ отношения между понятиями c и n ;

$LC(VC(c), VC(n))$ – визуальный образ, полученный в результате применения принципа сближения к образам для понятий c и n ;

$LS(VC(c), VC(n))$ – визуальный образ, полученный в результате применения принципа симметрии к образам для понятий c и n ;

$LF(VC(c), VC(n))$ – визуальный образ, полученный в результате применения принципа непрерывности к образам для понятий c и n ;

$LI(VC(c), VC(n))$ – визуальный образ, полученный в результате применения принципа включения образа понятия c в образ понятия n ;

$LE(VC(c), C(n))$ – визуальный образ, полученный в результате применения принципа сходства к образам для понятий c и n ;

$VP(P)$ – визуальный образ реализации паттерна P .

В качестве примера визуализации для простого CDP, рассмотрим визуальный образ для реализации паттерна «Агент-Роль»:

$$P_{AG} = \{<a,r>\}, \quad (4)$$

$$VP(P_{AG}) = \{LI(VC(a), VC(r))\}, \quad (5)$$

где P_{AG} – реализация паттерна «Агент-Роль», a – понятие-агент, r – понятие-роль, $<a,r>$ - отношение «играет-роль».

Пример рассмотренного образа представлен на рис. 1.

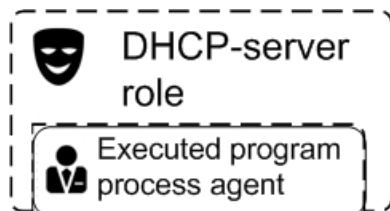


Рис.1. Пример визуального образа для реализации паттерна «Агент-Роль»

В данном случае был использован принцип включения - визуальный образ понятия-роли «поглощает» образ понятия-агента. Это позволяет подчеркнуть смысл данного паттерна, который предлагает рассматривать некоторого агента, как действующего в контексте некоторой роли.

Заметим, что в образе отсутствует представление отношения. В данном случае оно неявно следует из наличия в названиях понятий наименований суперклассов – «Role» и «Agent». Это, в свою очередь, является реализацией одного из шаблонов представления онтологий (Presentation ODP), предписывающего использовать в наименованиях подклассов название супер-класса. Еще более предпочтительным приемом является использование пиктограммы, вместо названия суперкласса. В данном случае она будет служить когнитивной графической метафорой [12], позволяющей пользователю быстро понять вид понятия, а также преодолеть возможный языковой барьер. Однако при ее подборе следует позаботиться о том, чтобы пользователь верно интерпретировал ее.

Ситуационные паттерны представляют некоторые положения вещей в предметной области или представляют n-арные отношения между объектами. Таким образом, основное их отличие от простых паттернов состоит в том, что они включают более 2 понятий различных видов.

В рамках ситуационных паттернов понятие-ситуация связывается с понятиями-компонентами ситуации, имеющими в ней некоторое значение. Это выражается определением между ними и понятием-ситуацией разновидностей отношения «присутствует» (has-setting). Например, в ситуационном паттерне «BasicPlanExecution» между понятием-ситуацией «PlanExecution» и понятием-исполнителем действия, предусмотренного планом, определено отношение «включает-агента» «includesAgent».

При визуализации ситуационных паттернов важным является передать смысл каждого понятия-компонента для данной ситуации. При этом следует разделить образы понятий, представляющих различный смысл по разным группам. Для этого можно использовать принципы сходства, непрерывности, близости. В качестве иллюстрации рассмотрим пример визуализации реализации паттерна «N-арное участие» (N-ary participation). Данный паттерн позволяет отразить участие нескольких объектов в событии, происходящем в определенное время.

Формальная запись реализации данного паттерна и его визуализации выглядит следующим образом:

$$P_{NP} = \{ \langle n, t \rangle, \langle n, e \rangle, \langle n, o \rangle, \langle o_1, e \rangle, \dots \langle o_n, e \rangle \}, \quad (6)$$

$$VP(P_{NP}) = \{ LF(VC(e), VC(t)), LC(VC(e), VC(t)), LC(VC(o_1), \dots VC(o_n)), LF(VR(\langle o_1, e \rangle), \dots VR(\langle o_n, e \rangle)) \}, \quad (7)$$

где P_{NP} – реализация паттерна «N-арное участие», n – понятие-ситуация, t – понятие-временной интервал, e – понятие-событие, o_1, \dots, o_n – понятия-участники события, $\langle n, t \rangle, \langle n, e \rangle, \langle n, o \rangle$ – отношение между понятием-ситуацией и ее компонентами, $\langle o_1, e \rangle, \dots, \langle o_n, e \rangle$ – отношения «участвует в» (participant-in) между понятием-участником и понятием-событием.

Возможная визуализация представлена на рис. (рис. 2).

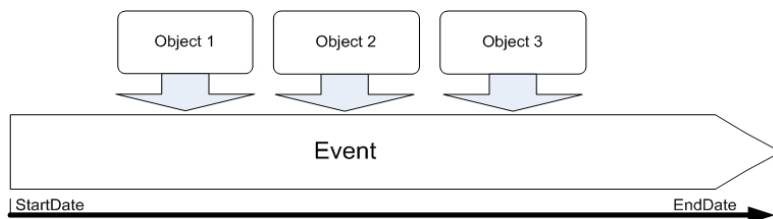


Рис. 2. Пример визуального образа для реализации паттерна «N-арное участие»

В данной визуализации отсутствует образ для самого понятия-ситуации, которое необходимо лишь при представлении понятия в онтологии. Значение понятий для данной ситуации неявно следуют из расположения и видов их образов. Так, например, понятие «Событие» (Event) и соответствующее ему понятие «Временной интервал» имеют схожую форму и направление. В тоже время образы понятий-участников события имеют другую форму и «направлены» перпендикулярно образу понятия-события, поэтому образуют свою группу образов.

Паттерн «Описание-ситуация» (Description-situation) используется для концептуализации некоторой ситуации с помощью иной понятийной системы. Например, некоторое действие, произведенное кем-либо, может описываться (концептуализироваться) в законе как преступление. Понятия-компоненты описания связываются с соответствующими им понятиями-компонентами ситуации посредством разновидностей отношения «классифицирует» (classifies). Конкретный тип отношения зависит от соединяемых им понятий. Например, между понятием-ролью и понятием-агентом определяется отношение «играется» (played-by), а между понятием-параметром и понятием-значением – отношение «оценивается» (valued-by). Если все понятия-компоненты ситуации были «классифицированы» понятиями-компонентами описания, то ситуация удовлетворяет описанию, что выражается определением отношения «удовлетворяет» (satisfies) между ними.

Основной целью визуализации реализации паттерна «Описание-ситуация» является передача смысла понятий-компонентов ситуации в контексте понятия-описания. Для этого целесообразно применять принцип подобия и включения для представления соответствия компонентов ситуации и описания. Рассмотрим формальное определение реализации паттерна «Описание-ситуация» и ее визуального образа:

$$P_{DS} = \{ \langle s, d \rangle, \langle d, c_1 \rangle, \dots, \langle d, c_n \rangle, \langle s, o_1 \rangle, \dots, \langle s, o_n \rangle \}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} VP(P_{DS}) = & \{ LI(VC(o_1), VC(c_1)), \dots, LI(VC(o_n), VC(c_n)), \\ & LE(VC(o_1), \dots, VC(o_n)), LE(VC(c_1), \dots, VC(c_n)), \\ & VR(\langle s, o_1 \rangle), \dots, VR(\langle s, o_n \rangle), VR(\langle d, c_1 \rangle), \dots, VR(\langle d, c_n \rangle) \}, \end{aligned} \quad (9)$$

где P_{DS} – реализация паттерна «Описание-ситуация», d – понятие-описание, s – понятие-ситуация, c_1, \dots, c_n – понятия-компоненты описания, o_1, \dots, o_n – понятия-компоненты ситуации, $\langle d, s \rangle$ – отношение «удовлетворяет» (satisfies),

$\langle d, c_1 \rangle, \dots, \langle d, c_n \rangle$ - отношение между понятием-описанием и его понятиями-компонентами, $\langle s, o_1 \rangle, \dots, \langle s, o_m \rangle$ - отношения между понятием-ситуацией и его компонентами, $\langle c_1, o_1 \rangle, \dots, \langle c_n, o_m \rangle$ - отношения «классифицирует» (classifies) между понятиями-компонентами описания и соответствующими им понятиями-компонентами ситуации. Возможная реализация рассмотренного образа представлена на рис. 3.

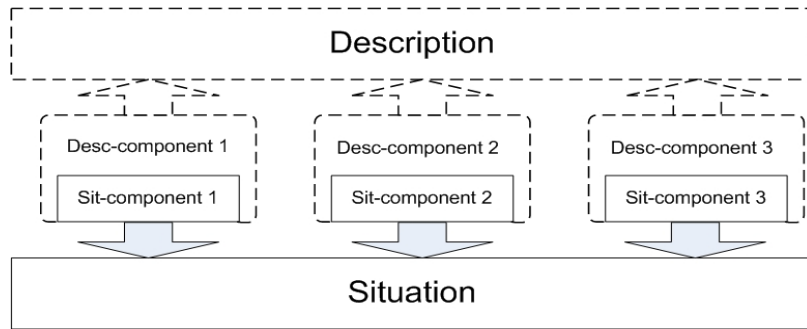


Рис. 3. Пример визуального образа для реализации паттерна «Description-situation»

В данной визуализации образы понятий-компонентов описания «поглощают» образы понятий-компонентов ситуации. Это передает смысл паттерна, заключающегося в переопределении понятий-компонентов ситуации.

Визуализация специфических паттернов ввиду их меньшей распространенности на данном этапе исследования не рассматривалась.

В результате визуальный образ КФ будет состоять из комбинации визуальных образов, сформированных для реализаций паттернов, присутствующих в содержании:

$$VS = \{VP(P_i)\}, \quad (10)$$

где P_i – реализация CDP.

Пример визуального образа КФ для понятия «Network routing task» из разрабатываемой авторами прикладной онтологии сетевых устройств представлен на рис. 4.

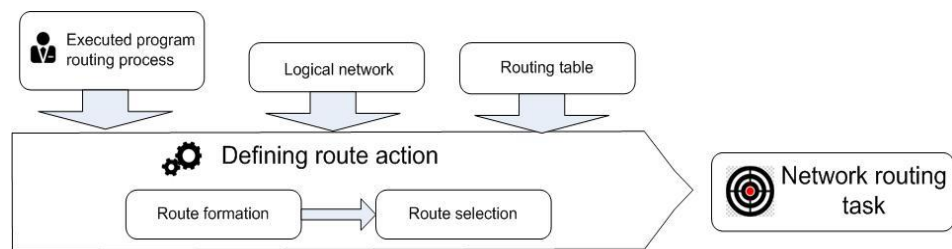


Рис. 4. Визуальный образ КФ для понятия «Network routing task»

Данный образ включает комбинированную визуализацию 3-х паттернов «Выполнение задачи» (Task execution), «Последовательность» (Sequence), «Участие в событии» (Participation).

Программная реализация технологии визуализации

В рамках разработки программной реализации технологии визуализации было создано множество графических объектов, используемых для формирования визуального образа (рис. 5).

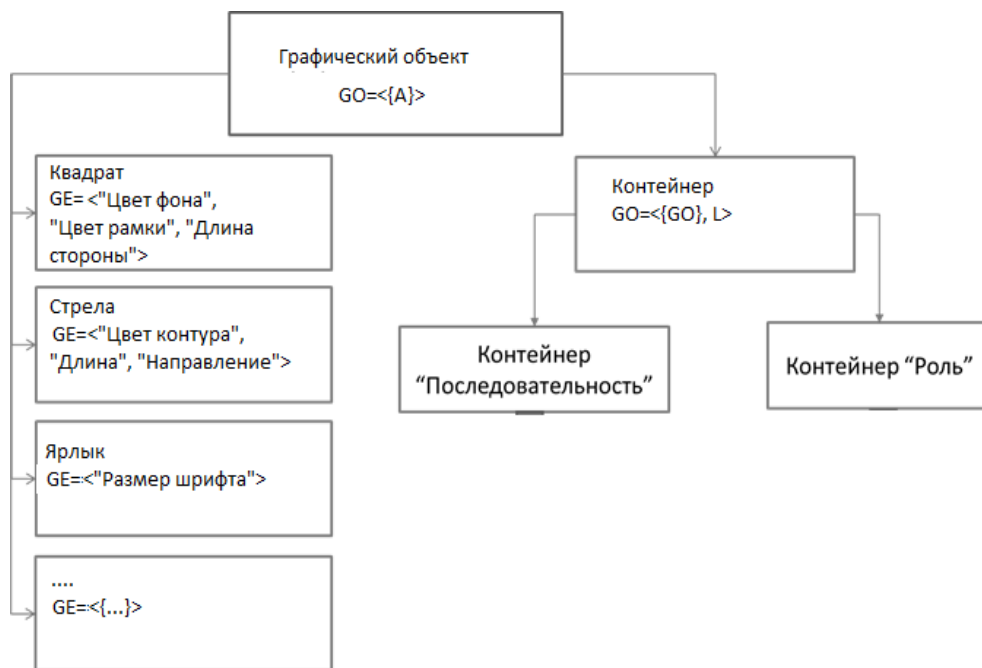


Рис. 5. Иерархия графических объектов для формирования визуализаций онтологических паттернов

Иерархия графических объектов (рис. 5) включает графические элементы (GE). Формальное определение графического элемента можно записать следующим образом:

$$GE = \langle \{A\} \rangle, \quad (11)$$

где $\{A\}$ – это множество атрибутов для элемента. Атрибуты используются при формировании в визуализации. Атрибуты могут быть такие как: цвет, размер текста и т.д. Примером графических элементов являются элементы («Стрела», «Ярлык», и др.). Для группировки этих графических объектов используются контейнеры. Контейнер определяет расположение объектов с помощью менеджера компоновки (L). Формально определение контейнера записывается следующим образом:

$$GO = \langle \{GO\}, L \rangle, \quad (12)$$

где $\{GO\}$ – это множество графических объектов, а L – менеджер компоновки.

Менеджер компоновки задает правила, по которым располагаются визуальные объекты в контейнере. Правила могут, например, располагать все визуальные объекты горизонтально по мере их добавления в контейнер или располагать их поочередно сверху, снизу, справа, слева или в центре.

Контейнер может содержать в себе другие контейнеры с другими менеджерами компоновки. Это позволяет создавать визуальные комбинации различной сложности.

Программная реализация была выполнена на языке программирования Java с использованием в качестве графической библиотеки Piccolo2D. На рис. 6 представлен пример реализации визуализации когнитивного фрейма для понятия «Задача сетевой маршрутизации» (Network routing task), рассмотренного ранее.

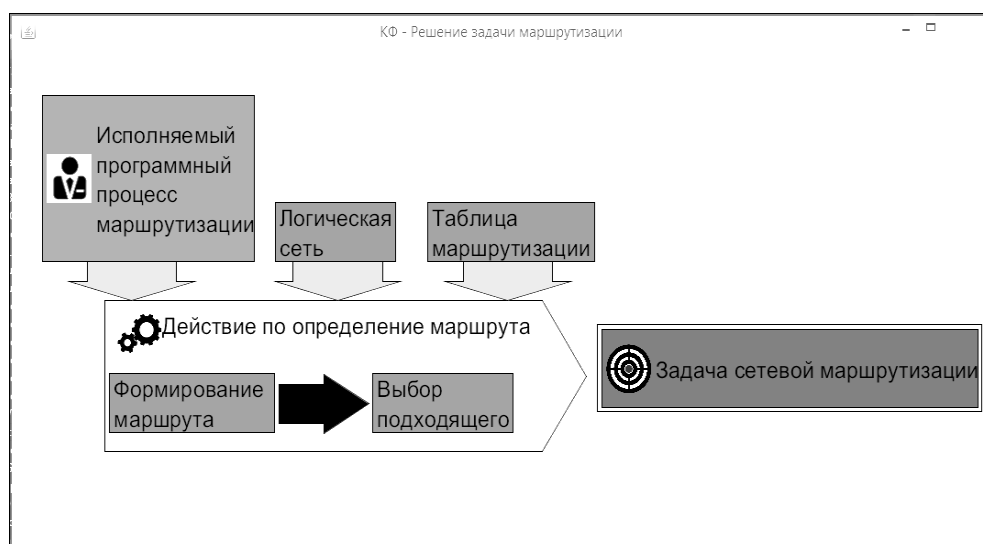


Рис. 6. Пример визуализации паттернов онтологии

Заключение

В данной статье мы рассмотрели вопрос генерации CF на основе CDP и его визуального представления с учетом гештальт-принципов. Использование CDP для формирования содержимого CF гарантирует целостность и полноту полученной на его основе визуализации. Учет гештальт-принципов организации восприятия человека при формировании образа КФ предоставляет возможность быстрой и правильной интерпретации смысла пользователем.

Рассмотренный подход к визуализации онтологии обеспечивает более эффективное решение задачи передачи содержащихся в ней знаний пользователю по сравнению с простой визуализацией понятийной системы в виде графовой структуры. В свою очередь широкое использование ODP при разработке прикладных онтологий делает возможным его применения для визуализации во многих случаях.

Литература

1. Lomov, P.A. Technology of Ontology Visualization Based on Cognitive Frames for Graphical User Interface / P.A. Lomov, M.G. Shishaev // In Proceedings of KESW-2013, Communications in Computer and Information Science, vol. 394. - Springer, 2013. -P.54-68. -ISBN 978-3-642-41359-9.

2. Acker, L., Porter, B. Extracting viewpoints from knowledge bases /L. Acker, B. Porter // In Proceedings of the 12th National Conference on Artificial Intelligence. -1994. -P.547-552.
3. Ломов, П.А. Подход к визуализации онтологий на основе когнитивных фреймов / П.А. Ломов, М.Г. Шишаев // Информационные системы и технологии. - №6 (86). -2014. - С.21-30. -ISSN 2072-8964.
4. Ломов, П.А. Визуализация с помощью когнитивных фреймов для передачи знаний / П.А. Ломов, Е.Ю. Данилов // Информационные системы и технологии. - 2015. - № 3 (89). - С.10-18. -ISSN 2072-8964.
5. Kohler, W. Gestalt Psychology. An Introduction to New Concepts in the Modern Psychology /W. Kohler // Liveright Publishing Corporation. - Gestalt (Psychology). -1947. - 367p.
6. Gangemi, A. Ontology Design Patterns for Semantic Web Content /A. Gangemi // Proceedings of the Fourth International Semantic Web Conference, Galway, Ireland, Springer. - 2005. -P.262-276.
7. Gangemi, A. Ontology design for interaction in a reasonable enterprise / A. Gangemi, V. Presutti // Handbook of Ontologies for Business Interaction, IGI Global, Hershey, PA. - November, 2007. -452p.
8. Ontology design patterns portal. – Режим доступа:
<http://www.ontologydesignpatterns.org>
9. Khan, M. Ontology Design Pattern Detection - Initial Method and Usage Scenarios / M. Khan, E. Blomqvist // In: Proceedings of the Fourth International Conference on Advances in Semantic Processing (SEMAYRO 2010). XPS, ThinkMind Digital Library. – 2010. -P.19-24.
10. Svab-Zamazal, O. Preliminary results of logical ontology pattern detection using SPARQL and lexical heuristics /O. Svab-Zamazal, F. Scharffe, V. Svatek //Proc. 1st ISWC 2009 workshop on Ontology pattern (WOP). – 2009. -P.139-146.
11. Гаврилова, Т.А. Оценка когнитивной эргономичности онтологии на основе анализа графа / Т.А. Гаврилова, В.А. Горовой, Е.С. Болотникова // Искусственный интеллект и принятие решений. -2009. - №3. -С.33-41.
12. Валькман, Ж.Р. Когнитивные графические метафоры / Ж.Р. Валькман // Труды международной конференции «Знания-Диалог-Решение» (ЗДР-95). - Ялта. -1995. -С.261-272.

Сведения об авторах

Ломов Павел Андреевич – к.т.н, научный сотрудник,
e-mail: lomov@iimm.ru

Pavel A. Lomov – Ph.D., research associate

Данилов Евгений Юрьевич - программист,
e-mail: daniloveugene@yandex.ru

Evgeniy Yu. Danilov – programmer

УДК 004.5

В.В. Диковицкий

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

СЕМАНТИЧЕСКОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В ЗАДАЧЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА

Аннотация

В статье рассмотрено применение пользовательского опыта в задаче информационного поиска. Одним из возможных путей получения и учета пользовательских предпочтений является построение модели пользовательских интересов в виде формализованной ментальной модели. Представлен подход, позволяющий повысить релевантность за счет автоматизированного ранжирования результатов на основе формализованной ментальной модели.

Ключевые слова:

Информационный поиск, формализованная ментальная модель.

V.V. Dikovitsky

SEMANTIC PROFILING OF USERS IN TASK OF INFORMATION RETRIEVAL

Abstract

The paper deals the application of the user experience in the task of information retrieval. One of the possible ways to obtain and accounting of user preferences is the construction model of user interests in the form of a formalized mental model. Presented an approach which allows increase the relevance by automated ranking of results.

Keywords:

information retrieval, formalized mental model.

Несмотря на интенсивное развитие методов информационного поиска, малоизученным направлением является участие пользователя в процессе поиска. Роль индивидуальности пользователя относительно, как оценки результатов, так и механизма поиска информации отмечается в работах [3, 7, 8], в [3] отмечается предпочтение пользователей в доступе к информации путем информационно-поисковых систем (ИПС), нежели прямой навигации. В [5] отмечается зависимость удовлетворения информационной потребности от эффективности ИПС, опыта и характеристик пользователя. В работах [6,7] рассмотрено вовлечение пользователя в процесс поиска, предложена концепция «human-computer information retrieval» (HCIR), включающая различные аспекты информационного поиска и человеко-машинного взаимодействия. Исследование [8] показывает, что учет неявной обратной связи в виде поведения пользователя при ранжировании результатов позволяет увеличить эффективность поиска на 21%.

Одним из возможных путей получения и учета пользовательских предпочтений является построение модели пользовательских интересов. В [9] предложено использовать модель пользователя, полученную на основе опроса пользователя для оптимизации информационного поиска мультимедиа-файлов.

В [11] предложено использовать ассоциативную лексическая сеть отношений между словами для моделирования когнитивных процессов пользователя поисковой системы и оптимизации запроса. В [13] предложен способ автоматического получения предпочтений пользователя в виде ментальной модели на основе учета статистики взаимодействия пользователя с информационной системой.

Применительно к задаче поиска ментальная модель позволит уточнить контекст запроса и ограничить область поиска за счет использования субтрактивных отношений. Формализованная ментальная модель (ФММ) представляет собой ассоциативную семантическую сеть, множество вершин которой составляют понятия предметной области, которыми оперирует пользователь, множество ребер – множество взвешенных двухместных отношений над понятиями. ФММ формируется в автоматическом режиме на основе обработки запросов пользователя и статистики его работы с информационной системой. Взаимодействие пользователя с информационной системой может быть представлено следующим алгоритмом:

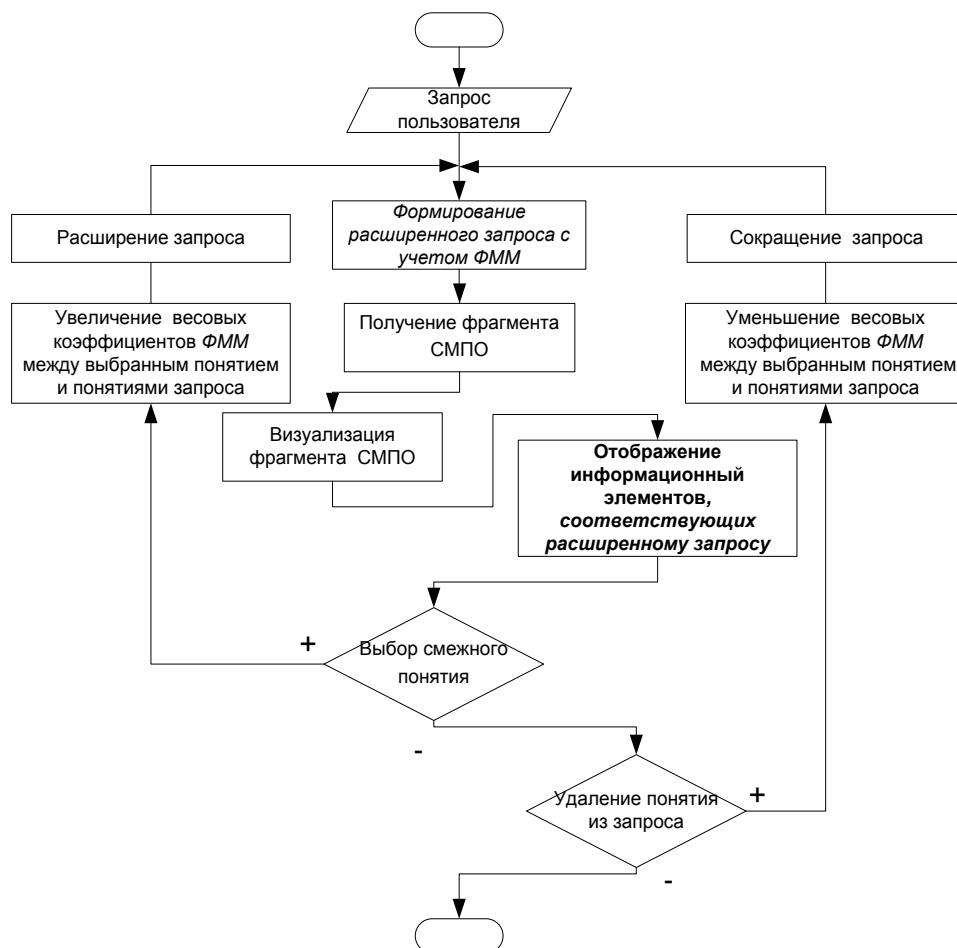


Рис. 1. Алгоритм взаимодействия пользователя и ИС

Взаимодействие заключается в итеративном расширении запросов пользователя на основе ФММ, обеспечении возможности коррекции запроса, а также учета пользовательских предпочтений путем коррекции весовых коэффициентов между понятиями ФММ. При совместном употреблении в запросе пар понятий, входящих в состав ФММ, увеличиваются весовые коэффициенты отношений между данными понятиями. Превалирование одного понятия из модели над другим задается весовыми коэффициентами дуг формализованной ментальной модели. Особенностью такого взаимодействия является возможность задания отрицательных весовых коэффициентов (субтрактивных отношений), обозначающих отсутствие значимости данного контекста понятия для пользователя.

Процесс поиска документов по предварительно проиндексированной коллекции с учетом весовых коэффициентов отношений в ментальной модели пользователя состоит из следующих этапов:

1. Формирование запроса в терминах семантической модели предметной области[13] (СМПО):

1.1. Формирование расширенного запроса, содержащего отношения и соответствующие запросу $Q = \{c_i\}$ концепты СМПО:

$$EQ = f_q(Q, KB) = \{C^Q, L^Q \mid (Eq(c_i^Q, c_j^{KB}) > 1 - \varepsilon)\}, \quad (1)$$

$$C^Q \subset C, L^Q \subset L \quad i = \overline{1, N_Q}, j = \overline{1, N_{KB}},$$

где KB – семантическая модель предметной области, C^Q - множество концептов СМПО, содержащихся в запросе, L^Q - множество отношений над концептами C^Q , $f_q()$ - функция, ставящая соответствие запросу фрагмент СМПО, $Eq()$ – функция оценки сходства имен концептов, ε – погрешность оценки сходства концептов.

1.2. Расширение запроса с учетом весовых коэффициентов отношений и субтрактивных отношений, ограничивающих контекст запроса:

$$EQ = \{C^Q, L^Q\} \cup \{C', L' \mid l : c_i \in C^Q, c_j \in C', \overline{w_k} > x\}, \quad (2)$$

$$C' \subset C, L' \subset L, l \in L', l = \langle c_i, c_j, tp, \overline{w} \rangle, c_i, c_j \in C, tp \in Tp,$$

где C' - множество концептов СМПО, связанных с концептами множества C^Q отношениями вида l из множества L' , Tp – множество типов отношений (синонимии, гипонимии, ассоциации, субтрактивных отношений), \overline{w} – вектор весовых коэффициентов, компоненты которого задают значимость отношения для различных категорий пользователей, k – количество категорий пользователей. $\overline{w_k}$ - k -ая компонента вектора весовых коэффициентов отношения l , x – коэффициент включения отношения в расширенный запрос.

2. Получение множества документов, соответствующих расширенному запросу:

$$D = \{d_i \mid C^{d_i} \cap C^Q \neq \emptyset\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где C^{d_i} - множество концептов СМПО, присутствующих в документе d_i , C^Q - множество концептов СМПО, присутствующих в запросе EQ .

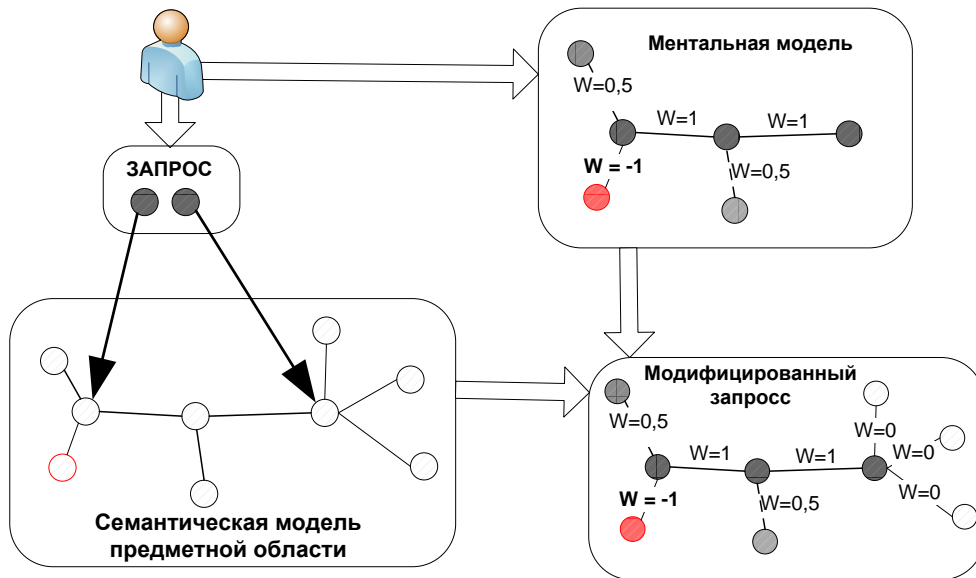


Рис. 2. Формирование расширенного запроса

3. Ранжирование множества документов с учетом весовых коэффициентов отношений:

$$R(d_k) = \sum_{L_{d_k}} (f_u(\bar{w}_k, r)) - \sum_{L'_{d_k}} (f_u(\bar{w}_k, r)), \quad (4)$$

$$L_{d_k} = \{l^d \mid (t_i, t_j \in d_k) \wedge (tp \in \{synonymOf, HyponymOf, associateWith\})\}.$$

$$L'_{d_k} = \{l^d \mid (t_i, t_j \in d_k) \wedge (tp \in \{subStract\})\}, \quad i, j = \overline{1..n}, k = \overline{1..m}, tp \in Tp,$$

где $f_u(\bar{w}_k, r)$ - функция получения компоненты вектора весовых коэффициентов отношений из множества L_{d_k} между концептами c_i и c_j , присутствующими в документе d_k , для категории пользователей r , Tp - множество типов отношений.

Документы, в которых присутствуют субтрактивные отношения, будут иметь меньший приоритет после ранжирования. Результатом ранжирования является упорядоченное по убыванию оценки $R()$ множество документов, представляющих результаты поиска.

Таким образом, применение формализованной ментальной модели пользователей в информационном поиске позволяет учесть предпочтения пользователей, формализованные в виде весовых коэффициентов отношений, а также проводить автоматическое ранжирование результатов, путем учета субтрактивных отношений.

Литература

1. Baeza-Yates, R. Modern Information Retrieval / R. Baeza-Yates, B. Ribeiro-Neto // Addison-Wesley, 1999. -520p. - ISBN 0-201-39829-X.
2. Manning, C. Introduction to Information Retrieval / C. Manning, P. Raghavan, H. Schütze // Cambridge University Press, 2008. -506 p. - ISBN 0-521-86571-9.
3. Liawa, S. Information retrieval from the World Wide Web: a user-focused approach based on individual experience with search engines / S. Liawa, Computers in Human Behavior 22, 2006. -P.501–517.
4. Kuropka, D. Modelle zur Repräsentation natürlichsprachlicher Dokumente D. Kuropka / Ontologie-basiertes Information-Filtering und Retrieval mit relationalen Datenbanken, 2004. - 242 p. -ISBN 3-8325-0514-8.
5. Azzah Al-Maskari, Mark Sanderson / A review of factors influencing user satisfaction in information retrieval // Journal of the American Society for Information Science and Technology. -Vol. 61. - Issue 5, 2010. –P.859–868.
6. Kelly, D. Methods for Evaluating Interactive Information Retrieval Systems with Users / D.Kelly // Foundations and Trends in Information Retrieval: Vol.3: No.1-2. - 224 p. -Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1561/1500000012>
7. Marchionini, G. Toward Human-Computer Information Retrieval Bulletin, in June/July 2006 Bulletin of the American Society for Information Science. -Режим доступа: <http://www.asis.org/Bulletin/Jun-06/marchionini.html>
8. Eugene Agichtein, Eric Brill, and Susan Dumais / Improving web search ranking by incorporating user behavior information. In SIGIR '06: Proceedings of the 29th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval, New York, NY, USA, 2006. -P.19–26.
9. Chai, W. and Vercoe, B / Using User Models in Music Information Retrieval Systems. In Proceedings of ISMIR // Chai W. and B. Vercoe , 2000. - Режим доступа: <http://ciir.cs.umass.edu/music2000/posters/chai.pdf>
10. Zhang, Y. / Undergraduate students' mental models of the Web as an information retrieval system. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 59(13), 2008. –P.2087-2098.
11. Manfred Wettler, Angelika Glockner-Rist. Cognitive processes in information retrieval: production rules and lexical nets. Mental Models and Human-Computer Interaction, 1991. –C.243-255.
12. Guha, R.V., McCool, R., and Miller, E.: Semantic search. In Proc. of the 12th International World Wide Web Conference (WWW 2003), Budapest, Hungary, 2003. –P.700-709.
13. Диковицкий, В.В., Шишаев, М.Г. Технология формирования адаптивных пользовательских интерфейсов для мультипредметных информационных систем промышленных предприятий / В.В. Диковицкий, М.Г. Шишаев // Информационные ресурсы России. -2014. -№ 1. - С.3-26.

Сведения об авторе

Диковицкий Владимир Витальевич – младший научный сотрудник,
e-mail: dikovitsky@iimm.ru

Vladimir V. Dikovitsky - junior researcher

А.А. Зуенко, А.А. Алмамаев

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЛОКАЛЬНОГО ПОИСКА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ УДОВЛЕТВОРЕНИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ*

Аннотация

В статье приводится определение задачи удовлетворения ограничений. Рассматриваются особенности методов локального поиска, которые могут быть применены при решении задачи удовлетворения ограничений. Проанализированы недостатки существующих алгоритмов систематического поиска, использующих матричное представление конечных предикатов. Сделан вывод о целесообразности исследования свойств рассматриваемых матриц с целью ускорения стандартных алгоритмов локального поиска.

Ключевые слова:

задача удовлетворения ограничений, программирование в ограничениях, методы локального поиска.

A.A. Zuenko, A.A. Almamatov

USING OF LOCAL SEARCH METHODS FOR SOLVING CONSTRAINT SATISFACTION PROBLEM

Abstract

In the article the definition of constraint satisfaction problem is given. The features of the approaches for solving constraint satisfaction problems are described. Disadvantages of existing systematic search algorithms using matrix representation of finite predicates are analyzed. It is drawn a conclusion about necessity of investigation of features of mentioned above matrices. The goal of the investigation is to accelerate typical local search algorithms.

Keywords:

constraint satisfaction problem, constraint programming, local search methods.

Введение

Задача удовлетворения ограничений (ЗУО) определяется множеством дискретных переменных $V = \{x_1, \dots, x_n\}$, для каждой из которых задана область определения или домен $D_j = \{d_j^{(1)}, \dots, d_j^{(n_j)}\}$ ($j = 1, \dots, n$), и множеством ограничений.

Ограничением называется пара (R, S) , где R – отношение, определенное на диапазоне S . ЗУО может рассматриваться как тройка (V, D, C) , где $V = \{x_1, \dots, x_n\}$ – множество переменных, $D = \{D_1, \dots, D_n\}$ – множество доменов переменных, $C = \{C_1, \dots, C_m\}$ – множество ограничений. Решением ЗУО называется присваивание значений всем переменным, которое удовлетворяет всем ограничениям. Целью решения ЗУО может быть нахождение одного или всех решений.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 14-07-00205-а, 14-07-00256-а).

Рассматривая некоторую задачу в виде задачи Constraint Satisfaction Problem (CSP), можно достичь нескольких важных преимуществ. Представление состояний в задаче CSP соответствует некоторому стандартному шаблону (т. е. выражается в виде множества переменных с присвоенными значениями), поэтому функцию определения приемника и проверку цели можно записать в универсальной форме, применимой ко всем задачам CSP. Более того, могут быть разработаны эффективные, универсальные эвристические функции, для создания которых не требуются дополнительные знания о конкретной проблемной области. Наконец, для упрощения процесса решения может использоваться сама структура графа ограничений, что позволяет в некоторых случаях добиться экспоненциального уменьшения сложности.

Важную роль в решении ЗУО играют методы локального поиска, идея которых заключается в направленном исследовании многообещающих регионов пространства поиска вместо полного перебора всех возможных решений. [1].

Ниже будут рассмотрены некоторые из методов локального поиска и их основные особенности.

Генетический алгоритм

Генетическим алгоритмом (ГА) называется следующий объект:

$$GA(P, r, l, sl, Fit, cr, m, ot), \quad (1)$$

где P – исходная популяция; r – количество элементов популяции; l – длина битовой строки, кодирующей решение; sl – оператор селекции; Fit – функция фитнеса (функция полезности), определяющая «пригодность» решения; cr – оператор кроссинговера, определяющий возможность получения нового решения; m – оператор мутации; ot – оператор отбора.

Пусть область поиска решения D задачи однокритериального выбора является конечным множеством решений, в котором каждое допустимое решение $X \in D$ является n -мерным вектором $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Наименьшей неделимой единицей биологического вида, подверженной действию факторов эволюции, является особь H_k^t (k – номер особи, t – момент времени эволюционного процесса). В качестве аналога особи в задаче оптимизации принимается произвольное допустимое решение $X \in D$, которому присвоено имя H_k^t . Действительно, вектор X – это наименьшая неделимая единица, характеризующая в экстремальной задаче внутренние параметры объекта оптимизации на каждом t -м шаге поиска оптимального решения, которые изменяют свои значения в процессе минимизации некоторого критерия оптимальности $J(X)$.

Качественные признаки особи H_k^t определяются как соответствующие точке X с именем H_k^t (в простейшем случае битовой строке). Некоторая особь H_k^t будет характеризоваться n генами, каждый из которых отвечает за формирование целочисленного кода соответствующей переменной. Тогда структуру битовой строки можно интерпретировать хромосомой, содержащей n сцепленных между собой генов. Местоположение i -го гена в хромосоме – локус, значение – аллель h .

При взаимодействии особи с внешней средой её генотип H_k^i порождает фенотип $F(H_k^i)$, который можно оценить количественно с помощью функции приспособленности (функции фитнеса) к внешней среде. Фитнес $Fit(H_k^i)$ каждой особи H_k^i равен численному значению функции $J(X)$, вычисленной для допустимого решения $X \in D$ с его именем H_k^i . Чем больше значение функции фитнеса при решении задач нахождения $J(X)$, тем лучше особь приспособлена к внешней среде.

Основные отличия ГА от стандартных локальных (например, градиентных) и глобальных (например, случайных) алгоритмов оптимизации:

- поиск субоптимального решения основан на оптимизации не одного, а множества решений, что позволяет одновременно анализировать несколько путей приближения к экстремуму; при этом оценка получаемых результатов на каждом шаге позволяет учитывать предыдущую информацию, т. е. происходит эволюционное развитие оптимальных решений;

- решения рассматриваются как некоторые закодированные структуры (символьные модели), а не как совокупность параметров, что позволяет в некоторых случаях значительно уменьшить время преобразования данных, т. е. увеличить скорость приближения к экстремуму;

- для оценки «пригодности» решения и последующего эволюционного развития наряду с использованием целевой функции дополнительно моделируются «правила выживания», которые расширяют разнообразие множества решений и определяют эволюционное развитие;

- при инициализации, преобразовании и других видах операции с решениями используются вероятностные, а не детерминированные правила, которые вносят в направленность генетического поиска элементы случайности; тем самым решается проблема выхода из локальных оптимумов;

- отсутствует необходимость расчета производных от целевой функции (как в градиентных методах) или матрицы производных второго порядка (как в квазиньютоновских).

Стратегии формирования популяции

В настоящее время наиболее известными являются три стратегии создания начального множества решений:

- 1) формирование полной популяции;
- 2) генерация случайного множества решений, достаточно большого, но не исчерпывающего все возможные варианты;
- 3) генерация множества решений, включающего разновидности одного решения.

При первой стратегии должен быть реализован полный набор всевозможных решений, но это невозможно из-за чрезмерных вычислительных затрат и большой области поиска для задач высокой размерности. Стартовая популяция, созданная на основе данной стратегии, не может развиваться, т. к. в ней уже содержатся все решения, в том числе и оптимальные.

Третью стратегию применяют, когда есть предположение, что некоторое решение является разновидностью известного. В этом случае происходит выход

сразу в область существования экстремума, и время поиска оптимума значительно сокращается. Наиболее перспективной является вторая стратегия, так как она в результате эволюции популяции создает возможность перехода из одной подобласти области поиска D в другую и имеет сравнительно небольшую размерность задачи оптимизации.

Эффективность ГА, качество получаемого решения и успех дальнейшего развития эволюции во многом определяются структурой и качеством начальной популяции. Наиболее целесообразным представляется подход, основанный на комбинировании второй и третьей стратегии: путем предварительного анализа решаемой задачи выявляются подобласти в области поиска D , в которых могут находиться оптимальные решения, т. е. определяются особи с высоким значением фитнеса, а затем случайным образом формируются стартовые решения в этих подобластях.

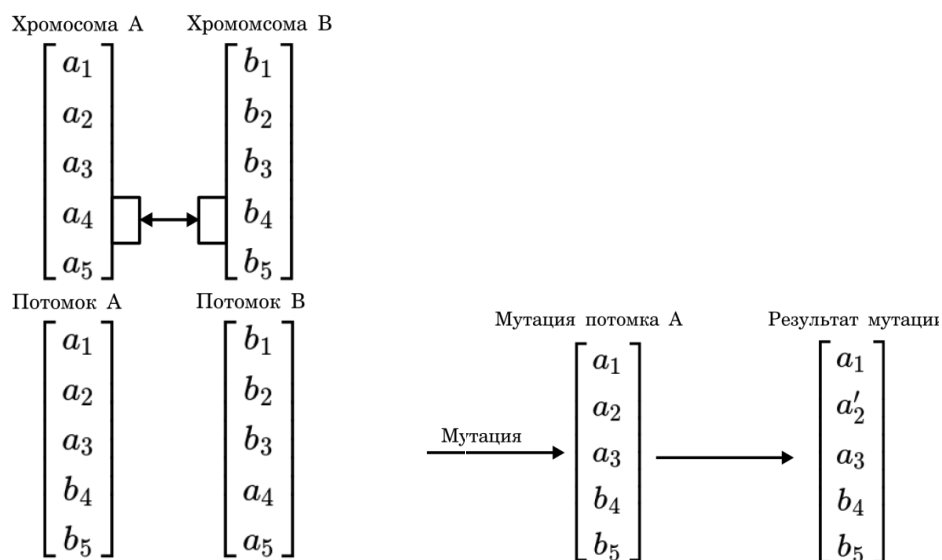


Рис. 1. Одноточечный кроссингвер и оператор мутации

Классификация генетических операторов

Выделяют два основных способа генерации новых решений (рис. 1):

- 1) путем перекомпоновки (скрещивания) двух родительских решений (оператор скрещивания или кроссингвер cr);
- 2) путем случайной перестройки отдельных решений (оператор мутации m).

Кроссингвер cr производит структурированный и рандомизированный обмен информацией внутри родительской пары, т. е. между двумя хромосомами, формируя новые решения. Задача создания потомков состоит в выборе такой комбинации участков хромосом, которая давала бы наилучшее решение. Таким образом, основная цель скрещивания заключается в накоплении всех лучших функциональных признаков, характеризующих отдельные участки хромосом, копируемых в конечном решении.

Следует отметить, что ГА – это целый класс алгоритмов, направленных на решение разнообразных задач комбинаторной оптимизации. Примерами различных ГА могут являться следующие алгоритмы [2]:

- канонический ГА;
- генитор;
- метод прерывистого равновесия;
- гибридный алгоритм;
- СНС;
- ГА с нефиксированным размером популяции.

Имитация отжига

Алгоритм имитации отжига (simulated annealing) основывается на понятии тепловой энергии, введенной С. Кирпатриком. Автор алгоритма использовал «тепловой шум» для выхода из одних локальных минимумов и для повышения вероятности попадания в более глубокие. При решении сложных задач, когда финансовые затраты на решение задачи оптимизации аналогичны энергии шарика, перемещающегося по поверхности, поиск более дешевых решений разумно начинать в ситуации с высоким уровнем «теплового шума», а в дальнейшем постепенно уменьшать его; этот процесс Кирпатрик назвал «имитацией отжига» [3].

Огромным преимуществом метода отжига является свойство избегать ловушек в локальных минимумах оптимизируемой функции, и продолжить поиск глобального минимума. Это достигается за счет принятия не только изменений параметров, приводящих к уменьшению значения функции, но и некоторых изменений, увеличивающих ее значение, в зависимости от температуры T характеристики моделируемого процесса. Чем выше температура, тем большие ухудшающие изменения допустимы, и больше их вероятность.

Еще одним преимуществом является то, что даже в условиях нехватки вычислительных ресурсов для нахождения глобального минимума, метод отжига, как правило, выдает неплохое решение (один из локальных минимумов).

Метод служит для поиска глобального минимума некоторой функции $f(x)$, заданной для x из некоторого пространства S , дискретного или непрерывного. Элементы множества S представляют собой состояния воображаемой физической системы (энергетические уровни), а значение функции f в этих точках используется как энергия системы $E = f(x)$. В каждый момент предполагается заданной температура системы T , как правило, уменьшающаяся с течением времени. После попадания в состояние x при температуре T , следующее состояние системы выбирается в соответствии с заданным порождающим семейством вероятностных распределений $g(x, T)$, которое при фиксированных x и T задает случайный элемент $G(x, T)$ со значениями в пространстве S . После генерации нового состояния $x' = G(x, T)$, система с вероятностью $h(\Delta E; T)$ переходит к следующему шагу в состояние x' , в противном случае процесс генерации x' повторяется. Здесь ΔE обозначает приращение функции энергии $f(x') - f(x)$. Величина $h(\Delta E; T)$ называется вероятностью принятия нового состояния.

Как правило, в качестве функции $h(\Delta E; T)$ выбирается либо точное значение соответствующей физической величине

$$h(\Delta E; T) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\Delta E}{T}\right)}, \quad (2)$$

либо приближенное значение

$$h(\Delta E; T) = e^{-\frac{\Delta E}{T}}. \quad (3)$$

Вторая формула используется наиболее часто. При ее использовании $h(\Delta E; T)$ оказывается больше единицы в случае $\Delta E < 0$, и тогда соответствующая вероятность считается равной 1. Таким образом, если новое состояние дает лучшее значение оптимизируемой функции, то переход в это состояние произойдет в любом случае.

Итак, конкретная схема метода отжига задается следующими параметрами:

- выбором закона изменения температуры $T(k)$, где k — номер шага;
- выбором порождающего семейства распределений $g(x; T)$;
- выбором функции вероятности принятия варианта $h(\Delta E; T)$.

При некоторых комбинациях вышеперечисленных параметров могут получаться алгоритмы, эффективные при определенных условиях. Некоторые из таких комбинаций образуют *схемы отжига*. Ниже перечислены некоторые из них:

- больцмановский отжиг;
- отжиг Коши (быстрый отжиг);
- сверхбыстрый отжиг;
- алгоритм Ксин-Яо.

Методы тушения

Далеко не всегда хватает вычислительных ресурсов на поиск глобального минимума. Кроме того, зачастую достаточно достигнуть не глобально оптимального решения задачи, а достаточно близкого к нему. Методы тушения (simulated quenching) не гарантируют нахождения глобального минимума, но, как правило, быстро находят близкое решение, а на практике зачастую и сам оптимум. Основная идея этих методов заключается в том, чтобы скомбинировать семейство распределений G одного из предыдущих четырех методов с более быстрым законом убывания температуры.

Например, можно рассматривать нормальные распределения g из больцмановского отжига, но при этом уменьшать температуру по закону

$$T_{k+1} = cT_k.$$

Как правило, в этом случае c выбирается между 0.7 и 0.99.

Такой метод очень быстро сходится, и для конкретных задач может в условиях реального времени давать весьма неплохое решение, близкое к оптимальному. Некоторые из методов тушения рассмотрены в [4, 5]. Зачастую они основаны либо на нормальном распределении, либо на распределении для сверхбыстрого отжига. Кроме того, встречаются специальные распределения, подобранные опытным путем для решения конкретных задач.

Методы роевого интеллекта

Методы роевого интеллекта – общее название класса алгоритмов, описывающих поведение децентрализованной самоорганизующейся системы. Термин был введён Херардо Бени и Ван Цзином в 1989 г., в контексте системы клеточных роботов [6].

Методы роевого интеллекта являются алгоритмами, использующими стратегии эволюционного моделирования и принципы природных механизмов принятия решений. Он включает в себя муравьиные алгоритмы, пчелиные алгоритмы, метод роя частиц и др.

Системы роевого интеллекта, как правило, состоят из множества агентов (боидов) локально взаимодействующих между собой и с окружающей средой. Каждый боид следует очень простым правилам и, несмотря на то, что нет какой-то централизованной системы управления поведением, которая бы указывала каждому из них на то, что ему следует делать, локальные и, в некоторой степени, случайные взаимодействия приводят к возникновению интеллектуального глобального поведения, неконтролируемого отдельными боидами.

Существует также огромное количество других алгоритмов, основанных на методах роевого интеллекта, однако наибольшую известность получили вышеперечисленные.

Муравьиный алгоритм

Муравьиные алгоритмы (Ant colony optimization, ACO) представляют собой вероятностную жадную эвристику, где вероятности устанавливаются, исходя из информации о качестве решения, полученного из предыдущих решений [7]. Муравьи относятся к социальным насекомым, живущим внутри некоторого коллектива – колонии. Основу «социального» поведения муравьев составляет самоорганизация – множество динамических механизмов, обеспечивающих достижение системой глобальной цели в результате низкоуровневого взаимодействия её элементов. Принципиальной особенностью такого взаимодействия является использование элементами системы только локальной информации. При этом исключается любое централизованное управление.

В сравнении с генетическими алгоритмами муравьиные алгоритмы имеют некоторые преимущества: опираются на память всей колонии вместо памяти только о предыдущем поколении и меньше подвержены неоптимальным начальным решениям (из-за случайного выбора пути и памяти колонии).

Ряд экспериментов показывает, что эффективность муравьиных алгоритмов растёт с ростом размерности решаемых задач оптимизации и для нестационарных систем с изменяемыми во времени параметрами.

Важным свойством муравьиных алгоритмов является неконвергентность: даже после большого числа итераций одновременно исследуется множество вариантов решения, что частично решает проблемы предварительной сходимости. Перспективными путями улучшения муравьиных алгоритмов являются их гибридизация с другими методами природных вычислений, например, генетическими алгоритмами [8]. Гибридизация может осуществляться по островной схеме, когда различные алгоритмы решают задачу параллельно и автономно, или по принципу «мастер-подмастерье» когда основной алгоритм – «мастер» – передаёт решение типовых подзадач «подмастерью».

Из недостатков алгоритма можно отметить затрудненность анализа работы алгоритма и неопределенное время сходимости.

АСО является метаэвристикой, в которой колония искусственных муравьев кооперируется для поиска хороших решений сложных дискретных задач оптимизации. Кооперация – ключевой компонент алгоритмов АСО: выбор отдается выделению вычислительных ресурсов группе относительно простых агентов, общающихся с помощью стигмергии – непрямого взаимодействия через окружение.

Алгоритмы АСО могут быть использованы для решения как статических, так и динамических задач оптимизации. Под статическими задачами понимаются те, в которых условия, единожды будучи заданными, не изменятся к моменту решения задачи. К таким относится, например, задача коммивояжера, где расстояния между городами не изменятся во время решения задачи. Напротив, динамические задачи определены функциями некоторых значений, которые могут определяться некоторой динамикой системы. В качестве примера можно привести задачу маршрутизации трафика, где топология сети может измениться в любой момент [9].

Существует множество вариаций и модификаций алгоритма.

Элитарная муравьиная система – суть алгоритма состоит в выделении «элитных муравьев». На каждой итерации алгоритма производится усиление лучших маршрутов путем прохода по данным маршрутам элитных муравьев.

ММАС (Max-Min Муравьиная система) – заключается в добавлении граничных условий на количество феромонов ($\tau_{max} \tau_{min}$). Феромоны откладываются только на глобально лучших или лучших в итерации путях. Все ребра инициализируются τ_{max} .

Ранговая муравьиная система (Asrank) – в данной модификации все решения ранжируются по степени их пригодности. Количество откладываемых феромонов для каждого решения взвешено так, что более подходящие решения получают больше феромонов, чем менее подходящие.

Длительная ортогональная колония муравьев (СОАС) – использует механизм откладывания феромонов, который позволяет муравьям искать решения совместно и эффективно. Используя ортогональный метод, муравьи в выполнимой области могут исследовать их выбранные области быстро и эффективно, с расширенной способностью глобального поиска и точностью [10].

Рекурсивная АСО – разбивает исходную задачу на поддомены и занимается отдельно решением каждого из них. Лучшие решения для поддоменов рассматриваются на следующем уровне и так далее.

Пчелиный алгоритм

Пчелиный алгоритм – это оптимизационный алгоритм, в основе которого лежит поведение пчел в живой природе [11, 12]. Применительно к задачам конструкторского проектирования и оптимизации в пчелином алгоритме каждое решение представляется в виде агента (пчелы), который хранит расположение (координаты или параметры многомерной функции) какого-то участка. Выделим два варианта поведения пчел.

В первом варианте две пчелы нашли два разных пересекающихся участка, и оба этих участка следует отметить как лучшие или выбранные. Во втором варианте будем считать, что это один участок, центр которого находится в точке, соответствующей большому значению целевой функции (ЦФ). Второй вариант поведения менее подвержен попаданию в локальные оптимумы за счет просмотра перспективных мест и их окрестностей. Причем на каждой итерации область просмотра уменьшается.

Основная идея пчелиного алгоритма заключается в том, что все пчелы на каждом шагу будут выбирать как элитные участки для исследования, так и участки в окрестности элитных, что позволит, во-первых, увеличить вероятность обнаружения близких к оптимальным решениям. После чего в окрестности остальных участков, в зависимости от их ЦФ, отправляются рабочие пчелы. Таким образом, работа алгоритма зависит от следующих основных параметров:

- общее число пчел-разведчиков;
- общее число участков;
- число элитных участков;
- число пчел-разведчиков на элитных участках;
- число пчел на остальных участках;
- начальный размер участков (вместе с их окрестностями);
- максимальное число итераций.

Приведем словесное описание алгоритма пчел [12]:

1. В соответствии с постановкой задачи проектирования и исходными данными формируется популяция пчёл (хромосом).

2. Отправка пчёл-исследователей. Определение месторасположения источников нектара. Для каждой пчелы случайным образом задается начальная позиция.

3. Оценка ЦФ пчёл в популяции. Выбор источника нектара пчелой-исследователем с определенной вероятностью, в зависимости от его качества. Для каждой пчелы определяется лучший (элитный) участок, и значение целевой функции на этом участке. Участки, на которых значения ЦФ больше, отбираются для поиска решений в их окрестностях.

4. Выбор пчёл с лучшими значениями ЦФ для каждого источника.

5. Если решение на исследуемом участке не улучшается с течением нескольких итераций, переход к п.6, иначе к п.3.

6. Отправка пчёл-разведчиков, осуществляющих случайный поиск и оценка их ЦФ.

7. Формирование новой популяции пчёл, в состав которой будут входить как пчелы с лучшими значениями ЦФ с элитных участков, так и пчелы со случайными значениями ЦФ.

8. Проверка условий окончания алгоритма. Если они выполняются, переход к п.9, иначе к п. 2.

9. Конец работы алгоритма.

Таким образом, ключевой операцией алгоритма пчёл является совместное исследование перспективных областей и их окрестностей. Отличительной особенностью алгоритма является способность динамически разбивать поисковое пространство на области, что уменьшает время работы алгоритма. Данный алгоритм иллюстрирует стратегию поиска «Разделяй и властвуй». Главным преимуществом

является тот факт, что резко снижается вероятность попадания в локальный оптимум, а за счёт распараллеливания может уменьшаться время выполнения.

Пчелиный алгоритм, в отличие от ГА, имеет лишь один оператор и легко распределяется на несколько параллельных процессов, за счёт чего значительно увеличивается его скорость.

Стоит отметить, что пчелиный алгоритм основывается на социальном поведении роя, а генетический алгоритм имитирует процесс эволюции и отбора. За счёт этого есть возможность комбинирования этих методов.

Табу-поиск

Табу-поиск (Поиск с запретами, Tabu-search, TS) является «высокоуровневой» эвристической процедурой для решения проблем оптимизации, разработанной для того, чтобы помочь другим методам (или составляющим их процессам) избежать ловушки локального оптимума. Термин «Табу-поиск» был придуман F. Glover в [13]. Табу-поиск достиг оптимальных и близких к ним решений в широком спектре классических и практических проблем – от планирования в телекоммуникациях до распознавания символов в нейросетях. Метод использует специализированные структуры данных, условия для выхода поиска из локального оптимума, и различные виды памяти для различных промежутков времени для интенсификации и диверсификации поиска.

Особенности памяти TS. Атрибуты ходов

TS использует атрибутивную память для направляющих целей (т. е. для вычисления множества доступных ходов $N^*(x)$). Вместо записи полного решения, атрибутивная память базируется на записи атрибутов. Этот тип памяти записывает информацию о свойствах решения (атрибутах), которые меняются при переходе от одного решения к другому (например, индексы изменённых при шаге поиска переменных). Наиболее распространёнными типами памяти являются основанная на новизне память и основанная на частоте память. Основанная на новизне память хранит атрибуты решений, изменившиеся при самых последних поисках. Основанная на частоте память хранит соотношения между общим числом итераций и числом итераций, на которых атрибут изменился или нет (в зависимости от того, является ли это частотой пребывания или частотой перехода).

Основанная на новизне память (Recency-based memory) является наиболее часто используемой структурой памяти в реализациях TS. Как и предполагает её название, она хранит атрибуты решения, которые изменились в недалеком прошлом. Для использования этой памяти, выбранные атрибуты недавно рассмотренного решения помечаются табу-статусом, и решения, которые содержат эти элементы (или частные комбинации этих элементов), становятся запрещёнными для выбора. При этом сами решения исключаются из $N^*(x)$, что предотвращает их повторное посещение. Другие решения, куда входят атрибуты со статусом табу, также не посещаются. Стоит отметить, что в отличие от классификации, запрещающей ходить только в посещённые решения, плюс хранения таких атрибутов в том, что другие ходы, ведущие к подобным решениям, также часто становятся табу.

Основанная на частоте память (Frequency-based memory). Как и новизна, частота часто имеет весовые значения или раскладывается на подклассы. Кроме того, информация о частоте может быть объединена с информацией о новизне с целью обеспечения композитной структуры для создания штрафов и стимулов, изменяющих оценку хода.

Определение лучшего кандидата

Определение лучшего кандидата для хода – критически важный шаг алгоритма. Сначала каждый из ходов в списке кандидатов оценивается на данной итерации поиска (вопросы касательно создания, обработки и модификации списка кандидатов, обсуждены в [14]). Во многих конфигурациях, оценка хода может базироваться изначально на изменениях, произведенных в целевой функции (то есть различие между значениями целевой функции до и после совершения хода). В иных случаях, когда ветвления не так легко определяются или не всем переменным назначены значения, оценка может базироваться на создании приблизительных решений, или просто использовать локальные критерии привлекательности. Впрочем, по мере продвижения поиска форма оценки может становиться более адаптивной, объединяя в себе улучшения, связанные с интенсификацией и диверсификацией.

Так как число ходов, запрещенных согласно табу-критерию, будет в основном малым относительно числа доступных, предполагая, что оценка в ходе не слишком вычислительно затратная, обычно предпочтительно оценивать перед проверкой статуса табу, имеет ли данный ход оценку выше, чем у его приемлемых предшественников. Проверка статуса табу – первый шаг в отборе допустимых ходов. Если ход не является табу, он немедленно принимается как допустимый; в противном случае, для преодоления статуса табу используется критерий аспирации, обеспечивая ходу второй шанс для принятия его как приемлемого.

Критерий аспирации – некоторое условие, при выполнении которого ход может быть сделан, даже если он содержит табу-атрибуты. К таким условиям может относиться, например, отсутствие не-табу ходов в списке возможных на данной итерации. Также если ход приводит к решению, которое лучше любого ранее достигнутого, он тоже часто удовлетворяет данному критерию.

Стратегии поиска

Использование основанной на новизне и частоте памяти в TS обычно исполняет функцию предотвращения циклов в процессах поиска, т. е. предотвращения бесконечного повторения одной и той же последовательности ходов.

Ключевой проблемой при использовании адаптивной памяти в TS является соблюдение баланса между интенсификацией и диверсификацией.

Интенсификационные стратегии базируются на модификации правил выбора для поощрения комбинаций ходов и особенностей решений, показавших положительные свойства. Также они могут инициировать возврат к привлекательным регионам для более тщательного их обследования.

Диверсификационные стратегии, напротив, пытаются найти новые атрибуты и комбинации атрибутов, которые не были включены в ранее сгенерированные решения. Эти стратегии берутся за ведение поиска в регионы, непохожие на только что исследованные. Важно помнить, что интенсификация и диверсификация являются не взаимно противоположными, а скорее взаимно дополняющими.

Диверсификация автоматически обеспечивается в TS функциями кратковременной памяти, но в частности поддерживается определёнными формами долговременной памяти. Стратегии диверсификации TS часто базируются на модификации правил выбора для того, чтобы привести в решение редко используемые атрибуты. С другой стороны, они могут ввести такие атрибуты периодическим применением методов и сбором подмножеств данных атрибутов в кандидаты-решения для продолжения поиска, или частичным или полным перезапуском процесса решения. Стратегии диверсификации в частности полезны, когда лучшие решения могут быть достигнуты только преодолением барьеров или «холмов» в топологии пространства решений.

Стратегические осцилляции (Strategic oscillation) – модификация TS, суть которой состоит в повторяющемся движении к локальному оптимуму и от него. Без использования TS это привело бы просто к колебательному движению около локального оптимума по градиенту функции. В данном случае невозможность посещать только что посещенные решения может привести к обнаружению других лежащих рядом локальных оптимумов и т. д.

Стратегические осцилляции работают с помощью ориентирования ходов в зависимости от некоторого критического уровня, заданного выбранным интервалом значений целевой функции. Этот критический уровень или «граница осцилляции» представляет собой точку, где метод обычно останавливается. Затем поиск движется к определённой глубине сквозь границу осцилляции, и поворачивает обратно. Граница осцилляции снова приближается и пересекается, в этот раз в обратном направлении, и метод движется к новой точке разворота (рис. 2).

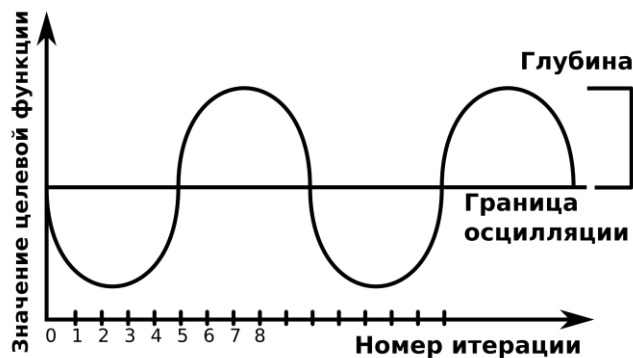


Рис. 2. Стратегические осцилляции

Процесс повторяющегося подхода и пересечения критического уровня с разных направлений создаёт колебательное поведение, которое и дало название методу.

Перекомпоновка пути

Перекомпоновка пути (Path relinking, PR), как стратегия прохода поиска по траектории, проложенной через высококачественные решения, была впервые предложена в связи с TS в [14]. Позже метод был проработан в деталях как средство интеграции стратегий интенсификации и диверсификации TS. PR в основном действует, начиная с некоторого решения, выбранного из подмножества качественных решений, и генерируя в пространстве решений путь через соседей к другим решениям из этого подмножества.

PR была предложена как расширение Combination method of Scatter Search [15]. Вместо прямой генерации нового решения через комбинацию двух или более оригинальных решений, PR, генерирует путь между выбранными решениями. Характер подобных путей легко специфицируем ссылкой на атрибуты решений, которые добавляются, удаляются или модифицируются иным образом, когда выполняются ходы. Примеры подобных атрибутов включают ребра и узлы графов, последовательные позиции в расписании, векторы, содержащиеся в решениях базисов задач линейного программирования и значения переменных и функции от переменных.

Использование матрицеподобных структур при моделировании качественных зависимостей

Алгебра кортежей

В работе [16] описана математическая система для моделирования многоместных отношений. В её основе лежат известные свойства декартова произведения, которые соответствуют основополагающим законам математической логики.

Основные понятия

Атрибут – имя некоторого свойства системы или её части, представленное множеством заданных или вычисляемых значений (доменом)

Схема отношения – последовательность атрибутов, описывающая некоторое отношение. Объекты, заданные в одной схеме отношений, называются *однотипными*. Большая часть базовых операций доступна, прежде всего, для однотипных объектов.

Элементарный кортеж соответствует обычному кортежу элементов в многоместных отношениях.

С-кортеж – кортеж, заданный в некоторой схеме отношения. Компонентами этого кортежа являются подмножества соответствующих доменов атрибутов этой схемы. С-кортеж интерпретируется как множество элементарных кортежей, содержащихся в декартовом произведении его компонент. Записывается как строка компонент в квадратных скобках:

$$[A_1, \dots, A_n]. \quad (4)$$

С-система – объединение однотипных С-кортежей. С-система записывается как:

$$\begin{bmatrix} A_1^1 & \cdots & A_n^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_1^m & \cdots & A_n^m \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Диагональная C-система – C-система размерности $n \times n$, у которой все недиагональные элементы равны полной компоненте (компоненте, содержащей все элементы своего домена; записывается как *).

D-кортеж – отношение, равное диагональной C-системе, записанное в виде кортежа диагональных компонент C-системы, ограниченного перевернутыми скобками:

$$]A_1, \dots, A_n[. \quad (6)$$

D-система – структура, эквивалентная пересечению нескольких однотипных D-кортежей. Записывается следующим образом:

$$\left[\begin{array}{ccc} A_1^1 & \cdots & A_n^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_1^m & \cdots & A_n^m \end{array} \right]. \quad (7)$$

Также были определены базовые операции между вышеописанными структурами данных. К ним можно отнести обобщенное пересечение, объединение однотипных систем, преобразование систем в альтернативные классы, а также операции с атрибутами.

На основе данных структур и их свойств были разработаны схемы решения некоторых известных задач логического анализа, таких как: задача проверки правильности следствия, задача генерации возможных следствий с ограничениями на состав переменных и т. д.

Несмотря на возможность решать различные задачи с использованием матричных структур, в работах Б.А. Кулика не было предложено конкретных эффективных методов решения задач большой размерности. Был рассмотрен лишь алгоритм выполнимости КНФ, удовлетворительно работающий для формул логики высказываний. Для формул над одноместными предикатами он характеризуется большой вычислительной сложностью. Данный алгоритм реализовывал слепой поиск, то есть в нем не использовались эвристики, также сомнительным представляется и используемый принцип организации процесса ветвления, когда уровням дерева поиска сопоставляются строки (кортежи) D-системы, а узел дерева поиска соответствует некоторой компоненте выбранной строки.

Интеграция методов вычислительной логики и методов удовлетворения ограничений

Позднее А.А. Зуенко [17-19] было предложено использовать матричное представление конечных предикатов для решения более широкого класса задач, чем задача выполнимости КНФ, а именно для задач удовлетворения ограничений. Для разработки эффективных методов решения ЗУО было предложено использовать специфические свойства матриц ограничений. Анализ этих свойств позволил существенно ускорить традиционные алгоритмы распространения ограничений. Предложенные в работах [17-19] методы и алгоритмы реализуют эвристический (интеллектуальный) поиск на основе оригинальных эвристик, обеспечивая существенное увеличение скорости и экономию памяти по сравнению с прототипами. Данные методы

носят систематический характер и хорошо подходят как для поиска единственного решения, так и для поиска всех возможных корней системы ограничений. Однако пространство поиска, с которым они работают, ограничено размерностью 50^{50} , где основание степени – количество переменных, а показатель степени – максимальное количество значений в областях определения этих переменных. Поэтому, если нам требуется решить задачу поиска хотя бы одного решения, возможно, отвечающего некоторому заранее заданному критерию, а пространство поиска имеет на несколько порядков большую размерность, то необходимо привлекать алгоритмы локального поиска, которые не гарантируют при одном запуске получение требуемого решения, но серия запусков обычно довольно быстро приводит к искомому результату.

Заключение

В статье проанализированы некоторые из широко известных методов локального поиска, которые можно применять при решении ЗУО. Проанализированы недостатки существующих алгоритмов систематического поиска, использующих матричное представление конечных предикатов. Сделан вывод о целесообразности исследования свойств упомянутых логических матриц с целью ускорения стандартных алгоритмов локального поиска. Фокус наших дальнейших исследований сосредоточен именно на разработке подобных методов локального поиска, интегрирующих матричное представление ограничений и модификации известных эвристических процедур.

Литература

1. Щербина, О.А. Удовлетворение ограничений и программирование в ограничениях / О.А. Щербина // Интеллектуальные системы, 2011. - Т.15, вып. 1-4. – С.54-73.
2. Панченко, Т. В. Генетические алгоритмы / Т.В. Панченко // Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 28 с.
3. Kirkpatrick, S. Optimization by Simulated Annealing / S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P. Vecchi // Science. - Vol. 220. - No. 4598. - P.671–680.
4. Ingber, L. Simulated Annealing: Practice versus theory / L. Ingber // Mathematical and Computer Modelling. -1993. – №18(11). - P.29-57.
5. Ingber, L. Adaptive simulated annealing (ASA): Lessons learned / L. Ingber // Journal «Control and Cybernetics», 1995. –P.3-9.
6. Beni, G. Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems, Proceed / G. Beni, J. Wang // NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems, Tuscany, Italy, June 26-30, 1898.
7. Dorigo, M. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating objects / M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colomi // IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics, 1996. – № 26(1). – P.9-41.
8. Курейчик, В.В. Архитектура гибридного поиска при проектировании / В.В. Курейчик // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. - №7 (132). –С.22-27.
9. Dorigo, M. Ant Colony Optimization / M. Dorigo, T. Stuzle // Bradford Company Scituate, MA, USA, 2004. –P.223-242.

10. Hu, X. Orthogonal methods based ant colony search for solving continuous optimization problems /X. Hu, J. Zhang, Y. Li // Journal of Computer Science and Technology, 23(1), 2008. -P.2-18.
11. Karaboga, D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization / D. Karaboga // Technical report TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005. –P.2-5.
12. Запорожец, Д.Ю. Роевой алгоритм в задачах оптимизации /Д. Ю. Запорожец, В.В. Курейчик // Известия ЮФУ. Технические науки. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. - №7 (108). – С.28-32.
13. Glover, F. Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence / F. Glover // Computers and Operations Research. – 1986. - Vol.13. -P. 533-549.
14. Glover, F. Tabu Search, Part I / F. Glover // ORSA Journal on Computing, 1989. - Vol. 1, no. 3. –P.190-206.
15. Glover, F. A Template for Scatter Search and path Relinking / F. Glover // Lecture Notes in Computer Science, 2005. - Vol. 1363.
16. Кулик, Б.А Алгебраический подход к интеллектуальной обработке данных и знаний / Кулик Б.А., Зуенко А.А., Фридман А.Я. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. – 235 с.
17. Зуенко, А.А. Матричное представление ограничений и основанные на нем базовые методы распространения ограничений / Теория и практика системной динамики: материалы докладов VI Всероссийской научной конф. г. Апатиты, 30 марта – 3 апреля 2015 г. - Апатиты: КНЦ РАН, 2015. – С.41-43.
18. Зуенко, А.А. Вывод на ограничениях с применением матричного представления конечных предикатов / А.А. Зуенко // Искусственный интеллект и принятие решений. - 2014. – Вып. 3. – С.21-31.
19. Зуенко, А.А. Эвристический метод удовлетворения ограничений на основе их матричного представления / А.А. Зуенко, А.А. Очинская // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2015): материалы IV Международной научно-техн. конф., г. Минск, 19 - 12 февраля 2015 г. Минск: БГУИР, 2015. – С.297-301.

Сведения об авторах

Зуенко Александр Анатольевич - к.т.н, старший научный сотрудник,
e-mail: zuenko@iimm.ru
Alexander A. Zouenko - Ph.D. (Tech. Sci.), researcher

Алмаматов Александр Анатольевич – младший научный сотрудник,
e-mail: almamatov@iimm.ru
Alexander A. Almamatov - junior researcher

УДК 004.832

А.А. Зуенко

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

ПРЯМОЙ И ОБРАТНЫЙ ВЫВОД В ПРОДУКЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С НЕДООПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ*

Аннотация

В статье задача вывода в системах продукций с недоопределенными параметрами рассматривается как задача удовлетворения ограничений. Саму систему продукций предлагается записывать в виде специализированной матрицы ограничений, обеспечивающей эффективность обработки и хранения знаний. Разработан метод распространения ограничений, реализующий процедуру прямого вывода. Обратный вывод предлагается сводить к поиску абдуктивных заключений.

Ключевые слова:

задача удовлетворения ограничений, программирование в ограничениях, система продукций, недоопределенные параметры.

A.A. Zuenko

FORWARD AND BACKWARD CHAINING INFERENCE IN PRODUCTIONS SYSTEMS WITH SUBDEFINITE PARAMETERS

Abstract

In the article the problem of inference in productions systems with uncertain parameters is considered as constraint satisfaction problem. Productions systems are proposed to write in the form of specialized constraint matrix that provides the efficiency of processing and storage of knowledge. The constraint propagation method, which implements the procedure of forward inference, is developed. The backward chaining inference is proposed to reduce to search of abductive conclusions.

Keywords:

constraint satisfaction problem, constraint programming, productions system, subdefinite parameters.

Введение

Известно, что для описания факторов неопределенности (НЕ-факторы) могут быть использованы различные формы: стохастическая, статистическая, интервальная, нечеткая. Интервальное представление факторов неопределенности отвечает наиболее широкому классу задач, поскольку во многих прикладных задачах часто недостаточно информации для того, чтобы рассматривать факторы как случайные. Ситуация, когда некоторые параметры представлены как интервалы, типична для моделирования многих сложных объектов, например, промышленно-природных систем, где измерения сопряжены с погрешностью, которую требуется учитывать в дальнейших

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 13-07-00318-а, 14-07-00205-а, 14-07-00256-а).

расчетах, в том числе в расчетах искомых значений непосредственно неизмеримых величин. Существенная роль в формализации подобных систем принадлежит экспертным суждениям и знаниям человека.

При исследовании слабо формализованных предметных областей зависимости и ограничения носят, прежде всего, качественный, а не количественный характер, и могут быть описаны средствами математической логики. Для вещественной рациональной функции n вещественных переменных легко строится естественное интервальное расширение: все вещественные переменные заменяются соответствующими интервальными, а вещественные арифметические операции – интервально-арифметическими. Интервальная арифметика обладает монотонностью по включению, т.е. в процессе вычислений значение может становиться только более точным, гарантируя монотонность вывода. Однако, если модель включает качественные нечисловые параметры, а начальные данные могут задаваться приблизительно, например, в виде множеств значений, то требуются новые методы, аналогичные известным методам последовательных приближений.

По мнению автора, разработку таких методов целесообразно вести в рамках парадигмы программирования в ограничениях (Constraints Programming) [1-3], чтобы облегчить интеграцию создаваемых методов с известными интервальными моделями.

В статье представлено применение разработанных ранее автором методов вывода на ограничениях [4-7] к организации процедур логического вывода в системах, основанных на правилах. Описываемые методы ориентированы на обработку недоопределенных параметров, каждому из которых сопоставляется не одно конкретное значение, а некоторое подмножество из множества допустимых значений. Значение параметра может быть полностью не определено и задаваться в виде всего домена, полностью определено – представлять одноэлементное подмножество домена и недоопределено – задаваться в виде некоторого подмножества домена. Используется интервальная форма для описания факторов неопределенности, если считать множество своеобразным интервалом. Сам вывод состоит в последовательном “сжатии” изначально заданных диапазонов значений данных и конкретизации значений интересующих параметров на основе анализа совокупности ограничений (правил).

Наиболее близким к предлагаемому в статье подходу является подход, развиваемый в теории недоопределенных моделей [8]. Метод недоопределенных моделей (Н-моделей) был предложен А.С. Нариньяни для представления и обработки не полностью определенных знаний. Однако, в работах А.С. Нариньяни не уделено должного внимания логическим моделям, предложенный им потоковый алгоритм носит достаточно общий характер и требует уточнений в применении к логическим уравнениям, к виду которых могут быть сведены экспертные правила.

Для представления качественных зависимостей (продукций), а также для решения задачи уточнения значений недоопределенных нечисловых параметров предлагается применять аппарат матрицеподобных вычислений [9, 10]. Далее описываются упомянутые выше методы вывода на ограничениях на основе матричного представления конечных предикатов.

Моделирование факторов неопределенности с помощью матриц конечных предикатов

В [9] даются основы алгебры кортежей (АК) и демонстрируется ее применение для унификации представления и обработки различных видов данных и знаний, а также решения различных задач логического и логико-вероятностного анализа. Близкий подход применяется также в [10] для решения задач распознавания образов и упрощения баз знаний.

Конечные предикаты в АК можно сжато представить с помощью двух типов структур: *C*-систем и *D*-систем.

С помощью *C*-систем удобно моделировать дизъюнктивные нормальные формы (ДНФ) конечных предикатов. Продemonстрируем это на примере. Пусть задан конечный предикат:

$$\varphi(x, y, z) = (x=a, b) \wedge (y=a, c) \vee (z=d).$$

Для простоты все переменные определены на одном и том же множестве $\{a, b, c, d\}$. Здесь и далее будем использовать запись вида $(x=a, b)$ для обозначения выражения $(x=a) \vee (x=b)$. Учитывая, что область истинности одноместного предиката $(x=a, b)$ есть $\{a, b\}$, то область истинности предиката $\varphi(x, y, z)$ может быть представлена в виде следующей *C*-системы:

$$R[XYZ] = \begin{bmatrix} \{a, b\} & \{a, c\} & * \\ * & * & \{d\} \end{bmatrix}.$$

Атрибуты *X*, *Y*, *Z* *C*-системы $R[XYZ]$ соответствуют переменными x , y , z формулы $\varphi(x, y, z)$. Заметим, что “*” – сокращенное обозначение всего диапазона возможных значений (домена) атрибута. *C*-систему $R[XYZ]$ можно преобразовать в обычное многоместное отношение:

$$(\{a, b\} \times \{a, c\} \times \{a, b, c, d\}) \cup (\{a, b, c, d\} \times \{a, b, c, d\} \times \{d\}).$$

С помощью *D*-систем моделируются конъюнктивные нормальные формы (КНФ) конечных предикатов. *D*-система записывается как матрица компонент-множеств, которая ограничена перевернутыми прямыми скобками.

D-системы позволяют легко вычислять дополнение *C*-систем: берется дополнение для каждой компоненты-множества. Например, $\neg\varphi = (\neg(x=a, b) \vee \neg(y=a, c)) \wedge \neg(z=d)$, что равносильно $\neg\varphi = ((x=c, d) \vee (y=b, d)) \wedge (z=a, b, c)$, можно выразить в виде *D*-системы $\bar{R}[XYZ]$:

$$\bar{R}[XYZ] = \left[\begin{array}{ccc} \{c, d\} & \{b, d\} & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \{a, b, c\} \end{array} \right].$$

Пустая компонента “ \emptyset ” – это фиктивная компонента, не содержащая ни одного значения.

Системы ограничений с конечными доменами, обычно, удобно представлять в виде *D*-систем, а решения задач CSP искать в виде *C*-систем.

С помощью структур алгебры кортежей (*C*- и *D*-систем) можно моделировать и анализировать не только классические ограничения с конечными доменами, но и ограничения с недоопределенными параметрами.

Рассматриваемые матрицеподобные структуры можно рассматривать как недоопределенные расширения обычных отношений, поскольку их кортежи содержат в качестве значений множества, а не отдельные элементы.

Ниже в кратком изложении приводятся методы решения CSP на основе матричного представления ограничений.

Распространение ограничений и систематический поиск решений задачи CSP

Согласно [1] *задача удовлетворения ограничений* определена множеством переменных x_1, x_2, \dots, x_n и множеством ограничений C_1, C_2, \dots, C_m . Каждая переменная x_i имеет непустую область определения D_i (область возможных значений, домен). Каждое ограничение C_i включает некоторое подмножество переменных и задает допустимые комбинации значений для этого подмножества. Состояние задачи описывается как *присваивание* значений некоторым (частичное присваивание) или всем переменным (полное присваивание): $\{x_i=v_i, x_j=v_j, \dots\}$. Присваивание, не нарушающее никаких ограничений, называется *допустимым* присваиванием. *Решением задачи CSP* является полное присваивание, которое удовлетворяет всем ограничениям.

Теперь кратко затронем один из методов вывода на ограничениях, моделируемых матрицами конечных предикатов [4]. В отличие от ранее разработанных в АК методов [9], в данном методе решение строится путем пошагового усечения доменов. Само решение представляется в виде совокупности доменов или установлении того факта, что все вершины дерева поиска являются тупиковыми. В отличие от имевшихся в АК методов “слепого” поиска, в предлагаемом методе широко применяются эвристики.

При решении задач CSP дерево поиска можно представить, как *дерево частичных присваиваний* – это дерево, где каждая вершина соответствует некоторому частичному присваиванию. Корень дерева отвечает пустому присваиванию. В вершине v выбирается лишь одна переменная, которой еще не было присвоено значение на предыдущих уровнях дерева поиска.

Для выбора “наилучшего” преемника вершины дерева поиска необходимо указать переменную, которой на текущем шаге следует присвоить значение, а также само присваиваемое значение, которое быстрее всего приводит к цели.

Пусть ограничения задачи моделируются в виде некоторой D -системы. В предлагаемом методе выбор “наилучшего” преемника производится на основе следующих эвристик:

Э1. Выбирается атрибут D -системы с доменом, содержащим наименьшее количество значений, что позволяет проверять меньшее количество преемников.

Э2. В случае неоднозначности выбора, производимого согласно Э1, выбирается атрибут, количество непустых компонент которого максимально.

Э3. Для формирования нового одноэлементного домена выбирается наиболее часто встречающееся в соответствующем столбце D -системы значение атрибута.

Само присваивание заключается в “настройке” D -системы на новый одноэлементный домен выбранного на текущем шаге атрибута с последующим

упрощением D -системы и переходом к рассмотрению D -системы меньшей размерности, чем текущая.

Состояние задачи в терминах введенных матрицеподобных структур полностью характеризуется с помощью совокупности доменов атрибутов, которые уже элиминированы из D -системы и самой D -системы, представляющей собой остаток, полученный из исходной D -системы в ходе присваиваний и применения правил редукции, которые представлены ниже утверждениями **У1-У6**. Если не все вершины дерева поиска являются тупиковыми, то решение записывается в виде совокупности доменов.

Зачастую, пространство поиска может быть значительно редуцировано вообще без организации “ветвления” с помощью алгоритмов, преобразующих описание текущего состояния в эквивалентное ему более простое описание. Такие алгоритмы имеют полиномиальную оценку сложности.

Далее уточним некоторые особенности процесса редуцирования пространства поиска на основе матричного представления конечных предикатов, а именно:

1. Каков признак того, что текущая ветвь поиска является тупиковой (соответствующее этой вершине текущее присваивание недопустимо)?
2. Как уменьшить размерность пространства поиска, не прибегая к ветвлению?
3. Что служит признаком успешного завершения процесса поиска?

Для ответа на эти вопросы рассмотрим следующие утверждения, приводимые здесь без доказательств:

Утверждение 1 (У1). Если хотя бы одна строка D -системы пуста (содержит все пустые компоненты), то D -система пуста (соответствующая система ограничений несовместна).

Утверждение 2 (У2). Если все компоненты некоторого атрибута пусты, то данный атрибут можно удалить из D -системы (удаляются все компоненты, стоящие в соответствующем столбце).

Утверждение 3 (У3). Если в D -системе есть строка (кортеж), содержащая лишь одну непустую компоненту, то все значения, не входящие в эту компоненту, удаляются из соответствующего домена.

Утверждение 4 (У4). Если строка D -системы содержит хотя бы одну полную компоненту, то она удаляется (можно удалить соответствующее ограничение из системы ограничений).

Утверждение 5 (У5). Если компонента некоторого атрибута D -системы содержит значение, не принадлежащее соответствующему домену, то это значение удаляется из компоненты.

Утверждение 6 (У6). Если одна строка D -системы полностью доминирует (покомпонентно содержит) другую строку, то доминирующая строка удаляется из D -системы.

Ответ на первый из поставленных вопросов дает нам **У1**, то есть *признаком недопустимости* частичного присваивания является пустота D -системы.

Ответом на второй вопрос служат остальные утверждения, часть из которых позволяет исключать значения из доменов атрибутов (**У3, У5**) или даже сами атрибуты (**У2**), а часть позволяет исключать из рассмотрения лишние строки (**У4, У6**).

Признак успешного завершения процесса поиска – элиминация из *D*-системы *всех* строк и столбцов без образования пустых строк. Другими словами, результирующее состояние в этом случае будет характеризоваться только совокупностью непустых усеченных доменов.

Данный метод предназначен для систематического исследования пространства поиска: после обнаружения тупиковой вершины осуществляется возврат к некоторой точке ветвления, расположенной выше в дереве поиска. При этом используется *механизм обратного перехода, управляемого конфликтами* (conflict-directed backjumping).

Моделирование систем продукций с помощью матриц ограничений и организация прямого вывода

Системы представления знаний, использующие выражения вида «ЕСЛИ условие, ТО действие», получили название систем продукций или систем, основанных на правилах [3]. Рассмотрим, один из наиболее распространенных случаев, когда продукционная система относится к классу систем с четко определенными знаниями, а база фактов аддитивна, т.е. в процессе вывода факты добавляются и в дальнейшем не удаляются. Подсистема вывода реализует процесс рассуждений на основе базы знаний и базы фактов. Получение в ходе вывода факта о новом значении уже имеющегося в базе фактов данного трактуется как конфликт, то есть различные значения каждого данного рассматриваются как взаимоисключающие [11].

В начале экспертизы все заданные значения данных (как параметров – данных символьного типа, так и переменных – данных числового типа) считаются возможными. По мере срабатывания правил из списка возможных значений в базе данных исключаются те значения данных, которые противоречат частям ТО или ИНАЧЕ сработавших правил. Запись в базу фактов производится только тогда, когда список возможных значений сужается до единственного значения. Противоречие в данных фиксируется в двух случаях: либо при появлении фактов «за» значение данного, уже исключенного из списка допустимых, либо если на некоторой итерации в списке новых фактов появляются свидетельства как за истинность, так и за ложность предпосылки какого-либо правила.

Очевидно, что, если знания не определены, подход к выводу будет иметь особенности, а иногда и довольно сильно отличаться от приведенной схемы, поскольку появление в базе фактов различных значений одного и того же данного будет уже трактоваться как неопределенность, а не как противоречие. В этом случае, даже при наличии аддитивной базы фактов, добавление фактов происходит не только когда область определения данного сужается до единственного значения. Считается, что для работы с неопределенностью следует привлекать неклассические логики.

В ходе исследований разработан способ формализации систем продукций с недоопределенными параметрами с помощью матриц конечных предикатов. Экспертные правила могут быть представлены в виде уравнений с конечными предикатами, где каждое уравнение представляет собой дизъюнкцию одноместных предикатов. Одно правило соотносится с одним или несколькими уравнениями, а вся база знаний моделируется системой уравнений. Матричное

представление системы уравнений с конечными предикатами предлагается формировать в виде D -системы. Образец, в соответствии с которым требуется осуществлять поиск удобно записывать в виде дополнительных ограничений на домены переменных, а матрично представлять в форме S -системы, содержащей единственную строку (кортеж).

Задача прямого вывода в системах продукций с недоопределенными параметрами сводится к задаче уточнения значений недоопределенных параметров.

Формально задача уточнения недоопределенных параметров ставится следующим образом. Изначально в виде вектора задается образец для поиска, в котором часть данных однозначно определена (параметр принимает единственное значение), часть данных не определена (параметр принимает все допустимое множество значений, описывается с помощью фиктивной компоненты “*”), а часть данных недоопределена (параметр оценивается некоторым неоднородным подмножеством значений из его области определения). Имеется система продукций, с недоопределенными параметрами, формализованная в виде единственной D -системы. Требуется вычислить результат “настройки” исходной D -системы на новые домены переменных (атрибутов), описание которых содержится в образце для поиска, максимально “сузив” исходные домены всех переменных, в том числе и тех, что не являются целевыми (целью поиска).

Далее на примерах продемонстрирован подход, позволяющий осуществлять подобную работу с недоопределенными данными в продукционных системах в рамках классической логики.

Пример 1. В работе [12] приведено описание реализованной на компьютере экспертной системы, предназначенной для принятия решений на уровне командира корабля в случае возникновения нештатных ситуаций на корабле или в окружающей обстановке, в частности, в боевых условиях.

Рассмотрим комплект правил по анализу электрообеспечения корабля. В этом комплекте используются 4 фактора. Данные по ним и соответствующие обозначения приведены в табл. 1. Пусть поступила информация: “Основные источники вышли из строя в одном эшелоне, канализация энергии или не нарушена, или нарушена частично”, где данное “Канализация энергии” задано неоднозначно.

Правило 1: IF $((x = c) \text{ AND } (y = b)) \text{ OR } (z = b)$ THEN $(w = c)$.

Правило 2: IF $(x = b)$ THEN $(w = b)$.

Исходные данные: $(x=b) \text{ AND } ((z=a) \text{ OR } (z=b))$.

Представленные правила можно записать на языке математической логики:

Правило 1: $((x = c) \wedge (y = b)) \rightarrow (w = c)$;

$(z = b) \rightarrow (w = c)$.

Правило 2: $(x = b) \rightarrow (w = b)$.

Исходные данные: $(x=b) \wedge ((z=a) \vee (z=b))$.

Для того, чтобы подчеркнуть аналогию с методами решения систем линейных уравнений, использующими технику распространения констант (например, методом Гаусса) и методами на основе N -моделей, запишем правила

и исходные данные в виде системы логических уравнений с дополнительными ограничениями:

$$\begin{cases} ((x = a, b) \vee (y = a) \vee (w = c)) = 1 \\ ((z = a, c) \vee (w = c)) = 1 \\ ((x = a, c) \vee (w = b)) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

Дополнительные условия:

$$x=b; \quad z=a, b. \quad (2)$$

Теперь перейдем к записи системы (1) и дополнительных условий (2) в матрицеподобных структурах. Так система правил моделируется в виде D -системы A , а конъюнктивная база фактов в виде кортежа B .

$$A[XYZW] = \begin{bmatrix} \{a, b\} & \{a\} & \emptyset & \{c\} \\ \emptyset & \emptyset & \{a, c\} & \{c\} \\ \{a, c\} & \emptyset & \emptyset & \{b\} \end{bmatrix}$$

$$B[XYZW] = [\{b\} * \{a, b\} *].$$

Таблица 1

Факторы неопределенности

Наименования факторов и их значения	Обозначения факторов	Обозначения значений факторов
СНАБЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЕЙ	W	
обеспечено полностью		a
утрачено частично		b
утрачено полностью		c
ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ	X	
в строю		a
вышли из строя в одном эшелоне		b
вышли из строя в обоих эшелонах		c
АВАРИЙНЫЕ ИСТОЧНИКИ	Y	
в строю		a
вышли из строя		b
КАНАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	Z	
не нарушена		a
нарушена частично		b
нарушена полностью		c

Каждая строка D -системы A соответствует некоторому уравнению из системы (1).

Из записи $B[XYZW]$ видно, что значение переменной X – определено, Y и W – полностью не определено, а переменной Z – недоопределено.

В терминологии теории экспертных систем $B[XYZW]$ есть некоторый образец, в соответствии с которым требуется осуществлять поиск.

Рассмотрим, каким образом решается задача уточнения недоопределенных параметров для уравнения, моделируемого D -системой $A[XYZW]$ при

дополнительных ограничениях, задаваемых в виде S -системы $B[XYZW]$, которая может быть преобразована в обычное отношение по формуле:

$$B[XYZW] = \{b\} \times \{a, b\} \times \{a, b\} \times \{a, b, c\}.$$

Фактически, $B[XYZW]$ задает подпространство (брус), где следует искать решение, в пространстве с осями $X - \{a, b, c\}$, $Y - \{a, b\}$, $Z - \{a, b, c\}$, $W - \{a, b, c\}$.

Начнем вывод с “настройки” D -системы $A[XYZW]$ на новые домены, которые содержатся в компонентах $B[XYZW]$, то есть положим $X - \{b\}$, $Y - \{a, b\}$, $Z - \{a, b, c\}$, $W - \{a, b, c\}$:

Частичное решение: на начальном этапе не содержит ни одного элемента.

Остаток D-системы:

$$\begin{array}{cccc} X & Y & Z & W \\ \{b\} & \{a, b\} & \{a, b\} & \{a, b, c\} \\ 1 \left[\begin{array}{cccc} \{a, b\} & \{a\} & \emptyset & \{c\} \\ 2 \left[\begin{array}{cccc} \emptyset & \emptyset & \{a, c\} & \{c\} \\ 3 \left[\begin{array}{cccc} \{a, c\} & \emptyset & \emptyset & \{b\} \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array}.$$

По $Y5$ удаляем значение “ a ” из компонент первой и третьей строки. После чего удаляем строку № 1 по $Y4$. Тогда по $Y2$ можно исключить из D -системы атрибуты X и Y , добавив их домены в частичное решение. Рассматривая атрибут Z , можно, руководствуясь $Y5$, удалить значение “ c ” из компоненты строки № 2. Получим:

Частичное решение: $X - \{b\}$, $Y - \{a, b\}$.

Остаток D-системы:

$$\begin{array}{cc} Z & W \\ \{a, b\} & \{a, b, c\} \\ 2 \left[\begin{array}{cc} \{a\} & \{c\} \\ 3 \left[\begin{array}{cc} \emptyset & \{b\} \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array}.$$

Строка №3 содержит лишь одну непустую компоненту, а значит домен атрибута W (целое данное) может быть сужен до $\{b\}$. Следовательно, из компонент атрибута W вычеркиваем значения, не принадлежащие $\{b\}$:

Частичное решение: $X - \{b\}$, $Y - \{a, b\}$, $W - \{b\}$.

Остаток D-системы:

$$\begin{array}{cc} Z & W \\ \{a, b\} & \{b\} \\ 2 \left[\begin{array}{cc} \{a\} & \emptyset \\ 3 \left[\begin{array}{cc} \emptyset & * \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array}.$$

Откуда несложно заключить, что для Z домен сузится до $\{a\}$.

Окончательное решение: $X - \{b\}$, $Y - \{a, b\}$, $Z - \{a\}$, $W - \{b\}$.

Таким образом, в результате применения подстановки, моделируемой кортежем $B[XYZW] = [\{b\} * \{a, b\} *]$, получаем, что значение целевого данного (атрибут W) – “ b ” (снабжение электроэнергией утрачено частично).

Однако, после нахождения значения целевого данного процедура поиска не заканчивается, а еще уточняется значение “ a ” данного Z (канализация энергии не нарушена). При этом не только устанавливается значение целевого данного W , но и конкретизируется значение Z . Домены этих параметров существенно сузились: X, Z, W стали полностью определенными, лишь значение Y осталось полностью неопределенным. Следовательно, в базе фактов для Y будут одновременно присутствовать два различных значения.

Обратный вывод

Напомним приведенную в работе [9] схему вывода абдуктивных заключений.

Пусть A_1, \dots, A_n – посылки, выраженные в виде C или D -систем, из которых предположительно должно следовать утверждение B . При этом оказывается, что соотношение $A \subseteq_G B$, где $A = A_1 \cap_G \dots \cap_G A_n$, не подтверждается. Тогда формула H будет *абдуктивным заключением*, если соблюдаются два условия:

- 1) H корректна ($A \cap_G H \neq \emptyset$);
- 2) $(H \cap_G A) \subseteq_G B$ (т.е. при добавлении H в систему посылок предполагаемое следствие B становится выводимым).

Схема вывода абдуктивного заключения:

1. Вычислить «остаток» $R = A \setminus_G B$;
2. Построить промежуточный объект R_i такой, чтобы соблюдалось $R \subseteq_G R_i$;
3. Вычислить $H_i = \overline{R_i}$ (тогда R_i далее можно обозначить как $\overline{H_i}$);
4. Вычислить $H_i \cap_G A$ и принять или отвергнуть гипотезу по правилам, описанным в начале данного раздела.

Далее в качестве посылок будем рассматривать правила системы продукций, представленные в виде D -системы. В роли гипотезы выберем начальное состояние базы фактов – $C_{init}[X_1, \dots, X_n]$, где C_{init} – C -система, состоящая из одной строки, а X_1, \dots, X_n – перечень листовых данных. В качестве заключения будем рассматривать результирующее состояние базы фактов – $C_{res}[X_1, \dots, X_n, Y_1, \dots, Y_m]$, где Y_1, \dots, Y_m – целевые параметры. Тогда поиск абдуктивного заключения соответствует обратному выводу в системе продукций с недоопределенными параметрами.

Пример 2. Рассмотрим систему продукций, состоящую из единственного правила R_k : Если параметр X принимает значение a или b , а параметр Y – значение f , то система переходит в состояние h .

Пусть известны множества всех значений атрибутов $X = \{a, b, c\}$, $Y = \{d, e, f\}$ и состояний системы $Z = \{g, h\}$. Тогда заданное правило можно выразить в виде D -системы:

$$R_k[XYZ] =]\{c\} \{d, e\} \{h}\{.$$

Действительно, правило R_k на языке логики может быть представлено следующим образом:

$$(x = a, b) \wedge (y = f) \rightarrow (z = h)$$

или $\neg((x = a, b) \wedge (y = f)) \vee (z = h)$

или $\neg(x = a, b) \vee \neg(y = f) \vee (z = h)$

или $(x = c) \vee (y = d, e) \vee (z = h)$.

Последнее выражение соответствует представленной ранее D -системе $R_k[XYZ]$.

Пусть известно, что база фактов после применения правил должна содержать факт, что $z = h$ ($C_{res}[XYZ] = [* * \{h\}]$). Требуется установить, какие факты изначально содержались в базе фактов ($C_{init}[XY]$).

Решение этой задачи опирается на следующее соотношение:

$$R_k[XYZ] \cap_G C_{init}[XY] \subseteq_G C_{res}[XYZ].$$

Выполним вычисления, согласно описанному выше алгоритму:

$$1. R_k[XYZ] \cap_G \overline{C_{res}[XYZ]}:$$

$$\begin{bmatrix} \{c\} & * & * \\ \{a,b\} & \{d,e\} & * \\ * & * & \{h\} \end{bmatrix} \cap_G [* * \{g\}] = \begin{bmatrix} \{c\} & * & \{g\} \\ \{a,b\} & \{d,e\} & \{g\} \end{bmatrix}.$$

$$2. \text{ Нас интересует проекция на атрибуты } XY: \begin{bmatrix} \{c\} & * \\ \{a,b\} & \{d,e\} \end{bmatrix} =]\{c\} \{d,e}\{.$$

$$3. \text{ Тогда } H_i[XY] = \overline{]} \{c\} \{d,e}\{ =]\{a,b\} \{f}\{.$$

$$4. \text{ Убеждаемся, что } R_k[XYZ] \cap_G H_i[XY] \neq \emptyset.$$

Заключение $H_i[XY]$ содержит два ответа на поставленный вопрос:

1) $x = a, y = f$ или 2) $x = b, y = f$.

Заключение

В статье исследована возможность описания факторов неопределенности (НЕ-факторов) на основе матричного представления конечных предикатов без использования вероятностного или нечеткого подходов и т.п. Разработан метод, обеспечивающий без нарушения законов классической логики решение задачи уточнения значений недоопределенных параметров в системах продукций. В отличие от механизма вывода в традиционных системах продукций с полностью определенными данными, в предлагаемом методе в базу фактов могут добавляться сразу несколько значений одного и того же данного, причем это трактуется не как противоречие, а как неопределенность. Метод позволяет выявлять некорректности (прежде всего, пустоту домена некоторого параметра) в процессе логического вывода путем пошагового усечения диапазонов возможных значений параметров. Обратный вывод предлагается сводить к поиску абдуктивных заключений.

Литература

1. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход. 2-е изд. / С. Рассел, П. Норвиг // пер. с англ.; ред. К.А. Птицына. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. -1408 с.
2. Щербина, О.А. Удовлетворение ограничений и программирование в ограничениях / О.А. Щербина // Интеллектуальные системы. - 2011. –Т.15, вып. 1-4. - С.54-73.
3. Осипов, Г.С. Методы искусственного интеллекта / Г.С. Осипов. – М.: Физматлит, 2011. – 296 с.

4. Зуенко, А.А. Вывод на ограничениях с применением матричного представления конечных предикатов / А.А. Зуенко // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2014. – №3. – С.21-31.
5. Зуенко, А.А. Распространение ограничений и эвристический поиск с применением матричного представления конечных предикатов / А.А. Зуенко // КИИ- 2014, г. Казань, 24 - 27 сентября 2014 г.: труды Четырнадцатой национальной конф. по искусственному интеллекту с международным участием. – Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014. -Т.1. –С.32-40.
6. Зуенко, А.А. Обработка специальных видов ограничений при решении задач удовлетворения ограничений в структурах алгебры кортежей / А.А. Зуенко // КИИ- 2014, г. Казань, 24 - 27 сентября 2014 г.: труды Четырнадцатой национальной конф. по искусственному интеллекту с международным участием. – Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014. -Т.1. –С.41-49.
7. Зуенко, А.А. Матрицеподобные вычисления в задачах удовлетворения ограничений / А.А. Зуенко // Шестая Всероссийская мультikonференция по проблемам управления, г. Ростов на Дону, 30 сентября – 5 октября 2013 г.: материалы мультikonференции: в 4 т., Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2013. -Т.1. – С.30-34.
8. Нариньяни, А.С. Недоопределенное календарное планирование: новые возможности / А.С. Нариньяни, Д.А. Иванов, С.В. Седреев, С.А. Фролов // Информационные технологии. - 1997. -№ 1. – С. 34-37.
9. Кулик, Б.А. Алгебраический подход к интеллектуальной обработке данных и знаний / Б.А. Кулик, А.А. Зуенко, А.Я. Фридман. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. - 235 с.
10. Arkadij Zakrevskij. Integrated Model of Inductive-Deductive Inference Based on Finite Predicates and Implicative Regularities. In: “Diagnostic Test Approaches to Machine Learning and Commonsense Reasoning Systems”, IGI Global, 2013. – P.1-12.
11. Лорьер, Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта / Ж.-Л Лорьер // пер. с франц. – М.: Мир, 1991. -568 с.
12. Индейцев, А.И. Система интеллектуальной поддержки борьбы за живучесть надводного корабля / А.И. Индейцев, А.Г. Сергеев // Методы и средства информационной поддержки борьбы за живучесть надводных кораблей. -СПб.: ИПМаш РАН, 1995. – С.15-35.

Сведения об авторе

Зуенко Александр Анатольевич - к.т.н., старший научный сотрудник,
 e-mail: zuenko@iimm.ru
Alexander A. Zouenko - Ph.D. (Tech. Sci.), senior researcher

УДК 004.45, 004.5

А.В. Вицентий

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ КОГНИТИВНОЙ ГЕОВИЗУАЛИЗАЦИИ

Аннотация

В работе рассматривается проблема динамической когнитивной геовизуализации пространственно-организованных биосоциально-экономических систем. Показаны некоторые направления работ по данной тематике. Кратко описаны основы создания и основные элементы технологии динамической когнитивной геовизуализации.

Ключевые слова:

геовизуализация, информационная поддержка принятия решений, дистанционное зондирование Земли.

A.V. Vicentiy

THE DYNAMIC COGNITIVE GEOVISUALIZATION TECHNOLOGY DEVELOPMENT

Abstract

The paper considers the problem of dynamic cognitive geovisualization of spatially organized bio-socio-economic systems. Some lines of work in this subject are showed. Briefly describe the basics of the technology and the basic elements of dynamic cognitive geovisualization.

Keywords:

geovisualization, information decision support, Earth remote sensing.

Введение

В связи с бурным развитием вычислительной техники и соответствующего программно-алгоритмического обеспечения, произошло накопление огромных объемов разнородных данных. Это привело к тому, что в последние десятилетия особенно актуальной стала проблема оперативного анализа больших объемов разнородной информации. Эта проблема относится и к пространственной информации, рост объемов которой обусловлен взрывным развитием как в области их получения (новые методы картирования, аэрофотосъемка, дистанционное зондирование Земли из космоса и т.д.), так и в области обработки (развитие проблемно-ориентированных географических информационных систем (ГИС) и ГИС общего назначения, специализированное программное обеспечение (ПО) обработки аэро- и космоснимков, специализированное ПО для научных и инженерных задач и т.п.) в последние десять лет.

Организация обработки пространственной информации особенно важна при решении задач управления территориально-распределенными объектами и системами. В этой области часто даже самые современные информационные технологии не способны соперничать с человеческим мозгом. Для анализа информации о пространственных объектах управления и принятия решений привлекаются специалисты и эксперты из различных предметных областей. Эти

специалисты чаще всего имеют существенно разные когнитивные и ментальные стереотипы, определяющие способы восприятия и оперирования пространственной информацией. Осознание этого факта приводит к постановке проблемы эффективного представления данных, накопленных в информационной системе человеку. Передача данных осуществляется посредством компьютерных интерфейсов, разработка которых представляет собой отдельную сложную мультидисциплинарную задачу. По этому вопросу можно отметить, что проблема разработки эффективных интерфейсов человек-компьютер возникла с появлением первых вычислительных машин и не потеряла своей актуальности на сегодняшний день. Можно предполагать, что окончательно эта проблема не будет решена до тех пор, пока развитие компьютерной техники не остановится и принципы восприятия информации человеком не будут досконально изучены, да и тогда нахождение одновременно универсального и эффективного решения данной проблемы маловероятно.

О некоторых направлениях геовизуализации

Для решения проблемы эффективного представления данных необходимы специализированные технологии, обеспечивающие автоматизированную визуализацию данных, адаптированную к особенностям восприятия человека и способствующую, тем самым, более быстрому и адекватному принятию решений. Количество исследований в этом направлении начало расти с начала двухтысячных годов. Можно отдельно выделить работу «Research Challenges in Geovisualization» в которой Alan M. MacEachren и Menno-Jan Kraak, наряду с другими, обозначили проблему повышения когнитивности геоинформации как одну из важнейших. Под влиянием этой и подобных работ сформировались два основных направления:

- 1) исследование и создание новых методов отображения пространственной информации;
- 2) исследование особенностей восприятия пространственной информации конечным пользователем.

На данный момент исследования особенностей восприятия информации существенно продвинулись. За рубежом даже сформировалась отдельная междисциплинарная наука - когнитивная география. Один из наиболее авторитетных авторов в этой области – Daniel R. Montello - определяет когнитивную географию как науку, которая изучает восприятие человеком пространства, местоположения и окружения. В своей статье «A Conceptual Model of the Cognitive Processing of Environmental Distance Information» он делает попытку описать модель процесса восприятия пространства человеком при различных обстоятельствах. Таким образом, можно сказать, что на сегодняшний день накоплен значительный теоретический материал об особенностях восприятия человеком геоинформации. Этот материал может послужить основой для создания методического обеспечения технологии автоматизированной когнитивной геовизуализации.

В целом, тема когнитивной визуализации пространственных данных является относительно новой и динамично развивающейся. Исследования носят междисциплинарный характер, а основные результаты лежат в областях разработки интеллектуальных систем визуализации для ГИС, геоинформатики,

визуальном анализе данных и др. При этом, довольно трудно найти работы по динамической когнитивной геовизуализации, где бы такой способ построения геоизображений (картографирования) рассматривался с системной точки зрения.

Само понятие когнитивной геовизуализации также относительно молодо. Более или менее близким аналогом к нему является понятие когнитивного картографирования, которое давно вошло в обиход и с успехом используется при решении различных научных и производственных задач. Работами по когнитивному картографированию занимаются такие ученые и специалисты, как Т.Н. Тимофеева, А.И. Каяшев, S.P. Vajjhala, W.M. Walker, Z.Q. Liu и др. Однако, эти работы в большинстве своем связаны с разработкой приложений теории когнитивного картографирования для решения конкретных задач.

Основы создания технологии динамической когнитивной геовизуализации

Целью нашей работы является развитие методов когнитивной визуализации пространственных данных. Для этого предлагается разработать набор специализированных моделей, методик и алгоритмов предварительной обработки пространственных данных для их визуализации. Результатом такой визуализации будет являться синтезированное геоизображение, построенное с учетом когнитивных особенностей восприятия визуальной информации конкретного пользователя. Синтез осуществляется в результате совместного анализа формальных моделей запроса пользователя, визуальных картографических стереотипов и когнитивных «настроек и предпочтений» пользователя.

В качестве формы реализации моделей предполагается использовать онтологии. Также для уменьшения когнитивной нагрузки на пользователя предлагается проводить семантическое редуцирование результатов геовизуализации на основе специализированных алгоритмов обработки геоданных. Построенное таким образом геоизображение должно более адекватно отражать изучаемые объекты реального мира и лучше соответствовать задачам исследования данных и принятия решений.

Особенностью предлагаемой технологии динамической когнитивной геовизуализации является возможность оперативно перестраивать синтезированное геоизображение и формировать альтернативные представления пространственных данных. Критерием выбора для перестроения может быть, например, класс решаемых задач или тип пользователя.

Таким образом, работа направлена на создание общих методических основ создания высокоэффективных систем когнитивной визуализации геоданных, основанных на знаниях. Основной идеей является совместная формализация и использование на общей понятийной и методической базе знаний предметной области, когнитивных моделей пользователей и модели визуализации пространственных данных. Подобное комплексное рассмотрение проблем организации эффективной визуализации данных, опирающегося на достижения современной когнитивной и компьютерной наук, с нашей точки зрения, является новым, перспективным и в целом соответствует мировому уровню разработок в данной области.

Описание основных элементов технологии динамической когнитивной геовизуализации

Отображение пространственных данных в первых географических информационных системах, строилось по хорошо известным правилам, основанным на опыте отображения информации на бумажных картах. Однако в настоящее время все больше и больше пространственной информации представлено в цифровой форме и нам приходится сталкиваться с новыми проблемами, обусловленными поисками лучших решений для построения геовизуализаций. Визуализация геопро пространственной информации становится ключевым вопросом, объединяющим, с одной стороны, богатейшие архивы накопленной высокоуровневой пространственной информации, а с другой, пользователей этой информации, нуждающихся в ней для организации поддержки принятия решений, управления и иной деятельности.

Операторы, обычные пользователи и лица, принимающие решения, используя ГИС в своей работе, манипулируют большими объемами сложно-организованной пространственной информации. И те способы, которыми визуализируется геопро пространственная информация, оказывают значительное влияние на ее восприятие.

В последние годы появляются новые технологические разработки, методы и платформы, которые позволяют реализовать инновационную визуализацию геопро пространственной информации. Знания, накопленные в таких областях, как визуализация информации, научная визуализация, взаимодействие человека с компьютером, картография и других, интегрируются для того, чтобы выработать новые стратегии геовизуализации.

Многие аспекты визуального отображения больших объемов данных, например, в ГИС, системах виртуальной реальности, системах инженерной и научной визуализации, могут быть значительно улучшены при условии большего внимания к результатам исследований в когнитивной науке (когнитивистика, семиотика, психология восприятия и др.) В связи с этим необходимо разрабатывать адаптивные методы когнитивной геовизуализации больших объемов сложноорганизованных пространственных данных. Для этого нужно предложить новые модели описаний картографических стереотипов и интерпретации запросов пользователей в системе геовизуализации, разработать методики и алгоритмическое обеспечение процессов семантического редуцирования результатов геовизуализации, а также синтезировать методики и технологии адаптации, полученных геоизображений для эффективного визуального восприятия на основе формально представленных знаний о когнитивных особенностях восприятия пользователей. Учитывая высокую актуальность и малую степень разработанности вопросов визуализации пространственных данных с учетом когнитивных аспектов восприятия в области взаимодействия человека и компьютера, результаты работ в этом направлении могут внести значительный вклад в развитие систем визуализации и геоинформационных систем, и могут способствовать решению задач, связанных с компьютерной поддержкой научных исследований и геоинформатикой, в той их части, где методы визуализации окажутся наиболее востребованы.

Реализация технологии динамической когнитивной геовизуализации включает в себя разработку методов и технологий интерактивной визуализации

пространственных данных с учетом когнитивных и перцептивных особенностей и стереотипов восприятия визуальной информации конечным пользователем системы. Обобщенно основные этапы технологии можно сформулировать следующим образом:

1. Разработка формальной модели запроса пользователя и описаний визуальных картографических стереотипов в системе геовизуализации для автоматизации построения адекватного задаче геоизображения;

2. Разработка алгоритмов семантического редуцирования результата геовизуализации для уменьшения объема отображаемой информации;

3. Создание методики и технологии адаптации полученного геоизображения для визуального восприятия на основе формально представленных знаний о когнитивных настройках пользователя

Для разработки моделей запроса пользователей и описаний визуальных стереотипов в системе геовизуализации используются подходы концептуального моделирования и инженерии знаний. Для обеспечения эффективного семантического редуцирования синтезированных геоизображений применяется метод оценки качества когнитивной геовизуализации. В основу данного метода положены расчет и оценка двух формальных критериев:

- 1) критерий информативности геоизображения;
- 2) критерий когнитивной загрузки геовизуализации.

Критерий информативности позволяет оценить формальные потери информации геоизображения как набора графических примитивов. Этот критерий используется на первом этапе редуцирования. Его значение показывает, какое количество графической информации может быть удалено из геоизображения без ущерба для его дальнейшего анализа. Критерий может быть применен как к изображению в целом, так и к его отдельным фрагментам, что актуально в условиях частого масштабирования геоизображений. Критерий когнитивной загрузки изображения позволяет оценить качество геовизуализации с учетом особенностей пользовательского представления. Оценка этого критерия дает представление о том, насколько удачно была произведена визуализация набора графических примитивов с точки зрения пользователя.

Для обеспечения адаптации геоизображений к когнитивным особенностям пользователей необходимо использовать методики и алгоритмы формального представления знаний об особенностях восприятия визуальной информации различными пользователями. Для этих целей можно использовать методы разработки онтологий. Важным аспектом новизны здесь являются способы выявления особенностей восприятия визуальных стереотипов и их формализации в виде концептов онтологии пользовательского представления.

Заключение

На данный момент в процессе разработки технологии динамической когнитивной геовизуализации нами были проработаны некоторые вопросы в области интеграции разнородных информационных ресурсов на основе их семантического описания [1, 2], что требуется для построения геоизображений в ГИС. Также были проведены работы в области изучения основных особенностей восприятия визуальной информации [3, 4] и сложившейся в настоящее время практики разработки интерфейсов [5-7]. Кроме того, были опробованы

современные технологии построения веб-геосервисов [8-11] и отработаны основные приемы работы с данными дистанционного зондирования Земли [12-16].

В перспективе остаются вопросы разработки методологического обеспечения технологии извлечения знаний о когнитивных особенностях восприятия на основе мониторинга деятельности пользователя и алгоритмов автоматизированного синтеза когнитивного геоизображения (геовизуализации). Прикладные результаты могут быть связаны с уточнением методики оценки качества когнитивной геовизуализации, для автоматизации процесса оценки, а также разработка технологии синтеза инструментов для визуального анализа атрибутированных данных геоизображений полученных в системе динамической когнитивной геовизуализации.

Литература

1. Вицентий, А.В. Разработка подхода к интеграции разнородных информационных ресурсов на основе семантического описания /А.В. Вицентий // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2014. - № 1 (38). – С.11-17.
2. Вицентий, А.В. Разработка механизмов виртуальной интеграции разнородных информационных ресурсов в системах информационно-аналитической поддержки управления территориями /А.В. Вицентий // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. – Вып.5. -5/2014(24). -Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2013 – С.121–127.
3. Вицентий, А.В. К вопросу о когнитивном картографировании / А.В. Вицентий, М.Г. Шишаев, Т.А. Порядин // Теоретические и прикладные вопросы науки и образования: сб. науч. тр. Международной научно-практ. конф., г. Тамбов, 31 января 2015 г. – Ч.12. – С.45-46.
4. Вицентий, А.В. Визуализация в научных и инженерных исследованиях / А.В. Вицентий, М.Г. Шишаев // Научный альманах. - 2015. - № 4(6). - С.192-196.
5. Вицентий, А.В. Компьютерная визуализация в построении интерфейсов / А.В. Вицентий, М.Г. Шишаев // Наука и технологии в современном обществе: материалы II Международной научно-практ. конф., г.Уфа, 30 – 31 марта 2015 г. - РИО ИЦИПТ – С.89-91.
6. Вицентий, А.В. Построение интерфейсов мультипредметных информационных систем / А.В. Вицентий, Т.А. Порядин // Современное общество, образование и наука: сб. науч. тр. Международной научно-практ. конф., г. Тамбов, 31 марта 2015 г. - С.34-36.
7. Вицентий, А.В. К вопросу о разработке когнитивных интерфейсов для систем информационной поддержки управления развитием пространственно-распределенных систем / А.В. Вицентий, М.Г. Шишаев // Научный альманах. - 2015. – № 5(7). - С.123-127.
8. Вицентий, А.В. Пользовательский интерфейс геоинформационных систем / А.В. Вицентий, М.Г. Шишаев, Т.А. Порядин // XVIII Межрегиональная научно-практ. конф.: тезисы докладов, г. Апатиты, 15 – 17 апреля 2015 г. - Ч.1. -С.22-23.

9. Вицентий, А.В. Когнитивное картографирование для информационной поддержки управления развитием пространственно-организованных систем / А.В. Вицентий, М.Г. Шишаев, Т.А. Порядин // Теория и практика системной динамики: материалы докл. VI Всероссийской научной конф., г. Апатиты, 30 марта - 3 апреля 2015 г. - Апатиты: КНЦ РАН, 2015. - С.28-30.
10. Вицентий, А.В. Разработка многопользовательского web-сервиса информационной поддержки радиологического мониторинга / А.В. Вицентий // Теория и практика системного анализа: тр. III Всероссийской научн. конф. молодых ученых с международным участием, г. Рыбинск, 21 - 24 марта 2015г. – Т.1. – С.118-124.
11. Вицентий, А.В. Разработка технической платформы средств динамического картографирования и визуального анализа на примере системы информационной поддержки мониторинга радиологической обстановки / А.В. Вицентий // Фундаментальные проблемы системной безопасности: материалы V Международной научн. конф., посвященной 90-летию со дня рождения выдающегося ученого, генерального конструктора ракетно-космических систем акад. В.Ф. Уткина, г. Елец, 13 - 14 мая 2014 г. – С.324-329.
12. Вицентий, А.В. Возможности радиологического мониторинга по данным дистанционного зондирования Земли из космоса / А.В. Вицентий, Т.А. Порядин // IV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященная 85-летию БГИТА, г. Брянск, 3 - 5 июня 2015 г. – С.8-10.
13. Вицентий, А.В. Разработка средств визуального анализа для специалиста радиологического мониторинга на основе данных дистанционного зондирования Земли / А.В. Вицентий, М.Г. Шишаев // Прикладные проблемы управления макросистемами: материалы докл. X Всероссийской конф., г. Апатиты, 31 марта-5 апреля 2014 г. - Апатиты: КНЦ РАН, 2015. – С.8-9.
14. Вицентий, А.В. Разработка системы информационной поддержки мониторинга радиологической обстановки с использованием данных ДЗЗ (на примере Мурманской области) / А.В. Вицентий, Т.А. Порядин, М.Г. Шишаев // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы Международной науч. конф., г. Красноярск, 23 - 26 сентября 2014 г. –С.262-266.
15. Вицентий, А.В. Использование спутниковых данных в системе информационной поддержки мониторинга радиологической обстановки / А.В. Вицентий, Т.А. Порядин, М.Г. Шишаев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: тез. докл. Двенадцатой Всероссийской открытой конф., г. Москва, 10 - 14 ноября 2014 г. - CD-диск.
16. Вицентий, А.В. Применение дистанционного зондирования Земли и космических технологий для развития арктических и субарктических территорий Российской Федерации / А.В. Вицентий // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. -Вып.4. - 5/2013(18). -Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2013 - С.40-45.

Сведения об авторе

Вицентий Александр Владимирович - к.т.н., научный сотрудник, доцент,
e-mail: alx_2003@mail.ru
Alexander V. Vicentiy - Ph.D. (Tech. Sci.), researcher, docent

УДК 004.9

С.Ю. Яковлев, А.С. Шемякин

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

ПЛАНИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЙ ПО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ И ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ*

Аннотация

Рассмотрено информационное обеспечение планов действий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Описаны нормативно-методическая база и основные разделы документа, даны примеры разработки.

Ключевые слова:

информационное обеспечение, планирование действий, природно-техногенные чрезвычайные ситуации.

S.Yu. Yakovlev, A.S. Shemyakin

PLANNING OF ACTION FOR EMERGENCIES PREVENTION AND LIQUIDATION

Abstract

The information support of action plans for natural-industrial emergencies prevention and liquidation has been considered. The normative-methodical base and main parts of the document have been described, the examples of working out have been done.

Keywords:

information support, planning of action, natural-industrial emergencies.

Введение

План действий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (далее – ПДЧС) – один из важных документов в системе обеспечения безопасности потенциально опасных промышленных объектов и комплексов, а также муниципальных (социальных) объектов и образований. В работе [1] выполнен анализ системы планирующих документов, в том числе значительное внимание уделено и ПДЧС. Выказано мнение о целесообразности придания ПДЧС статуса основного документа по вопросам предупреждения чрезвычайных ситуаций (ЧС) в организациях. Отмечены недостаточность нормативной правовой базы по разработке ПДЧС, а также факты полного или частичного дублирования информации ПДЧС в других обязательных для организаций планирующих документах. В настоящее время можно констатировать, что улучшения состояния дел в сфере нормативно-методического обеспечения предупреждения ЧС не произошло. Поэтому представляет интерес обмен опытом разработки планирующих документов, в частности, ПДЧС.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-07-02757).

1. Нормативно-методическая база, структура ПДЧС

Основаниями для разработки ПДЧС являются нормативные акты [2-4].

Кроме этих документов, выпущены ведомственные и территориальные положения, например, [5-8]. Типовая структура ПДЧС описана в [1], а также приведена в [5]. На рис. 1 отражены наиболее «научеёмкие» разделы ПДЧС, посвящённые анализу опасностей и рисков.

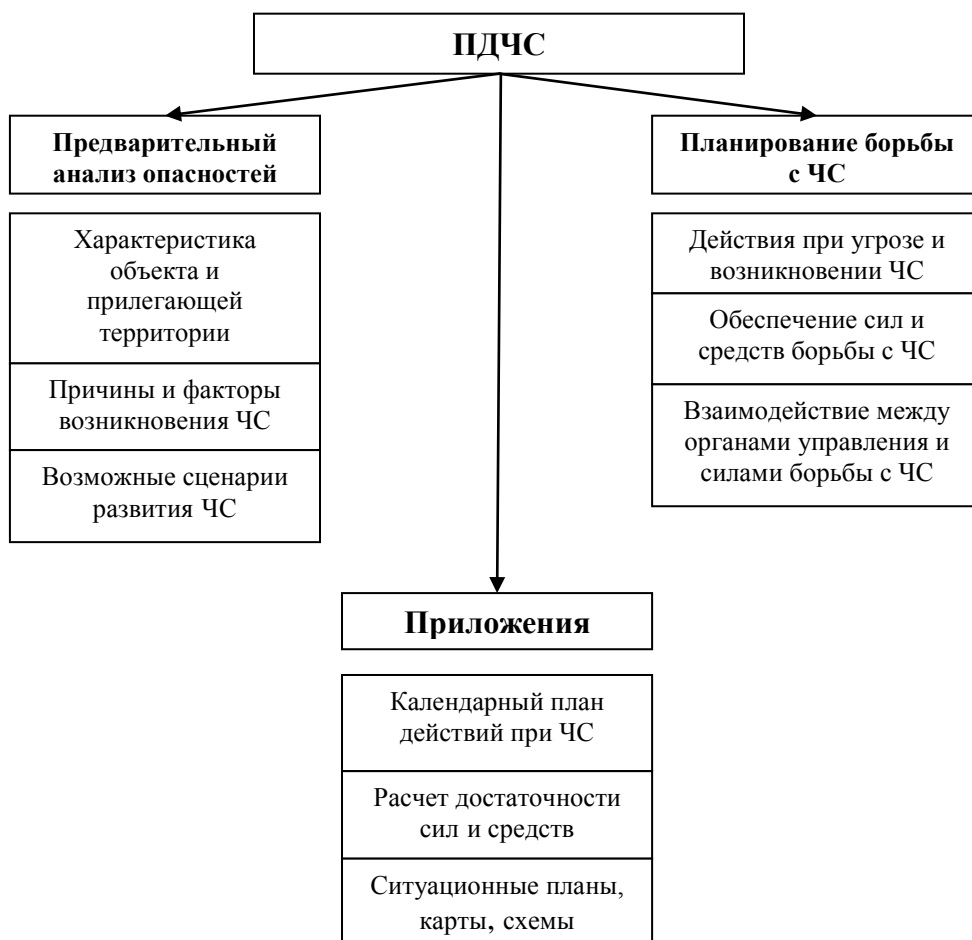


Рис. 1. Анализ опасностей и рисков в ПДЧС

Предварительный анализ опасностей производится на основе изучения особенностей функционирования и расположения исследуемого объекта, при этом (если объект не является уникальным) собираются данные об авариях с аналогичным оборудованием.

Раскрывается структура объекта, описываются опасные технологические процессы, приводится статистика аварий и инцидентов за последние годы. На прилегающей территории выделяются возможные источники внешних воздействий (техногенные и природные), а также указываются возможные «мишени, приёмники» воздействия опасностей со стороны изучаемого объекта.

При этом особое внимание уделяется социальным и критически важным подразделениям, а для природной среды указываются охраняемые территории, источники водоснабжения, редкие виды и т. п.

Выявляются разнородные причины и факторы, способствующие возникновению и развитию ЧС. Формируется перечень сценариев ЧС, среди которых выявляется наиболее опасный (максимальный ущерб) и наиболее вероятный (максимальная частота или вероятность) сценарии.

Планирование действий органов управления и аварийно-спасательных формирований осуществляется для различных сценариев и стадий развития ЧС.

Объёмные графические, табличные и расчётные материалы выносятся в Приложения к ПДЧС.

2. Примеры и особенности разработки

Приведены примеры, отмечены особенности и проблемы разработки ПДЧС для социального объекта (школа), опасного производственного объекта (котельная со складом нефтепродуктов), промышленно-природного комплекса (совокупность опасных объектов). Краткая характеристика ПДЧС дана в соответствии со структурой рис. 1, особое внимание уделяется анализу возможных ЧС.

Социальный объект (на примере школы-интерната, Мурманская область)

Школа представляет собой двухэтажное здание, построенное в 1959 году. В подвальном помещении находятся кладовые и подсобные помещения, теплоцентр, вентиляционная, caloriferная. На первом этаже расположены пищеблок, подсобные помещения, кабинет директора, учительская, мастерские, кабинеты, классы. На втором этаже расположены спортзал, актовый зал, классы, кабинеты.

Интернат представляет собой трехэтажное здание, построенное в 1989 году. В подвале находятся подсобные помещения. На первом этаже расположены пищеблок, подсобные помещения, раздевалки, мастерские, классные комнаты, электрощитовая, медицинские помещения. На втором этаже расположены спальные комнаты, тренажерный зал, кабинеты, игровые комнаты, бытовые помещения. На третьем этаже находятся компьютерный класс, кабинеты, кладовые.

Здания школы и интерната соединены галереей.

Основным направлением деятельности является образовательный процесс.

Сложные физико-географические и климатические условия в месте расположения социального объекта обуславливают длительный отопительный период с сентября по май. Особенности климата: частая и резкая смена погодных условий, сильные снегопады с образованием снежных заносов на дорогах (со среднесуточной нормой осадков около 40 мм), интенсивный снегоперенос, высокая относительная влажность, туманы, метели, короткое холодное лето, ультрафиолетовая недостаточность, низкие температуры наружного воздуха (нередко до -25° , -30°C), образование гололеда на дорогах, обледенение линий электропередач.

Аварийные ситуации могут возникать и развиваться в результате:

- технических неполадок;
- техногенного (внутреннего или внешнего) или природного воздействия;
- человеческого фактора, т.е. ошибок персонала, а также актов диверсий или терроризма.

Выявлены следующие сценарии возможных ЧС.

Сценарий 1. Пожар в учебном корпусе учреждения.

Сценарий 2. Авария теплового узла.

Сценарий 3. Авария трубопровода для подачи тепла.

Сценарий 4. Авария водопровода.

Сценарий 5. Авария электрощитовой.

Сценарий 6. Авария канализационных трубопроводов.

Сценарий 7. Опасность токсического поражения хлором в результате аварий на расходных складах хлора, принадлежащих горно-металлургическому комбинату, при определённых направлениях ветра.

Дана характеристика обстановки, которая может возникнуть при ЧС, определены поражающие факторы и мероприятия по борьбе с ЧС, с учётом специфики учреждения.

ПДЧС согласован начальником муниципального отдела гражданской обороны и ЧС, утверждён директором школы.

Опасный производственный объект (на примере котельной ЖКХ, Мурманская область)

Основные структурные элементы: котельная, резервуары мазута РВС-2000 (2 шт.), расходные емкости РЕ-100 (3 шт.), насосная станция, мазутопровод, пароспутник.

Основное направление деятельности котельной – производство тепловой энергии для нужд ЖКХ посёлка. Для производства указанного вида энергии используется топочный мазут марки М-100.

По климатическому районированию посёлок относится к Полярно-Арктической зоне.

Сложные физико-географические и климатические условия на территории затрудняют работу объектов экономики, транспорта, общеобразовательных учреждений, зачастую приводят к обрывам линий электропередач, а также усложняют проведение поисково-спасательных операций и аварийно-восстановительных работ, требуют постоянного и оперативного мониторинга окружающей среды и своевременного доведения информации до предприятий и населения.

Возможные ЧС на объекте.

Сценарий 1. Разрушение (полное или частичное) одного резервуара базы хранения мазута и последующее рассеяние газокапельного облака.

Сценарий 2. Разрыв трубопровода во фланцевом соединении с резервуаром и последующее рассеяние газокапельного облака.

Сценарий 3. Разрушение трубопровода или фланцевого соединения с последующим воспламенением.

Сценарий 4. Взрыв в газовом пространстве резервуара, разрушение резервуара, пожар.

Сценарий 5. Разрушение (полное или частичное) одной автоцистерны с последующим воспламенением.

Сценарий 6. Разрушение (полное или частичное) одной автоцистерны и последующее рассеяние газокапельного облака.

Сценарий 7. Взрыв в газовом пространстве котла, разрушение котла, пожар.

Сценарий 8. Выход из строя важных узлов технологического оборудования, воздействие теплового излучения, прекращение подачи теплоснабжения.

Сценарий 3 определен как наиболее вероятный и сценарий 4 – как наиболее опасный, поскольку остальные сценарии имеют меньшую вероятность реализации и/или незначительные последствия.

Ситуационный план для сценария 3 изображен на рис. 2. Расшифровка обозначений на рисунке:

- малый круг (заштрихован) – зона возможного пожара разлития, радиус 2,5 м;
- большой круг – зона возможного теплового воздействия, радиус 17,5 м.

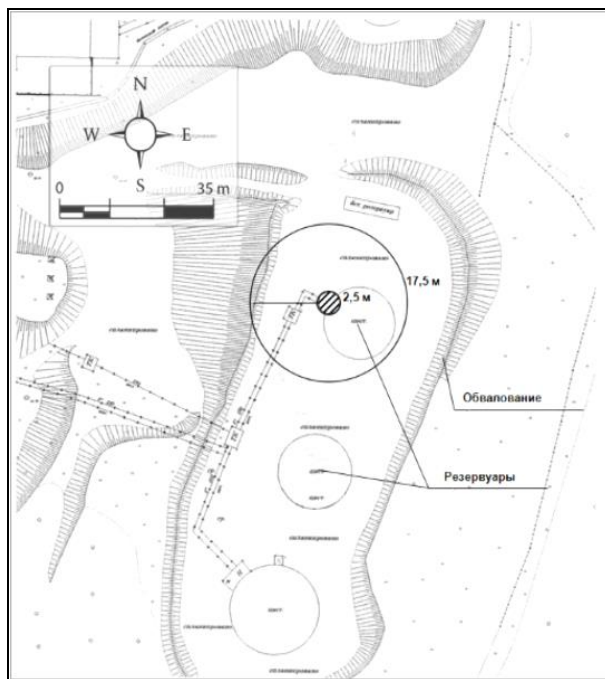


Рис. 2. Наиболее вероятный сценарий

Ситуационный план для сценария 4 изображен на рис. 3. Расшифровка обозначений:

- малый круг (заштрихован) – зона возможного пожара разлития, радиус 202 м;
- большой круг – зона возможного теплового воздействия, радиус 319 м;
- пунктирная линия – граница объекта.

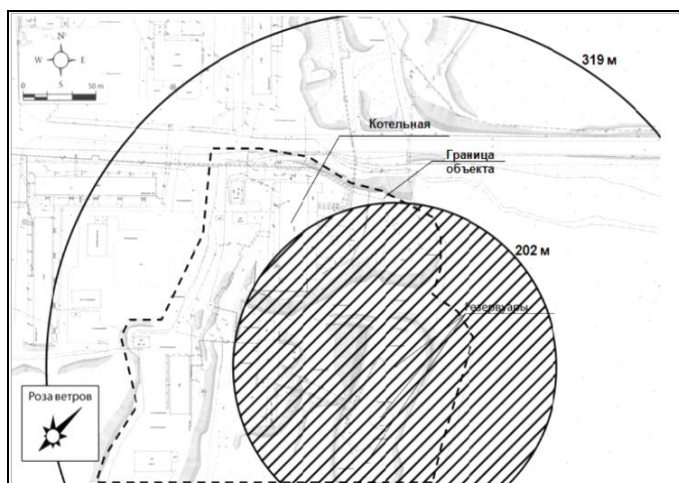


Рис. 3. Наиболее опасный сценарий

Для обоих сценариев разработаны календарные планы мероприятий. В случае возникновения пожара вступают в действие планы тушения пожара.

ПДЧС согласован начальником Главного управления МЧС России по Мурманской области и утверждён директором предприятия.

Промышленно-природный комплекс (на примере горнохимического комплекса, Мурманская область)

В состав комплекса входят разнородные опасные объекты: рудники, обогатительные фабрики, гидротехнические сооружения, пожаровзрывоопасные объекты (нефтебазы, склады нефтепродуктов и взрывчатых материалов), объекты энергоснабжения, транспорта и инфраструктуры.

Инфраструктура предприятия развита на территории более 10 тыс. га, простирающейся с запада на восток на десятки километров. Промплощадка занимает значительную часть горного массива. Географическое положение определяет главные особенности климата – длительную снежную зиму и короткое прохладное лето.

Основными факторами риска на объекте являются воздействия техногенного характера, поскольку производственная деятельность объекта связана с эксплуатацией потенциально опасных объектов и оборотом опасных веществ.

Для каждого подразделения и опасного объекта, входящего в комплекс, требуется составить свой перечень возможных сценариев развития ЧС, выявить наиболее опасный и наиболее вероятный сценарии, разработать перечень мероприятий. В данной статье для примера будет рассмотрен наиболее опасный сценарий развития ЧС на гидротехническом сооружении.

Наиболее опасный сценарий. Отказ ограждающей дамбы на гидротехническом сооружении, входящим в состав горнохимического комплекса. Ситуационный план для этой ЧС приведен на рис. 4.

Возможные последствия:

- возможная гибель эксплуатационного персонала и посторонних людей, застигнутых волной прорыва, в зоне прорыва;

- попадание в зону затопления волной прорыва: участка ж/д (1,5 км), участка автодороги, инженерных коммуникаций, огородов и подсобных строений; территории свалки;
- риск поступления воды отстойного пруда, шламов, хвостов в русло прилегающих рек и озера;
- максимальный объем выброса, соответствующий максимальной емкости пруда - 79 млн.м³, риск смыва и выброса загрязнений со свалки, ущерб биоресурсам, рыбным ресурсам водоемов, с/х угодьям.

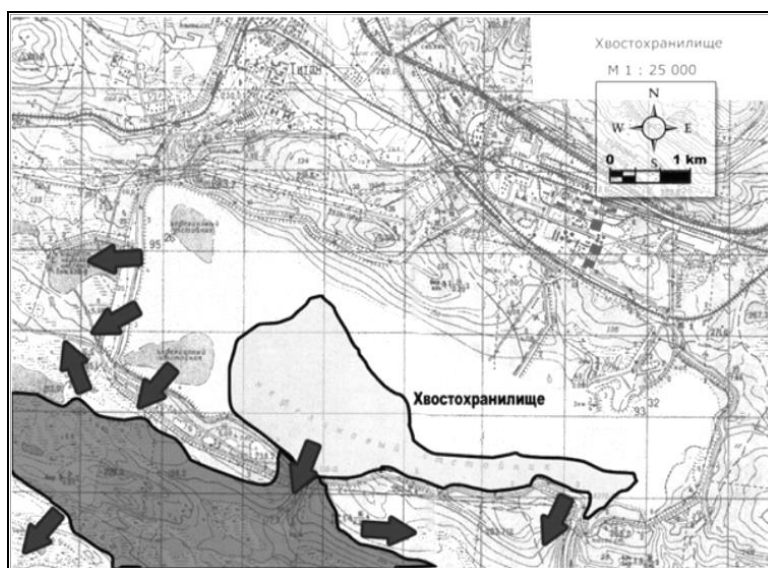


Рис. 4. Отказ ограждающей дамбы (ситуационный план)

Мероприятия по ликвидации аварии в начальной стадии:

- на случай прорыва пульпопровода на гребне дамбы (насыпной или намывной) - меры по отключению аварийной нитки пульпопровода, снижению горизонта воды в отстойном пруду, использованию механизмов и транспортных средств, необходимых для срочной заделки проранов и мест разрушений дамб и др.;
- на случай разрушения водосбросных сооружений - меры по срочному вводу в действие резервных и аварийных водосбросных сооружений (нагорных канав, сифонов и др.);
- на случай прорыва и обрушения дамб - меры по снижению горизонта в отстойном пруду, отводу или аккумуляции грязевого потока во избежание разрушений объектов, находящихся в зоне затопления; использование механизмов и транспортных средств, необходимых для срочной заделки проранов и мест разрушений дамб и др.

Значительные трудности для ПДЧС комплекса представляет разработка Приложения 3 «Решение председателя КЧС объекта по ликвидации чрезвычайных ситуаций на плане предприятия» (КЧС – комиссия по чрезвычайным ситуациям). Макет решения приведен на рис. 5.

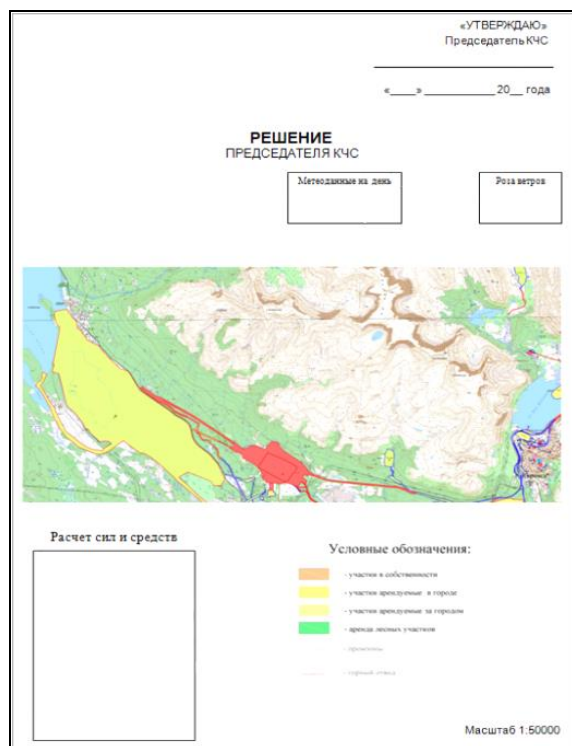


Рис. 5. Макет решения председателя КЧС

ПДЧС согласован начальниками учреждений по гражданской обороне и ЧС муниципальных образований (на территории которых располагаются объекты комплекса), согласован начальником Главного управления МЧС России по Мурманской области и утверждён Генеральным директором горно-химического комплекса.

Заключение

Описаны особенности разработки одного из важных планирующих документов – плана действий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера – для различных организаций. Особое внимание уделено выявлению, оценке и предупреждению потенциальных опасностей и рисков.

Основными опасностями для социального объекта являются ЧС, связанные с работой ЖКХ, террористические воздействия, а также возможные техногенно-природные ситуации на окружающей территории.

Для приведённого примера опасного производственного объекта сценарии возможных аварий связаны с разрушением резервуаров, разлитием и воспламенением горючих веществ. Тяжёлым возможным последствием аварий является прекращение теплоснабжения северного посёлка.

Особенности разработки ПДЧС для промышленно-природного комплекса обусловлены многообразием опасных объектов и подразделений, территориальной протяжённостью, разветвлённой инфраструктурой, важностью систем энергоснабжения, сложной системой управления и взаимодействия.

Отметим ещё раз, в дополнение к [1, 9], необходимость упорядочения и рационализации системы документов, а также целесообразность автоматизации процесса “сборки” и сопровождения планирующей документации [10].

Литература

1. Нормативная правовая база и система планирующих документов в области предупреждения чрезвычайных ситуаций в организациях / З.Е. Баньщикова и др. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – М.: ВИНТИ, 2009. – № 3. – С.3-13.
2. Федеральный закон от 21.12.1994 г. №68 ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».
3. Постановление Правительства РФ от 30.12.2003 г. №794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций».
4. Приказ МЧС РФ от 28.02.2003 г. №105 «Об утверждении Требований по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах и объектах жизнеобеспечения».
5. Методические рекомендации по планированию действий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций, а также мероприятий гражданской обороны для территорий и объектов // Утверждены зам. министра РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий 18 августа 2003г.
6. Инструкция по предупреждению и ликвидации аварий на тепловых электростанциях // Утверждена приказом Минэнерго России от 30.06.2003 г, №265.
7. Постановление Правительства Москвы от 24.02.2009 г. №124 «Об организации планирования действий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций».
8. Планирование мероприятий по гражданской обороне и защите от чрезвычайных ситуаций на объекте: учебное пособие // Курсы гражданской защиты Копейского городского округа / Копейский городской округ. - 2008.- 43с.
9. Яковлев, С.Ю. Оптимизация ведения нормативной документации по опасным производственным объектам /С.Ю. Яковлев, А.А. Рыженко / Прикладные проблемы управления макросистемами // Труды ИСА РАН / под ред. Ю.С. Попкова, В.А. Путилова. - М: КРАСАНД, 2010. - Т.59 – С.197-205.
10. Яковлев, С.Ю., Олейник, Ю.А., Шемякин, А.С. Локальная информационная система нормативно-методического обеспечения исследований /С.Ю. Яковлев, Ю.А. Олейник, А.С. Шемякин // Труды Кольского научного центра. Информационные технологии. - Вып. 5. - 5/2014(24). - Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2014. - С.178-184.

Сведения об авторах

Яковлев Сергей Юрьевич – к.т.н., старший научный сотрудник, доцент,
e-mail: yakovlev@iimm.ru
Sergey Yu. Yakovlev - Ph.D. (Tech. Sci.), senior researcher, associate professor

Шемякин Алексей Сергеевич – научный сотрудник, старший преподаватель,
e-mail: shemyakin@iimm.ru
Alexey S. Shemyakin – researcher, associate professor

УДК 004.942

А.А. Рыженко, Н.Ю. Рыженко, Е.В. Гвоздев

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России (г. Москва)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ СТРУКТУРАМИ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация

Особенностью системы управления предприятий является централизация и четкая иерархия административного сектора. Автономные структуры, обеспечивающие комплексную безопасность должны иметь возможность оперативного влияния. В статье рассматривается вариант реализации матричной модели управления, предоставляющей возможность формирования обоснования при принятии совместных решений.

Ключевые слова:

модель, информационная система, корпоративная система, управление.

A.A. Ryzenko, N.Yu. Ryzenko, E.V. Gvozdev

MODELING ELEMENTS SYSTEM OF SUPPORT MANAGEMENT INDUSTRIAL COMPLEXES AUTONOMOUS STRUCTURES

Abstract

Feature of control system enterprises is centralization and accurate hierarchy administrative sector. Autonomous structures ensuring complex safety have to have possibility of expeditious influence. In article the option realization matrix model of management giving opportunity formation justification at adoption joint decisions is considered.

Keywords:

model, information system, corporate system, management.

Введение

Как правило, крупные территориально-распределенные промышленные предприятия имеют сложно-иерархическую структуру управления. Особенностью является учет автономных и полуавтономных подсистем, относящихся к сфере обеспечения комплексной безопасности в виде дополнительных органов координации управляющих воздействий на структурные подразделения. Данная идеология не позволяет вносить актуальные решения в оперативном режиме в связи со сложностью процесса согласования и утверждения, а также последующей адаптации.

Практика показывает, что попытки внедрения в существующую иерархическую систему управления изменений приводят к непониманию и отторжению готовых решений. Так, например, более эффективные дивизионные или штабные формы управления не получили широкого применения. Более современная система матричного управления, в связи со сложностью этапного внедрения используется организациями частично [1].

В работе предлагается использовать информационные системы корпоративного уровня для внедрения матричной системы управления в существующую иерархическую в пассивном режиме (без вмешательства в

основной производственный цикл), где существующая иерархия представлена вертикальным управлением, а горизонтальным выступают автономные системы обеспечения комплексной безопасности. Точки пересечения (взаимного влияния) обосновываются за счет предварительной оценки и прогнозирования возможных состояний с использованием коэффициентов Пирсона по шкале Чеддока.

Концептуализация принятия решений

При моделировании основных элементов возникла необходимость в сопряжении независимых структур управления в единую систему, где в качестве связующего звена предложено использовать теорию множеств с точки зрения целостности систем и фасетного представления данных [2].

Рассматриваются иерархические и сетевые модели управления H , где каждый элемент атомарно представляет систему управляемых процессов абстрактного объекта. Каждый узел является автономным, с учетом возможных отношений к другим системам, и частью общей системы управления одновременно. При этом модели независимы $[H; \cup; \neq]$. Например, подсистема пожарной безопасности, являясь элементом управления, может рассматриваться автономно с точки зрения определения потребностей в ресурсном обеспечении для реализации комплексов мероприятий обеспечения пожарной безопасности. Данный механизм позволяет проводить независимую экспертизу и оценку состояния объектов для определения уровня обеспечения безопасности профильными специалистами с привлечением персонала производственных подразделений.

Учет данной особенности требует формирование единой системы поддержки управления. Предлагается вариант систематизации, где сложно-иерархическая модель центрального управления объединяется с сетевой моделью автономного управления во множество управляемых процессов неравных по атрибутам объектов управления, являющихся элементами единой фасетной системы организации данных. Механизм позволит частично автоматизировать управляющие воздействия в виде правил информационной системы (рис. 1).

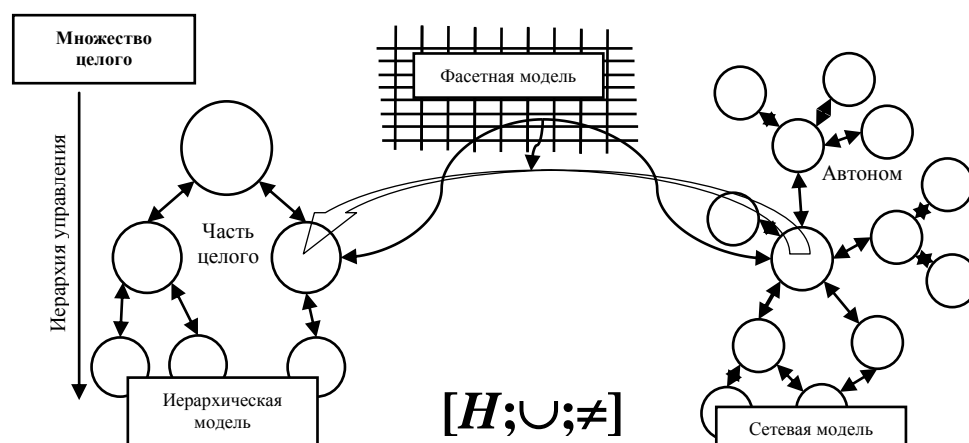


Рис. 1. Комбинирование независимых систем управления в рамках элементов множества целого

Для представленной модификации рассмотрена особенность построения краткосрочных прогнозов состояний удаленных объектов в форме разветвленной сети распределения управляющих сигналов (рис. 2).

Основными формами построения и реализации краткосрочных планов, как правило, выступают целевые задачи. При этом фактическое (прямые зависимости) и целевое (обратные вычисления) прогнозирования предполагают независимое формирование задач управления, что не всегда эффективно в условиях выделения ограниченного ресурса [3].

В случае отсутствия взаимосвязи в решении деревьев появляется высокая степень неопределенности, что в практическом управлении в ограниченных условиях ресурсного обеспечения часто недопустимо. Для формирования точек пересечения между элементами структур использован инструментарий кортежей концептуального моделирования.

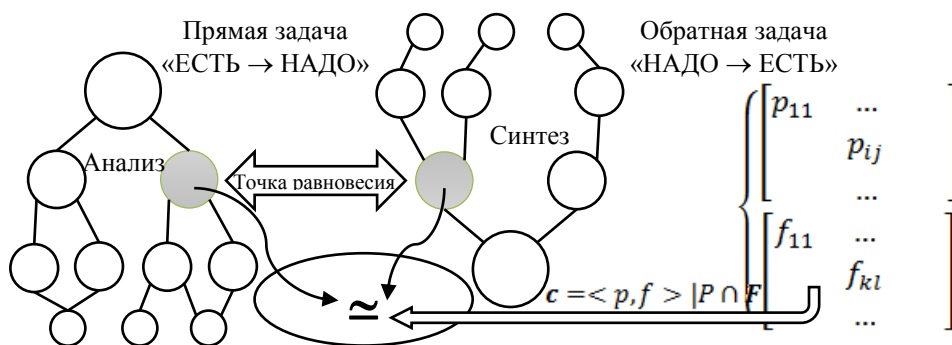


Рис. 2. Сопоставление систем краткосрочного прогнозирования

Установлено, что точки равновесия двух деревьев задаются путем пересечения двух множеств управляемых процессов (воздействий) во временном разрезе за заданный период:

$$c = \langle p; f \rangle | P \cap F, \quad (1)$$

где P – фактическое состояние системы пожарной безопасности;

F – целевое состояние, определяющее стратегию дальнейших действий.

Для объединения кортежей объектов и управляемых процессов использован фасет правил управляющих воздействий, где произведение текущих показателей является невырожденной матрицей перехода состояния:

$$X^{s+1} = \begin{bmatrix} p_{11} & \dots & p_{n1} \\ & p_{ij} & \\ p_{1m} & \dots & p_{nm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_{11} & \dots & f_{k1} \\ & f_{kl} & \\ f_{1l} & \dots & f_{kl} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_d \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Предполагается отличие фасета от классической матрицы в отсутствии принудительных связей между элементами (ячейками), что способствует упрощению организации данных в единой структуре.

Для учета сложности управления удаленными объектами добавлена привязка координат физических объектов, где использован функционал геоинформационных систем (ГИС) (рис. 3).

На уровне элемента фасета сценарий комбинирования представлен как пара элементов двух кортежей, составляющие контент ячейки фасета (параметры абстрактного объекта управления и условия действий управляемого процесса). Для привязки к физическому объекту используется концептуальная модель информационно-управляющей системы, где множествами компонентов выступают ассоциативные правила продукционного типа без вариативной части, определяющие характеристики ГИС (ЕСЛИ условие ТО позиция в фасете).

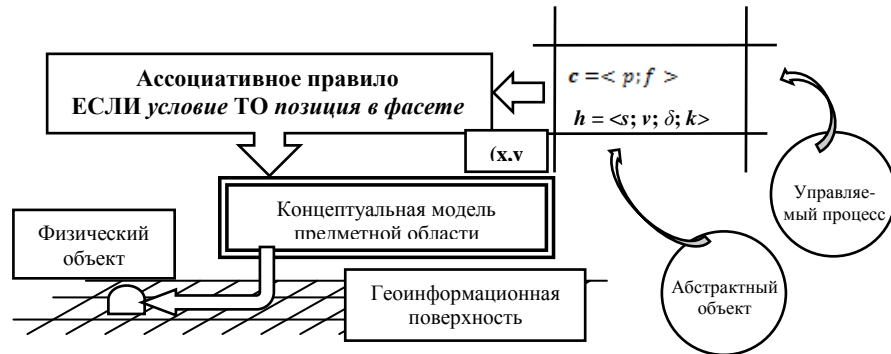


Рис. 3. Синтез элементов системы прогнозирования

Рассмотрим механизм привязки управляющей пары к физическому объекту системы поддержки управления. Каждый ярус (слой) информационно-управляющей системы представляет матрицу с соответствующими элементами управления. В качестве связующего звена используются модифицированные фреймы концептуальной модели, что позволяет получить необходимую информацию по управляемым объектам, а также коэффициенты состояний дальнейших сценариев мероприятий управляемых процессов автономных систем обеспечения комплексной безопасности структурных подразделений (рис. 4) [4].

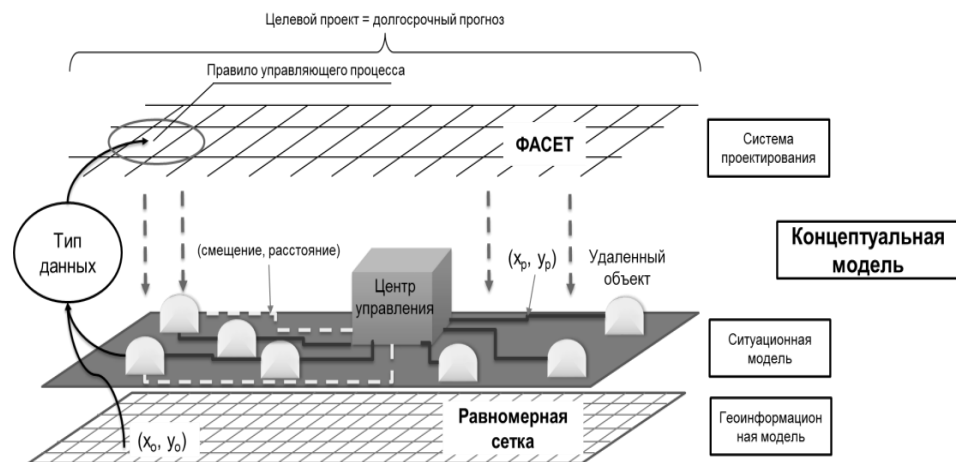


Рис. 4. Привязка управляющего воздействия к физическому объекту

Алгоритм формирования элементов разрабатываемой модели:

- используется ГИС платформа для формирования модели поверхности на основе равномерной сетки и теневой карты высот;
- наносятся управляемые объекты с описанием атрибутов привязки к реальным объектам и их характеристикам;
- накладывается карта маршрутов возможных взаимодействий при управляющем воздействии;
- привязывается фасет управляющего воздействия (верхний слой) для определения связи между абстрактным объектом управления и физическим объектом.

Алгоритмическая особенность построения модели

Анализ решаемых задач управления в сфере обеспечения комплексной безопасности позволил определить классы управляемых объектов. Особенностью классификации является гибкая система распределения ресурсов при организации управляющих сигналов (воздействий). Система предполагает постоянную асинхронную координацию объектов в рамках задач прогнозирования, выполняемых на предварительном этапе. В качестве инструментария используется задача системы документооборота. Асинхронность достигается за счет представления данных в виде фасета. На представленной блок-схеме алгоритма отображена логическая последовательность процессов обработки потоковых данных с разных источников в единый центр управления (рис. 5).

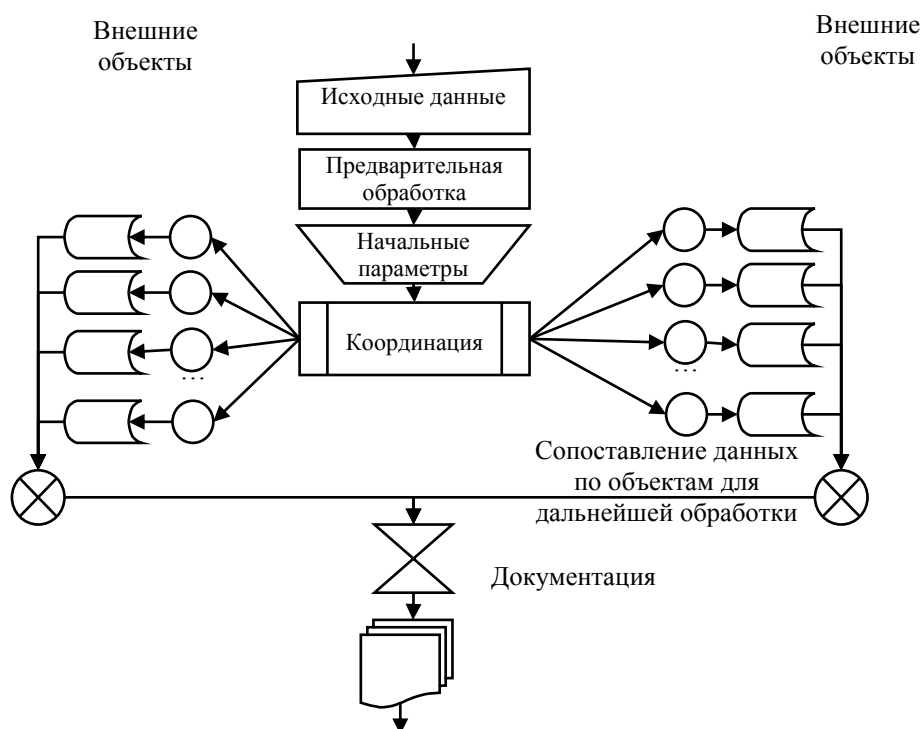


Рис. 5. Логическая последовательность процессов обработки потоковых данных с разных источников в единый центр управления

Предварительный этап анализа исходных данных происходит в полуавтоматическом режиме. Процесс, обеспечивающий координацию, является постоянным, независимо от условий функционирования подчиненных блоков. Итоговые отчеты в виде обратной связи через логический элемент *ИЛИ* сопоставляются с данными по объектам для дальнейшей обработки [5].

Особенностью алгоритма системы планирования мероприятий обеспечения комплексной безопасности, является организация модели краткосрочного прогнозирования на основе инструментария реального времени (как компонента предметно-ориентированной архитектуры данных). Основной процесс жизненного цикла организации определяет «точки равновесия» (ячейки фасета) принятия управленческих решений каждого удаленного объекта. Сценарии списка мероприятий по обеспечению пожарной безопасности объектов имеют свои независимые (автономные) циклы (рис. 7).

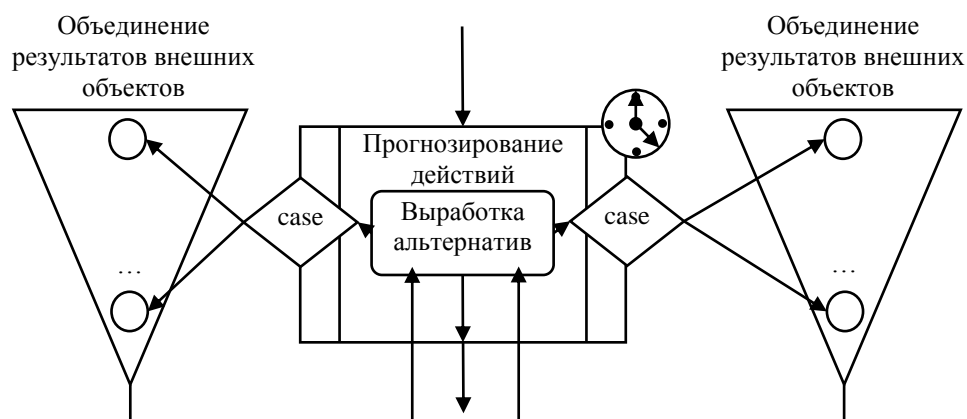


Рис. 7. Организация системы краткосрочного прогнозирования на основе инструментария реального времени

Каждый объект хранит свой план мероприятий. Сводный план хранится на центральном аналитическом сервере. Две системы реального времени синхронизируются ежедневно по расписанию, либо по запросу. Согласование планов происходит автоматически. Лицо, принимающее решение либо утверждает итоговый вариант, либо вносит корректировки в возможные альтернативные варианты. После каждого изменения строится отчет, вносятся изменения в график плана проведения контрольных точек.

Построение плана на следующий период строится в полуавтоматическом режиме. Система на основе статистических показателей предыдущих лет строит сводный вариант на последующий период. Используется процесс формирования бизнес-плана на краткосрочный период. Дерево альтернативных решений формируется с оценочными весовыми коэффициентами.

Учет приведенных алгоритмов модели позволил сформировать информационно-управляющую систему с учетом особенностей координации потоков данных между удаленными объектами с единым центром управления.

Тем не менее, представленная модель требует внесения решения в организации координацией потоками данных. Особенностью организации распределенной информационно-управляющей системы является фактическое

разделение системы предварительной обработки и подготовки данных в форме внешнего ресурса управления и единой системы управления и координации в виде центра поддержки управления, принимающего независимые решения по обеспечению комплексной безопасности на всех объектах организации (рис. 8).

На текущий момент, современный программно-алгоритмический инструментарий позволяет создавать подобные внешние ресурсы в виде облачных *IaaS*-технологий. При этом база правил (для принятия решений) хранится в центре управления, а база (или базы) ассоциаций храниться как на внешних ресурсах, так и непосредственно на самих объектах.

Необходимо также учесть особенности построения алгоритмов при организации потоков данных на уровне логических связей между сервером данных, управляющим звеном и автономными клиентами, являющимися одновременно элементами единой информационно-управляющей системы.

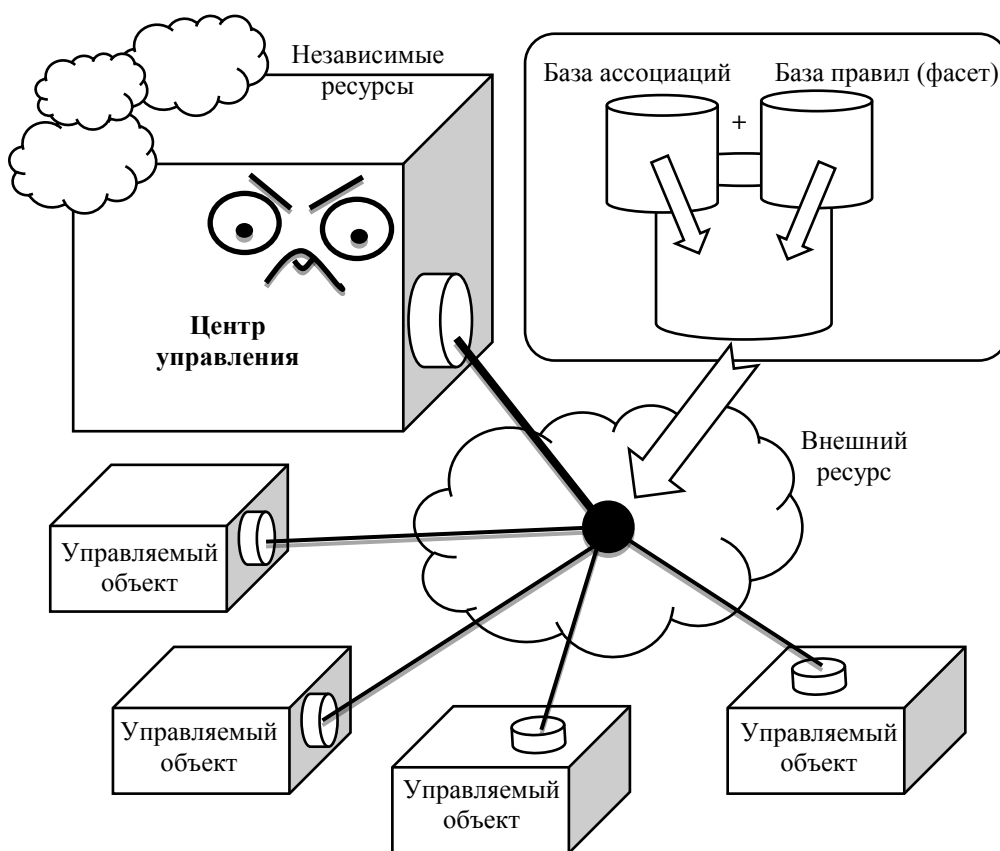


Рис. 8. Особенности организации управления данными

Решение задач обмена информацией с использованием шаблонов и эффекта сериализации для взаимодействия в реальном времени между удаленными объектами с единым центром принятия решений сформировано на основе как локальных систем корпоративного уровня, так и на уровне унифицированных XML-протоколов. Привязка к карте выполнена на основе технологии свободного графического ядра, способного адаптироваться под ограничения

произвольной геоинформационной системы, что обеспечивает гибкость при внедрении разработанной модели к существующим информационным системам.

В качестве платформы для программирования предложено использовать проблемно-ориентированный язык программирования высокого уровня на основе предоставляемых ресурсов геоинформационной системы. Разработано три объектных класса верхнего уровня: прогнозирование, координация и диагностика состояния.

Заключение

Представленный пример реализации модифицированной модели управления крупными организациями промышленного типа позволяет на практике актуализировать и обосновывать процесс принятия решений автономными системами обеспечения комплексной безопасности. Использование матричной системы управления в пассивном режиме на основе представленных алгоритмов позволит более оперативно принимать решения, что способствует более эффективному управлению в целом.

Литература

1. Рыженко, А.А. Разработка и реализация адаптивной системы информационной поддержки управления промышленно-экологической безопасностью крупного предприятия / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Институт системного анализа Российской академии наук. Москва, 2005. – 21 с.
2. Рыженко, А.А. Адаптивная система поддержки деятельности центров управления в кризисных ситуациях. Монография. / Н.Г. Топольский, Р.Ш. Хабибуллин, А.А. Рыженко, М.В. Бедило. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – 151 с.
3. Рыженко, А.А. Сервер данных системы поддержки управления пожарной безопасностью промышленного объекта. / А.А. Рыженко, Н.Ю. Рыженко // *Фундаментальные проблемы системной безопасности: материалы школы-семинара молодых ученых*, г. Елец, 2-4 июня 2015 г. – Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2015. – С.127-131.
4. Рыженко, А.А. Информационная система мониторинга пожарной безопасности склада / А.А. Рыженко, Р.Ш. Хабибуллин // *Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал*. – 2015. – Вып. №4(62). – 9 с.
- Режим доступа: <http://ipb.mos.ru/ttb>
5. Ryzhenko, A.A. Modeling of the cognitive center of support of management of safety of large-scale objects / *Theoretical & Applied Science* 04 (24), 2015. -P.80-85.

Сведения об авторах

Рыженко Алексей Алексеевич – к.т.н., доцент кафедры ИТ,
e-mail: litloc@rambler.ru
Alexey A. Ryzhenko – Ph.D. (Tech. Sci.), associate professor of IT

Рыженко Наталья Юрьевна – к.т.н., доцент кафедры ИТ,
e-mail: ryzhena@mail.ru
Nataly Yu. Ryzhenko – Ph.D. (Tech. Sci.), associate professor of IT

УДК 004.94

Д.Н. Халиуллина, С.Н. Малыгина

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕГИОНА

Аннотация

В статье рассматривается понятие комплексной безопасности региона. Вводится понятие безопасности системы, перечислены показатели безопасности, а также методы оценки комплексной безопасности.

Ключевые слова:

безопасность системы, показатели комплексной безопасности, методы оценки комплексной безопасности.

D.N. Khaliullina, S.N. Malygina

THE MAIN ASPECTS OF COMPLEX SECURITY OF REGION

Abstract

The article describes the term of complex security of region. The term of system security is introduced; the security indicators and the methods of complex security evaluation are enumerated.

Keywords:

system security, complex security indicators, methods of complex security evaluation.

Введение

В настоящее время уровень развития государства зависит от текущего состояния его регионов. Так как особенности их исторического и культурного развития, а также географическое положение различны, необходимо это учитывать при определении региональной политики, при этом особое внимание уделяется такому понятию, как комплексная безопасность (КБ) региона.

Комплексная безопасность региональной системы неразрывно связана с понятием устойчивого развития. При этом под безопасностью системы будем понимать такое состояние сложной системы, когда действие внешних и внутренних факторов не приводит к ухудшению системы или к невозможности ее функционирования и развития [1].

Комплексная безопасность региона напрямую связана со следующими условиями: географическим положением, климатом, степенью обеспеченности природными ресурсами, численностью населения, развитостью инфраструктуры и пр. Поэтому КБ можно рассматривать как систему факторов безопасности или отдельных составляющих региональной безопасности: экономической, экологической, технологической и информационной.

Показатели комплексной безопасности региона

Основные региональные проблемы сегодня сводятся к необходимости выявления кризисных ситуаций, при которых может возникнуть угроза

национальной безопасности, а также исследованию и анализу этих кризисных ситуаций, обусловленных спецификой того или иного региона.

Разработка такой системы показателей, которая объективно и своевременно отражала бы существующие кризисные явления в регионе, является одной из первостепенных задач при изучении КБ. Данная система должна отражать следующие аспекты: уровень жизни населения, занятость населения, демографическую ситуацию, производственный и научно-технический потенциал, бюджетно-финансовую сферу, инвестиционный климат, экологическую ситуацию, правопорядок.

В качестве основных показателей безопасности можно выделить следующие:

1. Экономические: среднегодовая численность занятых в экономике; доля экономически активного населения в общей численности населения; транспортная инфраструктура; объем валового регионального продукта; доля отраслей экономики в валовом региональном продукте; потребление электроэнергии отраслями экономики и населением; производство ВРП на душу населения; региональная производительность труда; доходы бюджета на душу населения; туризм и др.

2. Социальные: численность населения; коэффициент естественного прироста населения; коэффициент миграционного прироста; коэффициент рождаемости; смертность населения; среднегодовая заработная плата; среднедушевые денежные доходы населения; ожидаемая продолжительность жизни; уровень общей безработицы; уровень преступности; стоимость потребительской корзины; степень износа жилья; ввод в действие жилых домов и др.

3. Биоэкологические: радиационный фон; запасы топливно-энергетических ресурсов; балансовые запасы минерально-сырьевых ресурсов; лесные ресурсы; изменение улова водных биологических; сброс загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты; выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников; качество питьевой воды; качество атмосферного воздуха и др.

Методы оценки комплексной безопасности

Существует несколько возможностей для оценки КБ региона: применение метода экспертных оценок, установка приоритетных целей и задач развития региона, использование критериального подхода.

В основе определения пороговых значений во многих случаях лежат экспертные оценки, которые в ходе исследований даются отечественными и зарубежными учеными с учетом некоторых среднемировых показателей и тенденций. Суть метода экспертных оценок заключается в проведении экспертами анализа проблемы и получения эмпирических данных относительно значений некоторых показателей [2]. По результатам вычислений, сделанных на основе мнений экспертов, выявляются преобладающие суждения, и формируется обобщенная экспертная оценка, при этом проведение такой оценки может осуществляться как на основе изолированной экспертизы соответствующими специалистами, так и путем экспертизы с использованием результатов анализа, полученного на основе иных методов. Особое место при

проведении экспертных оценок занимают процедуры подбора экспертов, ранжирования показателей и обработки результатов.

Для реализации метода приоритетных целей и задач можно использовать стратегическую матрицу многофакторного анализа. Использование многофакторной модели региона позволяет судить об его устойчивости. Все факторы классифицируются по группам: каждая группа условно представлена в виде одного фактора, который в модели стратегической матрицы отражает совокупное влияние на развитие системы всех факторов, относимых к данной группе [3]. Для представления результатов исследования используются статические значения в конкретный период времени, которые оцениваются на основе критериальных шкал. Для некоторых параметров используется вычисление на основе обобщенных экспертных оценок.

Применение критериального подхода может осуществляться несколькими путями: определение главного критерия; использование нескольких индикаторов, обозначенных как приоритетные; построение системы сводных индикаторов. Первые два подхода применяются в математическом моделировании региональных и много региональных систем. В третьем подходе важен принцип выбора и соизмерения индикаторов, при этом для достижения оптимальности системы разрабатываются методики построения индикаторов [4, 5].

Применение методов экспертных оценок и приоритетных задач связано с неоднозначностью, поскольку объективность данных подходов будет зависеть от компетентности того, кто этот метод использует. Проблемой критериального подхода является невозможность разработки единого обоснованного всеохватывающего показателя, на основе которого может строиться модель оценки.

Меры управление безопасностью

Основной задачей управления безопасностью региона является осуществление комплекса мер, направленного на поддержание устойчивости и потенциала развития региона. Одной из таких мер является мониторинг, который позволит не только отслеживать все негативные процессы в регионе, но и своевременно предотвращать различные угрозы безопасности. Мониторинг можно осуществлять по следующим сферам деятельности [6]:

- способность экономики территории к устойчивому росту – инвестиционная безопасность, производственная безопасность, научно-техническая безопасность, финансовая безопасность, энергетическая безопасность;
- обеспечение приемлемого уровня существования на территории - уровень жизни населения, рынок труда, демографическая безопасность, правопорядок, продовольственная безопасность;
- экологическая безопасность.

При этом каждая из сфер включает определенный набор показателей, и их состав различен.

Заключение

Важнейшей и неотъемлемой частью сложного процесса управления безопасностью является прогнозирование региональных процессов. От него в значительной мере зависят экономические, социальные и экологические последствия регионального развития, полнота использования трудовых, природных и материально-вещественных ресурсов. Для успешного управления необходимо выявлять и предотвращать кризисные ситуации, что можно обеспечить с помощью эффективного управления безопасностью. Для этого необходимо наличие единого информационного пространства, а также четкое определение основных угроз и разработка мер по их устранению.

Литература

1. Заплатинский, В.М. Терминология науки о безопасности / В.М. Заплатинский [Электронный ресурс] // Zbornik prispevkov z mednarodnej vedeckej konferencie «Bezpečnostna veda a bezpečnostne vzdelanie» - Liptovský Mikuláš: AOS v Liptovskom Mikuláši, 2006 (CD nosič).
2. О сущности и основных проблемах энергетической безопасности России / Н.И. Воропай, С.М. Клименко, Л.Д. Криворуцкий и др. // Известия РАН. Энергетика. –1996. - №3. – С.38-49.
3. Давиденко, И.В. Использование методологии стратегической матрицы для решения практических задач / И.В. Давиденко // Проблемный анализ и государственно-управленческое проектирование. – 2009. -Вып. №3, Т.2. – С.145-147.
4. Новикова, И.В., Красников, Н.И. Индикаторы экономической безопасности региона / И.В. Новикова, Н.И. Красников // Вестник Томского гос. ун-та. - 2010. - № 330. - С.132–138.
5. Глазьев, С.Ю. Основа обеспечения экономической безопасности страны: альтернативный реформационный курс / С.Ю. Глазьев // Российский экономический журнал. - 1997. - № 1. - С.8–9.
6. Доценко, Д.В. Экономическая безопасность: методологические аспекты и составляющие / Д.В. Доценко // Аудит и финансовый анализ. – 2009. - № 4. – С.415-427.

Сведения об авторах

Халиуллина Дарья Николаевна – младший научный сотрудник,
e-mail: khaliullina@iimm.ru
Darya N. Khaliullina - junior researcher

Мальгина Светлана Николаевна – к.т.н., научный сотрудник,
доцент кафедры бизнес-информатики КФ ПетрГУ,
e-mail: malygina@iimm.ru
Malygina Svetlana – Ph.D. (Tech. Sci.), researcher, associate professor

УДК 004.057.4

И.О. Датъев

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

МАРШРУТНЫЕ МЕТРИКИ МНОГОШАГОВЫХ БЕСПРОВОДНЫХ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СЕТЕЙ

Аннотация

На сегодняшний день, многошаговые беспроводные сети являются перспективнейшим направлением информационно-коммуникационных сетей. В работе представлена попытка обобщения опыта прошлых лет различных авторов в вопросах разработки метрик маршрутизации, ориентированных на особенности передачи данных в многошаговых беспроводных сетях. В частности, приводятся характеристики беспроводной передачи, которые рекомендуется учитывать при разработке метрик маршрутизации. Кроме того, обсуждаются достоинства и недостатки наиболее ярких примеров уже созданных для беспроводных многошаговых сетей маршрутных метрик.

Ключевые слова:

многошаговые беспроводные сети, компоненты метрики маршрутизации.

I.O. Datyev

ROUTING METRICS OF MULTIHOP WIRELESS AD-HOC NETWORKS

Abstract

To date, multihop wireless networks are a promising direction of information and communication networks. The paper presents an attempt of different authors past experience generalization in the development of routing metrics based on multihop wireless networks data transmission features. In particular, characteristics of wireless transmission that are recommended to be considered during the design of routing metrics are reviewed. In addition, discuss the advantages and disadvantages of the most striking routing metrics examples already created for multihop wireless networks.

Keywords:

multihop wireless networks, routing metric components.

Введение

На сегодняшний день, выявление лучшего для передачи пакета данных маршрута, подразумевает использование протоколами маршрутизации т.н. «метрики». Метрика представляет числовую, как правило, характеристику маршрута. При формировании этой характеристики могут учитываться различные факторы. Наиболее распространенными из них являются [1]:

- количество передач (хопов), которое необходимо совершить для доставки пакета;
- полоса пропускания канала;
- стоимость передачи данных по каналу;
- надежность;
- задержка и т.д.

Таким образом, метрика используется алгоритмами маршрутизации для определения наилучшего пути к получателю данных.

С целью упрощения процесса поиска маршрута алгоритмы маршрутизации создают и регулярно обновляют таблицы маршрутизации, в которых содержится информация о маршрутах. Информация о маршрутах меняется в соответствии с правилами, заложенными в используемом алгоритме маршрутизации.

В случае статической маршрутизации значение метрики обычно не изменяется в пределах сессии. Но когда сеть представляет собой совокупность перемещающихся узлов, например, мобильная самоорганизующаяся сеть – MANET [2], вместе с изменением маршрутов меняется метрика.

Другими словами, метрика – это некоторое условное расстояние между узлами в случае следования по определенному маршруту. С одной стороны, метрика должна достаточно просто вычисляться, чтобы уменьшить служебную нагрузку на сеть. С другой стороны, метрика должна быть мерой характеристик маршрута в большей степени отражающей важнейшие для передачи определенного типа трафика свойства (например, скорость для трафика реального времени), но и не обходящей стороной другие существенные характеристики (например, надежность). Очевидно, что набор таких характеристик и оценки их значимости в рамках метрики должны формироваться, основываясь на решаемых в рамках данной информационно-коммуникационной сети задачах. Примером таких задач может служить многоадресная рассылка мультимедийного трафика в многошаговых беспроводных сетях, развертываемых в местах стихийных бедствий или просто большого количества людей. В качестве другого примера можно привести передачу текстовых сообщений от одного адресата к другому в сети городского масштаба, где время передачи и возникающие задержки не являются столь критичными, как в случае с мультимедийным трафиком.

С конца 90-х, инженерный совет интернет (IETF) [3] вступил на путь разработки протоколов маршрутизации для сетей со все более ненадежными соединениями малой пропускной способности, обладающими непредсказуемой связностью и ограниченными ресурсами маршрутизаторов. В 1997 году запланировали создание рабочей группы MANET (мобильные самоорганизующиеся сети), затем в 2006 и 2008 годах, были созданы рабочие группы 6LoWPAN (трафик IPv6 в сетях низкой мощности WPAN) и ROLL (Routing over low power and lossy networks - маршрутизация в сетях низкой мощности с потерями (LLN - Low power and lossy networks)).

Актуальные задачи, требующие решения на основе современных информационно-коммуникационных сетей и тенденции развития этих сетей смещают акценты с погони за скоростью и мощностью к обеспечению функционирования сети на базе устройств беспроводной передачи данных с низким энерго-потреблением, ограниченными вычислительными ресурсами и непредсказуемой связностью. Поэтому данная работа сосредоточена на характеристиках, которые могут быть использованы в составе метрик маршрутизации в сетях на основе перемещающихся устройств низкой мощности и в качестве примеров, в большей степени рассматриваются метрики маршрутизации, разработанные именно для таких сетей.

Некоторые протоколы маршрутизации многошаговых беспроводных сетей позволяют использовать различные метрики, например, протокол AODVv2 [4]. При использовании различных метрик, даже в рамках одного

протокола маршрутизации и передачи данных, меняются и характеристики передачи данных сети. Следует отметить, что, хотя протоколом AODVv2 предусмотрена возможность использования нескольких метрик, по умолчанию предполагается использование метрики Hop-Count, т.е. количество передач между узлами, которое необходимо осуществить для доставки пакета данных от источника к получателю.

Таким образом, вопрос разработки метрик для современных типов организации сетей – MANET, MESH, VANET, LLN, концепции IoT и на сегодняшний день остается актуальным и значимым.

Используемые в качестве компонент маршрутных метрик характеристики

Беспроводные самоорганизующиеся сети, сегодня, всё больше создаются на основе другого класса сетей, называемых зарубежными авторами «Сети низкого энергопотребления (малой мощности) с потерями - Low power and lossy networks - LLNs)» [5], в которых маршрутизаторы и соединения находятся в условиях ограничений. Маршрутизаторы LLN обычно работают с ограничениями по вычислительной мощности, памяти, и энергии (батареи питания). Сетевые соединения характеризуются высокими показателями потерь пакетов, низкой скоростью передачи данных, и нестабильностью. LLNs могут состоять от нескольких десятков до тысячи маршрутизаторов. Поддерживаются следующие транспортные потоки: точка-точка (между устройствами внутри LLN), точка-многоточка (из центрального контрольного пункта к подмножеству устройств внутри LLN), и многоточка-точка (из устройств внутри LLN к центральной контрольной точке).

В спецификации **RFC6551** рабочая группа ROLL организации IETF выделяет следующие существенные характеристики, которые могут быть использованы в качестве составляющих метрик и ограничений сетей класса LLN, на базе которых сегодня создаются также сети MESH и MANET.

Характеристики подразделяются на две группы:

- 1) метрики/ограничения узлов сети;
- 2) метрики/ограничения сетевых соединений.

Кроме того, в этом же документе определяются форматы представления для передачи этих характеристик на сетевом уровне модели OSI [6] посредством DAG Metric Container.

Формат передачи маршрутной информации: DAG Metric Container. DAG Metric Container – это опция, которая может присутствовать в сообщениях DIO (DODAG Information Object (DIO) или DAO (Destination Advertisement Object) [7]. Формат DAG Metric Container выглядит следующим образом:

```

0 1 2
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3
+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+
| Type = 0x02 | Option Length | Metric Data
+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+

```

Рис. 1. Формат опции DAG Metric Container

Option Type (тип опции): 0x02.

Option Length (длина опции): Поле Option Length (длина опции) содержит выраженную в октетах длину метрических данных.

Metric Data (метрические данные): Порядок, контент и кодирование данных DAG Metric Container определено в RFC6551[5].

DAG Metric Container используется для передачи метрической информации внутри DODAG.

DAG Metric Container может содержать количество отдельных узлов, соединений, агрегированные маршрутные метрики и ограничения, определенные в RFC6551, выбранных конкретными компаниями или лицами, разрабатывающими программное обеспечение в соответствии с RFC6550 [7].

DAG Metric Container может появляться несколько раз в одном и том же служебном сообщении, например протокола RPL [7], чтобы вместить метрическую информацию длиной более 256 байт.

Обработка и передача DAG Metric Container регулируется конкретной программной реализацией специальных функций.

Метрики/Ограничения узлов

Объект «Состояние узла и атрибуты». Объект «Состояние узла и атрибуты» (NSA - Node State and Attribute) используется для предоставления информации о характеристиках узла.

Объект NSA может быть представлен в формате DAG Metric Container [7]. DAG Metric Container не должен содержать более одного объекта NSA в качестве ограничения и более одного объекта NSA в качестве метрики. Кроме того, объект NSA может содержать набор полей TLV (Type Length Value), используемых для передачи различных характеристик узла. Примеры таких TLV на сегодняшний день нормативными документами не определены.

Типу метрики маршрутизации или ограничению NSA организацией IANA [8] присвоено значение 1.

Формат объекта NSA представлен следующим образом:

```
0 1 2
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4
+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+ ...
| Res | Flags |A|O| Optional TLVs
+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+ ...
```

Рис. 2. Формат объекта NSA

Флаги Res (8 бит): зарезервированное поле. Должно быть равно 0 при передаче и должно игнорироваться при приеме информации узлом.

Флаговое поле (8 бит). Следующие два бита определены таким образом:

- Флаг 'A': атрибут агрегации данных (data Aggregation Attribute).

Некоторые приложения могут использовать этот флаг при маршрутизации для того, чтобы уменьшить объем сетевого трафика, и как следствие, увеличить время жизни узла в случае использования батареи питания. Приложения, в которых ожидаются большие потоки данных в направлении определенных узлов, могут получить преимущество от использования маршрутизации с

поддержкой агрегации данных. Когда флаг установлен, это означает, что узел может выступать в роли агрегатора трафика.

- Флаг 'O': загрузку узла сложно определить и выразить скалярной величиной. Однако нагрузка на узел может быть полезной для вычисления метрики пути, в частности, когда задержки в очереди должны быть сокращены для т.н. «чувствительного» трафика уровня Medium Access Control (MAC). Флаг 'O' может быть установлен при перегрузке центрального процессора узла, нехватке памяти, или других связанных с узлом условиях. Использование простого однобитного флага для характеристики загрузки узла предоставляет существенный уровень детализации, подобный биту «перегрузка» в протоколе маршрутизации IS-IS. Установленный бит сигнализирует, что узел перегружен и может оказаться неспособным обработать трафик.

Неопределенные поля флагов должны быть установлены в ноль при передаче и игнорироваться при приеме.

Поля флагов NSA метрики/ограничений разработаны и управляются IANA. Не назначенные биты подразумеваются зарезервированными.

Энергия узла. Иногда при маршрутизации может возникнуть необходимость избегать промежуточных узлов с низкой остаточной энергией, что может быть реализовано посредством маршрутизации, основанной на ограничениях. В подобных случаях, протокол маршрутизации может вычислить более длинный путь (основанный на ограничениях) для определенного типа трафика, чтобы увеличить продолжительность жизни всей сети.

Мощность и энергия являются наиболее критическими ресурсами в большинстве сетей класса LLN. До сих пор не разработано простой абстракции, которая бы адекватно представляла все типы источников и накопителей энергии, используемых в узлах современных LLN. Узлы сети могут быть подключены к центральной электрической сети, аккумуляторам, т.н. альтернативным источникам энергии (солнечным батареям, ветряным мельницам, различного рода преобразователям вибраций в электроэнергию и т.д.) и другой непредсказуемой энергии.

Системы хранения энергии, подобные аккумуляторам, часто подвергаются субстанционной деградации, если регулярно полностью разряжаются, что приводит к непредсказуемой остаточной энергии, которой может быть недостаточно даже для чрезвычайно важных операций. Маршрут для чрезвычайно важного трафика может иметь другие характеристики, чем маршрут для регулярного использования.

Батареи, используемые в LLN часто деградируют, если их среднее текущее потребление превышает на маленькую долю пиковое текущее, которое они могут предоставить.

Некоторые узлы могут сочетать различные источники питания и устройства хранения энергии, что приводит к различным характеристикам узла (допустимое среднее потребление тока) в разные временные периоды, которые могут измеряться миллисекундами, часами и даже годами. Значения мощности и энергии, сами по себе, являются бессмысленными, необходимы также знания об энергетических затратах на отправку и получение пакетов. Оценки продолжительности жизни не имеют никакой ценности без некоторых высокоуровневых ограничений срока службы устройства. В некоторых случаях, путь, который истощает батарею узла на прикроватном столе за месяц, может быть

предпочтительнее маршрута, который снижает долговечность узла внутри стены на десять лет.

Учитывая сложность попытки сформулировать такой широкий набор ограничений, документ RFC6551 определяет два уровня точности.

Самое простое решение основывается на 2-битовом поле, кодирующем три вида источников питания: "подключенный к централизованной сети", "аккумулятор", и "альтернативный" (солнечная, виброэнергия и т.д.).

Этот простой подход может быть достаточным для многих приложений.

Решение средней сложности заключается в использовании одного параметра, который может использоваться для кодирования энергетического «счастья» узлов, питающихся от батарей и узлов с источниками типа «альтернативный».

Для узлов с источником питания типа «альтернативный», 8-битное значение представляет собой мощность, предоставляемую «альтернативным» источником P_{in} , деленную на мощность, потребляемую приложением P_{out} :

$$E_E = P_{in} / P_{out} . \quad (1)$$

Измеряется в процентах. Результат расчета для узлов, производящих больше энергии, чем они потребляют, превысит 100 процентов. Для усреднения мощности в данном расчете хороший период времени может быть связан с временем разрядки устройства аккумулялирования энергии.

Для устройств с батарейным питанием, E_E будет равно текущей ожидаемой продолжительности жизни, деленной на желаемый минимальный срок службы, в процентах. Оценка оставшейся энергии батареи и фактическое энергопотребление могут быть сложны для расчета. Рассмотрим два примера. Если узел может измерить своё среднее энергопотребление, то E_E можно рассчитать как отношение желаемой максимальной мощности (начальная энергия E_0 деленная на желаемый срок службы T) к фактической мощности:

$$E_E = P_{max} / P_{now} . \quad (2)$$

Другим примером является случай, когда есть оценки энергии в аккумуляторе E_{bat} и известно общее прошедшее время жизни t . Тогда E_E может быть рассчитана как количество оставшейся энергии, деленное на желаемое значение оставшейся энергии:

$$E_E = E_{bat} / [E_0 \times (T - t) / T] . \quad (3)$$

Примером оптимизированного маршрута может служить $\max(\min(E_E))$ для всех питающихся от батарей узлов маршрута, при условии ограничения, что $E_E > 100$ для всех узлов маршрута с питанием альтернативного типа.

Следует отметить, что процент оставшейся энергии (E_E) может оказаться бесполезным, когда количество энергии, которое могут накопить узлы (например, емкость аккумуляторов) существенно различается.

Объект «Энергия узла» (NE) может быть представлен в формате DAG Metric Container. DAG Metric Container не должен содержать более одного объекта NE в качестве ограничения и более одного объекта NE в качестве метрики.

Типу NE метрики маршрутизации или ограничению организацией IANA присвоено значение 2.

Формат объекта NE выглядит следующим образом:

```
0 1 2
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4
+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+ ...
| NE подобъекты
+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+ ...
```

Рис. 3. Формат объекта NE

Формат подобъекта NE выглядит следующим образом:

```
0 1 2
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4
+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+ ...
| Флаги | I | T | E | E_E | Опционально TLVs
+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+ ...
```

Рис. 4. Формат подобъекта NE

Подобъект NE может содержать набор TLVs, использующихся для передачи характеристик различных узлов.

Поле Флаги (8 бит). На сегодняшний день определены следующие флаги:

I (Included): 'I' бит имеет значение только тогда, когда Тип узла используется в качестве ограничения. Например, путь должен проходить только через питающиеся от сети узлы. Наоборот, узлы на батареях должны быть исключены. Когда бит 'I' установлен, это указывает на то, что узлы, Тип которых указан в поле «Тип узла» должны быть включены в маршрут. И наоборот, когда бит сброшен, это означает, что узлы типа, указанного в поле «Тип узла» должны быть исключены из маршрута.

T (node Type - Тип узла): 2-битовое поле, определяющее Тип узла T=0 обозначает, что узел питается от центральной сети, T=1 – питание от батареи узла, T=2 – узел типа «поглотитель».

E (Estimation - Оценка): когда бит " E " установлен в 1 это значит, что 8-битовое поле E_E содержит предполагаемый процент оставшейся энергии на узле. Когда бит установлен в 0, оценка процента оставшейся энергии не предусматривается. Когда бит " E " используется для ограничения, поле E_E определяет порог для включения/исключения: если включение, то узлы со значениями выше порогового включаются в маршрут; если исключение, то узлы со значениями ниже порогового должны быть исключены из маршрута.

E_E (Estimated-Energy - Оставшаяся Энергия): 8-битное беззнаковое целое поле, указывающее приблизительный процент оставшейся энергии. Поле E_E имеет значение только тогда, когда флаг 'E' установлен.

Если объект NE состоит из нескольких подобъектов при использовании в качестве ограничений, каждый подобъект добавляет или вычитает подмножества узлов маршрута по мере обработки подобъектов в порядке их следования. Начальный набор (полный или пустой) определяется битом 'I' из первого подобъекта: полный, если бит 'I' сброшен, пустой, если бит 'I' установлен в 1.

Одним из примеров использования характеристики «Энергия узла» в составе метрики маршрутизации является работа [9] зарубежных авторов, где предлагаемая метрика основана на пропускной способности, энергии, количестве хопов и времени и должна повысить энергоэффективность протокола маршрутизации PCBR (Position Changes Based Routing Protocol).

Количество передач (шагов, хопов). Количество хопов используется для предоставления отчетов о числе пройденных узлов во время следования по маршруту.

Формат объекта Hop Count (HC) выглядит следующим образом:

```

0 1 2
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4
+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+ ...
| Res | Flags | Hop Count | Optional TLVs
+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+--+ ...

```

Рис. 5. Формат объекта HC

Флаги Res (4 бита): Зарезервированное поле. Это поле должно быть равным нулю при передаче и должно игнорироваться при приеме.

В настоящее время, поля Res и Flags не определены. Не назначенные биты считаются зарезервированными. Они должны быть установлены в ноль на передаче и должны быть проигнорированы при приеме.

Объект «Количество хопов» (HC) может быть представлен в формате DAG Metric Container. DAG Metric Container не должен содержать больше, чем один объект HC в качестве ограничения и больше, чем один объект HC в качестве метрики.

Типу метрики маршрутизации или ограничению HC организацией IANA присвоено значение 3.

Объект HC может быть использован в качестве ограничения или метрики. При использовании в качестве ограничения, начало DAG Metric Container указывает на максимальное количество хопов, которое может содержать маршрут. Когда это число будет достигнуто, никакой другой узел не сможет быть присоединен к этому пути. При использовании в качестве метрики, каждый промежуточный узел просто увеличивает поле Hop Count.

Следует отметить, что метрика «Количество хопов» принята в качестве метрики по умолчанию в сетях MANET. Так, например, даже в новой версии протокола AODVv2, по умолчанию используется метрика «Количество хопов». Однако в AODVv2, возможно использование т.н. «альтернативных метрик», не определенных в самой спецификации этого протокола. Механизм использования разных метрик организован следующим образом. Каждая метрика в AODVv2 имеет свой тип – MetricType. MetricType выделены организацией IANA, как это указано в RFC6551 [5]. Использование альтернативной метрики требует включения в MetricType элемента данных в соответствующем сообщении RteMsg (Route Message). Маршруты ищутся согласно типам метрики, и промежуточные маршрутизаторы обрабатывают RteMsg в соответствии с назначенным одинаковым типом метрики. Для каждого типа метрики, определяется

максимальное значение и обозначается MAX_METRIC[i], где 'i' - это тип метрики (MetricType). AODVv2 не может хранить маршруты в своих таблицах маршрутизации, значение метрики которых превышает MAX_METRIC[i]. В целях упрощения хранения описания стоимостей маршрутов в таблице маршрутизации, определена функция стоимости. Эта функция возвращает стоимость передвижения по маршруту ('Cost(R)') или соединению ('Cost(L)'). Описание функций стоимости для альтернативных метрик в спецификации AODVv2 не приводится.

Поскольку определение наличия циклов, зависит от сравнения Cost(R1) предлагаемого нового маршрута с существующим сохраненным Cost(R2) с помощью той метрики того же типа, AODVv2 включает в себя вызов функции называемой "LoopFree (R1, R2)". LoopFree (R1, R2) возвращает True, когда R1 гарантированно не зависит от маршрута R2, т. е. R2 не является подмаршрутом маршрута R1. В AODVv2 маршрутизатор вызывает функцию LoopFree(), чтобы сравнить предлагаемый маршрут с сохраненным маршрутом. Предлагаемый маршрут называется AdvRte и обозначается R1, сохраненный маршрут обозначается как маршрут R2. Диапазон и тип данных каждой такой альтернативной метрики может отличаться, что необходимо принимать во внимание при разработке программных реализаций, основанных на спецификации AODV. Следует отметить, что в некоторых ситуациях метрика «Количество хопов» может стать причиной выбора наихудших из возможных маршрутов, именно поэтому спецификация AODVv2 позволяет использовать другие метрики. Однако описание таких метрик и примеров их использования в самой спецификации не приводится, что в некоторой степени снимает ответственность с авторов за эффективность функционирования протокола.

Метрики/ограничения соединений

Как указано в RFC6551 следующие характеристики можно учитывать для вычисления метрики или ограничений.

Пропускная способность. Многие сети LLN поддерживают широкий диапазон пропускной способности. Для некоторых соединений, причиной этого может быть переменное кодирование. Для циклично-нагруженных соединений, присущих многим сетям LLN, изменчивость возникает в результате расплаты потреблением мощности за битрейт (скорость передачи). Существует несколько протоколов MAC-уровня, которые допускают изменение скорости передачи данных соединения в интервале более чем трех порядков с соответствующим изменением в энергопотреблении. Для эффективной работы, желательно, чтобы узлы сообщали диапазон пропускной способности, который их соединения могут обрабатывать в дополнение к имеющейся в настоящее время пропускной способности.

Объект «пропускная способность» состоит из подобъектов и должен содержать, по крайней мере, один подобъект.

Пропускная способность объекта может присутствовать в DAG контейнере. Первый подобъект должен являться наиболее актуальной оценкой пропускной способности. Длина каждого подобъекта фиксирована и равна четы-

Надежность соединения. В сетях LLN, надежность соединения может снизиться по ряду причин: затухание сигнала, интерференции различных форм и др. Шкалы времени изменяются от миллисекунд до нескольких дней, часто являются периодическими и связаны с человеческой деятельностью. Некоторые показатели, например, количество ошибок в пакете могут быть измерены напрямую, а другие, например, частота появления ошибок по битам, среднее время между отказами вычисляются на основе этих измерений. Такое разнообразие характеристик не является специфичным только для беспроводной связи, но также применяется для соединений PLC (power line communication).

Изменение качества связи может повлиять на связность сети; таким образом, качество соединений может быть принято во внимание в роли критической метрики маршрутизации.

Количество метрик может быть определено различными аспектами надежности. Две метрики надежности определены в RFC6551: уровень качества соединения (LQL) и метрика ETX. Причем, следует отметить, что эти метрики могут использоваться как по отдельности, так и вместе.

Цвет (раскраска) соединений. В RFC6551 Объект Цвет соединения (ЦС) - административное 10-битное ограничение канала (которое может регулироваться, как статически так и динамически), используемое чтобы избежать или, наоборот использовать определенные соединения для конкретных типов трафика. Объект Цвет соединения может быть использован в качестве метрики или в качестве ограничения.

Цвет определяется как определенный набор битовых значений: другими словами, это 10-битовое поле - это поле флага, а не скаляр. Каждый узел может затем использовать ЦС для выбора родительских узлов на основе определенных пользователем правил (например, "выберите путь с максимальным количеством соединений, у которых первый бит равен 1 (например, зашифрованные соединения)). ЦС может передаваться с помощью DAG.

Вычисление динамических метрик и атрибутов

Как уже отмечалось, во многих случаях в многошаговых беспроводных сетях, динамически вычисляемые метрики имеют первостепенное значение. Это связано с постоянным изменением множества метрик, из-за необходимости адаптировать решения о маршрутизации. Поэтому, особое внимание должно быть уделено темпам отражения и реакции на изменения сети. Атрибуты должны меняться в соответствии со своими временными шкалами. Рекомендуется тщательно прорабатывать алгоритм оптимизации маршрута, чтобы избежать слишком частого вычисления новых маршрутов при изменении значений метрик. Контролируемая адаптация метрики маршрутизации и скорость, с которой вычисляются маршруты являются критическими и позволяют избежать нежелательной нестабильности процесса маршрутизации в результате увеличения задержки и потери пакетов. Кроме того, чрезмерное изменение маршрута будет отрицательно влиять на трафик и расход энергии в сети, таким образом, потенциально влияя и на масштабируемость сети.

Маршрутные метрики

Link quality level (LQL). Уровень качества соединения (LQL – link quality level) применяется для количественной оценки надежности, используя дискретное значение, от 0 до 7, где 0 означает, что качество соединения неизвестно и 1 означает высший уровень качества соединения, 7 означает самый низкий уровень качества. Механизмы и алгоритмы, используемые для вычисления LQL определяются конкретной реализацией. LQL может быть использован как в качестве метрики, так и в качестве ограничения. Объект LQL может быть представлен в контейнере DAG, где не должно содержаться более одного объекта LQL в качестве ограничения и более одного объекта LQL в качестве метрики.

Expected Number of Transmissions (ETX). Метрика ETX – это количество передач, которые узел рассчитывает произвести, чтобы успешно доставить пакет к месту назначения. В противоположность метрике маршрутизации LQL, ETX является дискретным значением (которое может не быть целым числом), вычисленным по определенной формуле. Например, реализация может использовать следующую формулу:

$$ETX = \frac{1}{Df \times Dr}, \quad (4)$$

где Df - измеренная вероятность того, что пакет получен соседним узлом,
 Dr - измеренная вероятность получения пакета подтверждения.

Документ RFC6551 [5] не определяет использование конкретных формул для вычисления значения ETX. Объект ETX также может присутствовать в контейнере DAG, где не должно быть использовано более одного объекта ETX в качестве ограничения и более одного объекта ETX в качестве метрики. Кроме того, в документе [5] указывается, что объект ETX состоит из подобъектов ETX и должен, как минимум, содержать один подобъект ETX. Каждый ETX подобъект имеет фиксированную длину 16 бит.

Преимущества:

1. Метрика ETX основана на коэффициенте доставленных пакетов, который, в свою очередь, непосредственно связан с пропускной способностью и учитывает влияние и асимметрию коэффициента потерь конкретного соединения.

2. ETX способствует выбору пути с более высокой пропускной способностью и меньшим количеством шагов (хопов), поскольку длинные пути имеют меньшую пропускную способность из-за внутривиточковых [18] помех.

3. Метрика ETX косвенно учитывает и межпоточковые помехи. Поскольку ETX учитывает потери канального уровня, соединения с высоким уровнем помех будут иметь больший коэффициент потери пакетов и, следовательно, увеличивать значение самой метрики.

4. ETX является изотонической [10], и, следовательно, допускает эффективное вычисление кратчайшего маршрута без зацикливаний.

Недостатки:

1. Метрика ETX предназначена для одноканальной многошаговой беспроводной сети.

2. ETX учитывает только коэффициент потерь соединения, игнорируя помехи, которые оказывают существенное влияние на качество соединения и скорость передачи данных.

3. ETX не учитывает различий в скоростях передачи.

4. Поскольку скорость передачи зондовых пакетов, как правило, низка, метрика не точно отражает коэффициент потери скорости фактического трафика.

5. ETX не дает никакой информации о совместном использовании соединений.

6. ETX может прокладывать маршруты через высоконагруженные соединения, поскольку не учитывает загрузку соединений.

7. ETX не учитывает различий между маршрутами, использующими один и тот же канал и маршрутами, использующими разные каналы. Таким образом, ETX не делает попыток, чтобы свести к минимуму внутритополовую интерференцию.

8. В высококомбинированных одноканальных средах, ETX показывает плохую скорость из-за длительного временного окна, в течение которого происходит передача маршрутной информации.

Expected Transmission Time (ETT). Ожидаемое время передачи ETT (expected transmission time)[11], является расширением ETX.

В этой метрике [12] принимается во внимание различие скоростей соединений маршрута. ETT представляет собой ожидаемое время успешной передачи пакета на подуровне MAC и определяется для одного соединения следующим образом:

$$ETT = ETX \times \frac{S}{B}, \quad (5)$$

где S - средний размер пакета,

B - пропускная способность соединения.

ETT всего пути рассчитывается посредством сложения всех значений ETT для отдельных соединений, составляющих этот путь.

Преимущества ETT:

1. За счет учета пропускной способности каждого соединения может быть увеличена общая пропускная способность пути и соответственно, производительность сети в целом.

2. ETT является изотонической (isotonic).

Недостатки:

1. ETT сохраняет много недостатков ETX.

2. Не учитывает загрузку соединений явно, вследствие чего возможны перегрузки соединений и узлов сети.

3. Не предназначена для multiradio сетей, поэтому не минимизирует взаимные помехи узлов.

Weighted Cumulative Expected Transmission Time (WCETT). Взвешенное совокупное ожидаемое время передачи (WCETT) [12] является расширением ETT. В WCETT метрика пути p , определяется следующим образом:

$$WCETT_p = (1 - \alpha) \times \sum_{i \in p} ETT + \alpha \times \max_{i \leq j \leq k} X_j, \quad (6)$$

где X_j - сумма ЕТТ соединений, использующих канал j в системе ортогональных каналов, α - это настраиваемый параметр, $0 \leq \alpha \leq 1$, который позволяет регулировать соотношение важности длины пути и отличия используемых каналов.

Первое слагаемое является суммой ЕТТ отдельных соединений, и, следовательно, способствует выбору более коротких и качественных маршрутов. Второе слагаемое – это максимум из сумм ЕТТ всех соединений определенного канала. Так что, это дает более высокие значения для контура с большим числом звеньев, работающих на одном канале, что дает большее значение метрики для маршрута, в котором много соединений используют один канал. Таким образом, второе слагаемое способствует разнообразию каналов и снижению взаимных помех узлов, вызванных интерференцией.

Преимущества:

1. WCETT учитывает интерференцию и способствует выбору пути с соединениями, использующими разные каналы.
2. Сохраняет все преимущества ЕТТ, кроме изотоничности.
3. Улучшается производительность мульти-радио беспроводных сетей с соединениями разных скоростей по сравнению с более простыми метриками, такими как ЕТТ, ЕТХ и Hop Count.
4. Две взвешенные компоненты настраиваются α , представляют собой простые суммы ЕТТ и позволяют балансировать между пропускной способностью и задержкой.

Недостатки:

1. WCETT учитывает только количество соединений, работающих на одинаковом канале, но не учитывает взаимное расположение этих соединений. Предполагается, что все соединения, работающие на одном канале, мешают друг другу. Таким образом, может быть выбран неоптимальный маршрут.
2. Поскольку метрика не изотоническая, ее очень сложно использовать в протоколах маршрутизации, основанных на состоянии канала.
3. WCETT не явно учитывает влияние взаимных помех, поэтому может способствовать выбору маршрутов с высоким уровнем помех.
4. Метрика обладает схожими с ЕТХ и ЕТТ недостатками и не предусматривает эффективного совместного использования соединений.

Модификация WCETT, названная WCETT-LB (load-balancing) [11] призвана улучшить характеристики данной метрики в области балансировки нагрузки. Следует отметить работу [13], в которой производится исследование различных методов балансировки нагрузки для беспроводных сетей.

Metric of Interference and Channel switching (MIC). Метрика помех и коммутации каналов (MIC) [14] предназначена для поддержки маршрутизации с балансировкой нагрузки, учитывает помехи между различными потоками и помехи внутри одного потока. MIC маршрута p определяется следующим образом:

$$MIC(p) = \frac{1}{N \times \min(ETT)_{link}} \times \sum_{i \in p} IRU_i + \sum_{nodq \in p} CSC_i, \quad (7)$$

где N - число узлов сети,

$\min(ETT)_{link}$ - самое маленькое ETT в сети,

IRU (Interference-aware Resource Usage – помехи, сопряженные с использованием ресурсов) и CSC (Channel Switching Cost – стоимость коммутации каналов) определяются следующим образом:

$$IRU_i = ETT_i \times N_i, \quad (8)$$

$$CSC_i = w1 \quad \text{if} \quad CH(prev(i)) \neq CH(i), \quad (9)$$

$$CSC_i = w2 \quad \text{if} \quad CH(prev(i)) = CH(i), 0 \leq w1 \leq w2, \quad (10)$$

где N_i - множество соседей, которые создают помехи на линии i ;

$CH(i)$ - канал передачи узла i ;

$prev(i)$ - предшествующий i -тому узлу хоп по маршруту p .

Преимущества:

1. Метрика MIC учитывает внутривидовую и межвидовую интерференцию и может быть изотонична, если применить декомпозицию на виртуальные узлы при использовании поиска кратчайшего пути с помощью алгоритмов подобных алгоритму Дейкстры.

Недостатки:

1. Затраты (служебный трафик), необходимые для поддержания обновления информации ETT для каждого соединения может значительно повлиять на производительность сети в случае больших объемов передаваемой информации.

2. Эта метрика предполагает, что все соединения, которые находятся во множестве создающих друг другу помехи соединений, в отношении конкретного соединения создают одинаковый уровень помех. При этом не учитывается, осуществляют ли эти соединения какие-либо передачи одновременно с этим конкретным соединением или нет.

3. Компонент CSC учитывает внутривидовые помехи только для двух последовательных соединений.

Load Aware ETT (LAETT). Главные цели LAETT [15] - это формирование маршрута, который удовлетворяет требованию пропускной способности потока и освобождает место для будущих запросов, балансируя нагрузку по всей сети. LAETT сочетает в себе характеристик беспроводной передачи и оценки загрузки. Основана на адаптации ETT, которая вычисляется следующим образом:

$$ETT_{ij} = ETX_{ij} \times \frac{S}{B_{ij}}, \quad (11)$$

где ETX_{ij} - ожидаемое количество передач между узлами i и j (метрика ETX);

S – размер пакета;

B_{ij} - эффективный битрейт.

$$B_{ij} = \frac{B_i}{\gamma_{ij}},$$

B_i - скорость передачи узла i ;

γ_{ij} - параметр качества соединения.

$\gamma_{ij} = 1$, если качество соединения хорошее, при ухудшении качества соединения параметр γ_{ij} увеличивается;

Для осуществления балансировки нагрузки, для каждого узла i вводится характеристика, названная остаточной пропускной способностью RC_i и вычисляется по формуле:

$$RC_i = B_i - \sum_{k=1}^N f_{ik} \gamma_{ik}, \quad (12)$$

где f_{ik} - скорость N потоков, проходящих через узел i в данное время.

Оценка остаточной пропускной способности регулируется γ_{ik} , поскольку при хорошем качестве соединения требуется меньше ресурсов для передачи информации.

Алгоритм «packet-pair» может быть использован для оценки доступной полосы пропускания соединения с параметром γ_{ik} .

Метрика LAETT рассчитывается следующим образом:

$$LAETT_{ij} = ETX_{ij} \times \frac{S}{(RC_i + RC_j) / 2\gamma_{ij}}. \quad (13)$$

Второй множитель учитывает остаточную пропускную способность конечных узлов i и j . Когда два маршрута имеют один и тот же вес ETX , метрика LAETT способствует выбору маршрута с большей остаточной емкостью

Преимущества:

LAETT представляет собой изотоническую метрику, осуществляющую балансировку нагрузки по всей сети.

2. LAETT учитывает качество и загруженность соединения.

Недостатки:

Не учитывается внутривидовая интерференция. Кроме того, межвидовая интерференция в явном виде тоже не рассматривается.

Exclusive Expected Transmission Time (EETT). Эксклюзивное ожидаемое время передачи (EETT) [16] - это метрика, учитывающая помехи и способствующая выбору многоканальных маршрутов с наименьшими помехами с целью максимизации пропускной способности между двумя конечными узлами маршрута. Данная метрика используется для получения более точной оценки многоканального пути. Для любого заданного соединения l , определяется множество IS (Interference Set) - множество соединений, создающих помехи друг другу. Также IS включает непосредственно сам узел l .

ЕЕТТ для соединения l определяется следующим образом:

$$EETT_l = \sum_{link_i \in IS(l)} ETT_i, \quad (14)$$

где $IS(l)$ - множество соединений, создающих помехи соединению l .

Вес пути (маршрута) определяется как сумма метрик ЕЕТТ каждого соединения маршрута.

Преимущества:

1. Метрика ЕЕТТ обладает всеми достоинствами метрики ЕТТ.

2. ЕЕТТ учитывает внутривидовые помехи и, неявным образом, межвидовые помехи.

3. ЕЕТТ является изотонической.

Недостатки:

ЕЕТТ соединения l представляет степень занятости канала, используемого соединением l . Это наихудшая (наибольшая) оценка времени передачи по соединению l .

Interference Load Aware (ILA). Метрика ИЛА [17] построена на основе метрики МС. ИЛА состоит из двух компонентов: метрики помехи в канале (Metric of channel interference - МТИ) и стоимости коммутации канала (channel switching cost - CSC). Компонента CSC такая же, как в метрике МС. МТИ определяется следующим образом:

$$MTI_i(C) = ETT_{ij} \times AIL_{ij}(C), \quad N_i(C) \neq 0, \quad (15)$$

$$MTI_i(C) = ETT_{ij}(C), \quad N_i(C) = 0. \quad (16)$$

$AIL_{ij}(C)$ - средняя загрузка соседей, которые могут создать помехи при передаче между узлами i и j через канал C .

$$AIL_{ij}(C) = \frac{\sum_N IL_{ij}(C)}{N_L(C)}, \quad N_L(C) = N_i(C) \cup N_j(C), \quad (17)$$

где $IL_{ij}(C)$ - загрузка соседей, создающих помехи узлам i и j ,

$N_L(C)$ - множество узлов, создающих помехи узлам i и j .

В итоге, вес маршрута p рассчитывается следующим образом:

$$ILA(p) = \alpha \times \sum_{link_i \in p} MTI_i + \sum_{nodq \in p} CSC_i. \quad (18)$$

Для балансировки разности шкал этих двух слагаемых применяется нормировочный коэффициент α :

$$\frac{1}{\alpha} = \min(ETT) \times \min(AIL), \quad N_i(C) \neq 0, \quad (19)$$

$$\frac{1}{\alpha} = \min(ETT), \quad N_i(C) = 0, \quad (20)$$

где $\min(ETT)$ и $\min(AIL)$ - минимальное значение ЕТТ и АИЛ в сети.

Важным вопросом реализации этой метрики является оценивание загрузки соседей, создающих помехи при передаче.

Преимущества:

1. Эта метрика устраняет недостатки следующих метрик: Hop Count, ETT, ETX, WCETT, MIC для беспроводных самоорганизующихся сетей.

2. ILA способствует выбору маршрута с меньшими перегрузками, низким уровнем помех, меньшим коэффициентом отбрасывания пакета и высокой скоростью передачи данных.

3. ILA, в отличие от MIC, рассчитывает межпоточные помехи посредством учета количества трафика, генерируемого создающими помехи соседями.

Недостатки:

Компонент CSC учитывает внутривидовые помехи только двух последовательных соединений.

Interference Aware routing metric (iAWARE). iAWARE [18] является первой метрикой маршрутизации для мультирадио MESH-сетей, учитывающей межпоточные и внутривидовые помехи с помощью модели интерфейса физического уровня. В этой модели соединение между узлами u и v является успешным, если SINR (отношение сигнал/(шум и помехи)) в приемнике выше определенного порога, который зависит от желаемых характеристик передачи (канал, скорость передачи данных и т. д.).

$P_v(u)$ - мощность сигнала пакета от узла u в узле v . Тогда пакет на соединении (u, v) от узла u к узлу v корректно получен, если:

$$\frac{P_v(u)}{N + \sum_{w \in V'} P_v(w)} \geq \beta, \quad (21)$$

где N - фоновый шум;

V' - множество одновременно осуществляющих передачу узлов;

β - константа, зависящая от скорости данных, характеристик канала, схемы модуляции и т.д.

$SINR_i(u)$ - отношение сигнал/(шум и помехи) на соединении i узла u ;

$SNR_i(u)$ - отношение сигнал/шум на соединении i узла u ;

$$SNR_i(u) = \frac{P_u(v)}{N}. \quad (22)$$

$$SINR_i(u) = \frac{P_u(v)}{N + \sum_{w \in \eta(u)} \tau(w) P_u(w)}, \quad (23)$$

где $\eta(u)$ - множество узлов, которые находятся в зоне радиодоступа узла u ,

$\tau(w)$ - нормализованная средняя за период времени скорость, с которой узел w генерирует трафик, $\tau(w)$ равно 1, когда узел рассылает пакеты на максимально доступной скорости. $\tau(w)$ используется в качестве весового коэффициента мощности сигнала создающего помехи узла w , поскольку $\tau(w)$ представляет собой часть времени, когда канал занят узлом w .

iAWARE метрика маршрута p определяется следующим образом:

$$iAWARE(p) = (1 - \alpha) \times \sum_{i=1}^n iAWARE_i + \alpha \times \max_{1 \leq j \leq k} X_j, \quad (24)$$

где X_j - то же, что и в метрике WCETT,

iAWARE метрика соединения j вычисляется следующим образом:

$$iAWARE_j = \frac{ETT_j}{IR_j}, \quad (25)$$

где IR_j - коэффициент интерференции (помех) соединения j между узлами u и v ,

$$IR_j = \min(IR_j(u), IR_j(v)), \quad (26)$$

$$IR_i(u) = \frac{SINR_i(u)}{SNR_i(u)}. \quad (27)$$

Преимущества:

1. iAWARE учитывает эффект изменения коэффициента потери пакетов, отличия в скорости передачи, а также внутри- и межпоточковые помехи.
2. iAWARE сохраняет многие свойства WCETT за исключением обработки измерений межпоточковой интерференции. iAWARE напрямую измеряет среднее значение радиопомех, создаваемых соседними узлами.
3. Введение SINR является значимым открытием для вычисления межпоточковой интерференции маршрутизации по сравнению с другими основанными на ETX метриками: MIC, ETX, WCETT и др.

Недостатки:

1. iAWARE не является изотонической метрикой маршрутизации.
2. Недостатком данной метрики является придание большей значимости ETT, нежели помехам соединения.

В качестве примера модификации метрики для компенсации её недостатков iAWARE можно привести работу [19].

Airtime Link Cost. Airtime Link Cost [20] - метрика времени передачи по беспроводному каналу - введена стандартом IEEE 802.11s и является обязательной для совместимости всех устройств в рамках данного стандарта. Она задается формулой:

$$C_a = (O + B_t / r) / (1 - ef), \quad (28)$$

где O и B_t - константы, определенные стандартом для различных физических реализаций (802.11a, 802.11b): B_t - число битов в тестовом пакете (8192), O - накладные расходы доступа к каналу, которые включают в себя заголовки пакетов, кадры протоколов доступа и т.д. (выраженные во времени); r - скорость передачи данных в канале (Мбит/с); ef - вероятность возникновения ошибки (измеряется экспериментально на пакетах длиной B_t). Эта метрика представляет собой оценку времени передачи (в секундах) пробного пакета длиной B_t с учетом возможных ретрансляций при потерях в канале.

Способ определения параметров r и ef в стандарте не приводится, однако можно предположить, что для этого должна использоваться периодическая рассылка пробных пакетов длиной $B_i = 8192$ бит.

В основе метода выбора пути для передачи данных в стандарте IEEE 802.11s лежит механизм профилей. Этот механизм обеспечивает совместимость устройств от разных производителей, которые могут поддерживать как стандартизованные механизмы, так и собственные. Профиль – это запись вида <Идентификатор профиля> <Идентификатор протокола маршрутизации> <Идентификатор метрики протокола маршрутизации>. Устройство может поддерживать несколько профилей работы, но одновременно лишь один из них может быть активным. Обязательный для реализации профиль использует протокол HWMP и метрику времени передачи Airtime Link Metric.

В работе [21] предлагается использовать метрику, основанную на Airtime Link Cost и названную Load-aware Airtime Link Cost metric. Данная метрика призвана регулировать трафик в зависимости от нагрузки узлов. Функция балансировки нагрузки в предлагаемой метрике называется TL (traffic load) определяется на основе средней длины очереди узла и числа соседних узлов, разделяющих один канал. Нагрузка для каждого интерфейса узла вычисляется следующим образом:

$$TL = Ca_l \times \frac{Q_x \times N}{r}, \quad (29)$$

где Ca_l - значение метрики airtime link cost для конкретного узла и соединения l ;

Q_x - средняя длина очереди, которая представляет собой среднее число битов в очереди, измеренных на x - интерфейсе узла;

r - это скорость передачи данных в Мбит/с, такая же как в airtime link cost. Для получения фактического времени передачи данных используется деление на r . Для представления концентрации трафика каждого узла используется число N , представляющее собой количество узлов, разделяющих один канал. Например, если большее количество соседних узлов выберет l в качестве следующего хопа для передачи пакета, трафик узла увеличивается и соответственно такой узел имеет более высокую вероятность оказаться перегруженным. В итоге, предлагаемая авторами [21] метрика рассчитывается следующим образом:

$$Metric = (1 - \alpha) \times \sum_{i=1}^k Ca_i + a \times \max_{i \leq j \leq k} (TL_j), \quad (30)$$

где TL_j - расчетное значение нагрузки на узел j . Предполагается, что максимальное значение нагрузки трафика находится на маршруте, поскольку на маршруте может встретиться узел с повышенной нагрузкой, который будет являться т.н. «узким» местом. В итоге, общая пропускная способность маршрута будет определяться перегруженным узлом или соединением, которые имеет наибольшее значение TL_j ;

k - количество хопов маршрута;

α - это настраиваемый параметр, $0 \leq \alpha \leq 1$.

Предложенная метрика встроена в протокол маршрутизации RHMР для обеспечения балансировки нагрузки в тактических мобильных одноранговых сетях.

Следует отметить, что существует множество модификаций [22] представленных, а также других метрик, обсуждение которых выходит за рамки данной работы.

Заключение

Таким образом, различные протоколы маршрутизации, разработанные для беспроводных сетей должны учитывать, что ширококвещательная передача в беспроводной среде приводит к появлению зависимости соединений друг от друга. Поэтому, для любого критерия эффективности маршрутизации, необходима метрика, учитывающая особенности беспроводной передачи. Подобная метрика должна учитывать все параметры, влияющие на передачу, например, качество беспроводного канала, вероятность успешной передачи пакета, загрузка промежуточных узлов, тип трафика и т. д. Однако здесь возникает другая проблема, заключающаяся в методиках получения оценок этих параметров на основе анализа текущего состояния сети. В итоге, разработка некоторых эталонных уравнений, связывающих все эти параметры с критерием маршрутизации не может производиться без учета (или разработки нового) способа оценки или измерения этих компонентов метрики на основе статистических данных, получаемых с помощью современных методов оценки канала и дополнительных протоколов обмена служебной информацией между станциями. Однако, даже в свете вышеперечисленных проблем, следует стремиться разработать метрику, обладающую стабильными результатами производительности при различных условиях функционирования многошаговых беспроводных самоорганизующихся сетей.

Литература

1. NetConfig – Сетевые технологии. Маршрутизатор. – Режим доступа: <http://www.netconfig.ru/server/router/> (05.11.2015)
2. MANET. Материал из Википедии – свободной энциклопедии. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/MANET> (05.11.2015)
3. The Internet Engineering Task Force. – Режим доступа: <http://www.ietf.org> (05.11.2015)
4. Perkins, С. Ad Hoc On-demand Distance Vector Routing Version 2 (AODVv2) Internet-Draft. – Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-aodvv2-12> (06.11.2015)
5. Routing Metrics Used for Path Calculation in Low-Power and Lossy Networks (RFC 6551). – Режим доступа: <http://datatracker.ietf.org/doc/rfc6551/> (06.11.2015)
6. Сетевая модель OSI. Материал из Википедии - свободной энциклопедии. - Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B5%D1%82%D0%B5%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8C_OSI (07.11.2016)
7. RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks PROPOSED STANDARD (RFC6550). – Режим доступа: <http://tools.ietf.org/html/rfc6550> (07.11.2016)

8. The Internet Assigned Numbers Authority (IANA). – Режим доступа: <http://www.iana.org/> (07.11.2015)
9. Manikandan, S. Power Saving Improved Position Changes Based Routing Protocol Using Backtracking For Mobile Ad Hoc Networks / S. Manikandan, Joseph Raymond. V // IJEDR - 2014. - Vol. 2, Issue 1. - C.821-827.
10. VenkatMohan, S. ETX Based Routing Metrics / S. VenkatMohan., Dr. N. Kasiviswanath // (IJCSIT) International Journal of Computer Science and Information Technologies. - 2011. - Vol. 2(4). - C.1537-1548.
11. Liang, M. A routing metric for load-balancing in wireless mesh networks / M. Liang, M.K. Denko // Proceedings of the 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops/Symposia (AINAW '07). - 2007. - Vol. 2. -C.409–414.
12. Draves, R. Routing in Multi-Radio, Multi-Hop Wireless Mesh Networks / Richard Draves, Jitendra Padhye and Brian Zill // ACM Mobicom. - 2004. -Режим доступа: <http://www.cs.jhu.edu/~cs647/class-papers/Routing/p114-draves.pdf> (07.11.2015)
13. Panicker, A.S. Survey on Various Load Balancing Techniques in Wireless Mesh Networks / Anjaly Sara Panicker, Seetha S, Sharmila J. // International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE). – 2013. – Vol. 2, Issue 3. - C.341-344.
14. Yang, Y. Designing Routing Metrics for Mesh Networks / Yaling Yang, Jun Wang and Robin Kravets // IEEE INFOCOM - The 27th Conference on Computer Communications, IEEE. - 2008. - C.1615-1623.
15. A load dependent metric for balancing Internet traffic in Wireless Mesh Networks. Aiache, H. etc. Proc. IEEE MeshTech. - 2008. - C.629–634.
16. Optimizing Routing Metrics for Large-Scale Multi-Radio Mesh Networks. Jiang, W., etc. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. – 2007. – C.1550-1553.
17. LanTienNguyen. An interference and load aware routing metric for Wireless Mesh Networks / LanTienNguyen, RazvanBeuran, YoichiShinoda. Int. J. // Ad Hoc and Ubiquitous Computing. - 2011. - Vol.7, No. 1. - C.25-37.
18. Interference Aware Routing in Multi-Radio Wireless Mesh Networks A.P. Subramanian, etc. IEEE Workshop Wireless Mesh Networks (WiMesh 2006). -C.55–63.
19. Siraj, M. A load balancing interference aware routing metric (LBIARM) for multi hop wireless mesh network / Mohammad Siraj, Kamalrulnizam Abu Bakar //International Journal of the Physical Sciences. - 2012. - Vol.7(3). - C.456- 461.
20. Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s /В.М. Вишневецкий // Журнал Электроника НТБ. - 2008. - № 6. - C.64–69.
21. Choi, J. Multi-path Routing with Load-aware Metric for Tactical Ad Hoc Networks / J.Y. Choi, Y.B. Ko // International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). - 2010.
22. Routing Metrics. – Режим доступа: http://ilab.cs.byu.edu/wiki/Routing_Metrics (10.11.2015)

Сведения об авторе

Датъев Игорь Олегович – к.т.н., научный сотрудник,

e-mail: datyev@iimm.ru

Igor O. Datyev - Ph.D. (Tech. Sci.), researcher

УДК 004.057.4, 004.94

И.О. Датьев, А.А. Павлов, М.Г. Шишаев

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ МНОГОШАГОВЫХ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ МОБИЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Аннотация

На сегодняшний день, имитационное моделирование является основным средством, позволяющим оценить эффективность решений, разрабатываемых для самоорганизующихся мобильных сетей. В работе представлен протокол маршрутизации для самоорганизующихся мобильных сетей и модель, созданная для имитации процесса перемещения сетевых узлов. Кроме того, приведены основные сведения о разрабатываемой в сетевом симуляторе NS-3 модели самоорганизующейся мобильной сети для тестирования разработанного протокола.

Ключевые слова

мобильные беспроводные сети, имитационное моделирование, протокол маршрутизации.

I.O. Datyev, A.A. Pavlov, M.G. Shishaev

MODELLING WIRELESS MULTISTEP SELF-ORGANIZING MOBILE NETWORKS

Abstract

Today simulation is practically the only way to evaluate the effectiveness of algorithms developed for mobile self-organizing networks. The paper presents a routing Protocol for mobile self-organizing networks and a model created to simulate the network nodes mobility. In addition, the basic information about NS-3 model for testing the developed Protocol is given.

Keywords

mobile Ad-hoc Networks, simulation, routing protocol.

Введение

Беспроводные многошаговые самоорганизующиеся мобильные сети или сети MANET (англ. Mobile Ad hoc Network) состоят из мобильных устройств, каждое из которых может передвигаться в любом направлении [1].

Самоорганизующиеся сети MANET обладают следующими преимуществами:

- возможность передачи данных на большие расстояния без увеличения мощности передатчика;
- устойчивость к изменениям в инфраструктуре сети;
- возможность быстрой реконфигурации в условиях неблагоприятной помеховой обстановки;
- простота и высокая скорость развертывания;

Перечисленные выше преимущества определяют следующие положительные особенности MANET:

- возможность организации информационно-коммуникационных сетей

без создания наземной инфраструктуры базовых станций на территориях с «очаговым» характером, как заселения, так и ведения хозяйственной деятельности, что на сегодняшний день характерно практически для всей Арктической зоны и многих других районов Российской Федерации,

- быстрота и относительная простота организации (развертывания) информационно-коммуникационной сети.

- возможность использования незадействованного телекоммуникационного и вычислительного ресурса мобильных устройств, находящихся в распоряжении современных пользователей.

- К областям применения MANET относятся:

- Сенсорные (телеметрические) сети различного назначения.

- Сети, развертываемые в условиях чрезвычайных ситуаций и природных бедствий при поисковых и спасательных операциях.

- Сети, создаваемые в удаленных районах, где отсутствует стационарная инфраструктура (сельская местность, пустыни, Арктика и Антарктика, тундра, тайга и т.д.).

- Домашние сети («умный дом»).

- Развлекательные сети (сетевые игры, домашние роботы).

Всё это делает мобильные самоорганизующиеся сети одним из наиболее перспективных направлений развития информационно-коммуникационных сетей.

Однако, необходимо отметить и проблемы, непосредственно следующие из самого определения самоорганизующихся мобильных сетей:

- мобильность узлов ведет к дополнительному повышению динамичности топологии сети, так как к возможности обрыва связи из-за помех или включения/выключения узла добавляется вероятность его перемещения;

- запас источников питания мобильных узлов может быть ограничен, в связи с чем, при проектировании аппаратных средств и протоколов необходимо учитывать еще и энергопотребление (проблема особенно актуальна для сенсорных сетей [3]).

На сегодняшний день, несмотря на усилия исследователей [4], отсутствует формальная (аналитическая) основа для оценки эффективности решений, предлагаемых в сфере MANET. Эксперименты на основе реальных мобильных самоорганизующихся сетей затруднены по причинам сложности организации (требуется большое количество участников), воспроизведения одинаковых условий моделирования для серий экспериментов, а также в связи с большими временными затратами. Поэтому, основным инструментом такой оценки является имитационное моделирование.

Существующие протоколы маршрутизации мобильных самоорганизующихся сетей

Основной проблемой создания самоорганизующихся мобильных сетей является правильное построение маршрута передачи данных от источника до адресата. Беспроводные соединения имеют ограниченный радиус действия, а сами узлы сети постоянно перемещаются. Поэтому доступность узла в некоторый момент времени не может быть гарантирована, и построить точную топологию сети практически невозможно. Для решения этой проблемы

создаются протоколы маршрутизации, предназначенные именно для мобильных самоорганизующихся сетей. Традиционно, эти протоколы могут быть разделены на проактивные (табличные или упреждающего вида) и реактивные (реагирующего типа или с запросом по требованию). Отдельной группой являются протоколы т.н. гибридного типа, предусматривающие разделение сети на подсети. Как правило, в каждой из таких подсетей маршрутизация осуществляется одним способом (например, проактивным), а между сетями – другим. Кроме того, следует выделить протоколы, использующие информацию о местоположении узла [5].

Таблица 1

Протоколы маршрутизации MANET

Протоколы маршрутизации для мобильных самоорганизующихся сетей с привязкой						
К сетевой топологии			К местоположению			
Упреждающего типа или табличные	Реагирующего типа или с запросом по требованию	Гибридные	С зональным обслуживанием	С использованием ретрансляции		
				На основе принципа минимальной ретрансляции	Ограниченная направленная ретрансляция	Иерархическая маршрутизация
DSDV CGSR WRP RIP OSPF FSR TBRPF OLSR	AODV ABR DSR TORA SSR RDMAR SSA LMR	ZRP LANMAR CEDAR	DREAM Quorum-based GLS Homezone	MFR NFP Compass GPSR	LAR	Terminodes Routing Grid Routing GeoCast

Протоколы каждого класса показывают хорошие результаты только при определённых условиях функционирования сети. Однако заранее предсказать топологию сети или характер трафика зачастую не представляется возможным, поэтому необходимо добиваться максимального снижения зависимости эффективности способа рассылки сетевой информации от сценария работы сети.

Таким образом, на сегодняшний день эффективность организации MANET с высокой степенью мобильности узлов и относительно большим количеством участников низка относительно скорости доставки и коэффициента доставки пакетов данных.

Разрабатываемый протокол маршрутизации MANET

В настоящее время, коллективом авторов ИИММ КНЦ РАН разрабатывается алгоритм маршрутизации MANET, основанный на использовании векторов расстояний. Данный протокол может быть отнесен к классу реактивных. Общей проблемой подобных протоколов является ухудшение характеристик при увеличении количества узлов и динамичности узлов сети.

Разрабатываемый протокол призван улучшить коэффициент доставки пакетов данных при большем количестве узлов и увеличении территории развертывания сети. На сегодняшний день, авторы формулируют основное назначение протокола как предоставление возможности развертывать сеть MANET на территории относительно небольшого (площадью около 5 км²) населенного пункта или аналогичной по площади территории устойчивой хозяйственной активности. Одно из главных предположений, позволяющих улучшить характеристики существующих протоколов, заключается в наличии устойчивых и повторяющихся в течение суток шаблонов движения узлов (людей, обладающих мобильными устройствами). Эти шаблоны обусловлены графиками труда и отдыха, личными предпочтениями, особенностями архитектурной инфраструктуры населенного пункта и другими факторами.

Поэтому, в качестве одного из компонентов метрики предлагается использовать частоту встречаемости пар узлов в определенные промежутки времени.

Суть подхода заключается в следующем. Все узлы сети с определенной периодичностью осуществляют широковещательную рассылку Hello-сообщений, узнавая своих соседей в шаговой доступности. Следует отметить, что на сегодняшний день, проблема исследования соседей выделена в отдельную область и существуют разработки специализированных протоколов, используемых для исследования соседей [2]. Эти данные обрабатываются и записываются в таблицы маршрутизации узлов, наряду со временем (моментом) доступности узла-соседа. При необходимости передачи данных, узел-источник производит поиск узла назначения в своей таблице маршрутизации. В случае отсутствия соответствующей записи, узел-источник начинает рассылку сообщений-запросов для обнаружения узла-получателя. Если узел, принявший запрос, не знает маршрута к узлу назначения (варианты действия узла при получении пакета изображены на рис. 1), то он добавляет свой идентификатор и информацию по частоте встреч со своими соседями в пакет-запрос и транслирует пакет дальше (это позволяет получить обратный путь передачи и избежать закливания маршрута).

Обозначения, используемые на рис.1:

- D – узел назначения, S – узел-источник; DP – пакет данных;
- RT – таблица маршрутизации; RREQ – пакет-запрос маршрута;
- RR – пакет-ответ на запрос маршрута;
- RE – пакет, содержащий информацию об ошибке передачи на маршруте;
- NREQ – пакет-опрос соседей (узлов, находящихся в радиусе передачи);
- NR – ответ на запрос поиска соседей;
- hq – общее количество хопов маршрута;
- hc – текущий хоп маршрута, по которому передается пакет;
- f(hq) – некоторая функция.

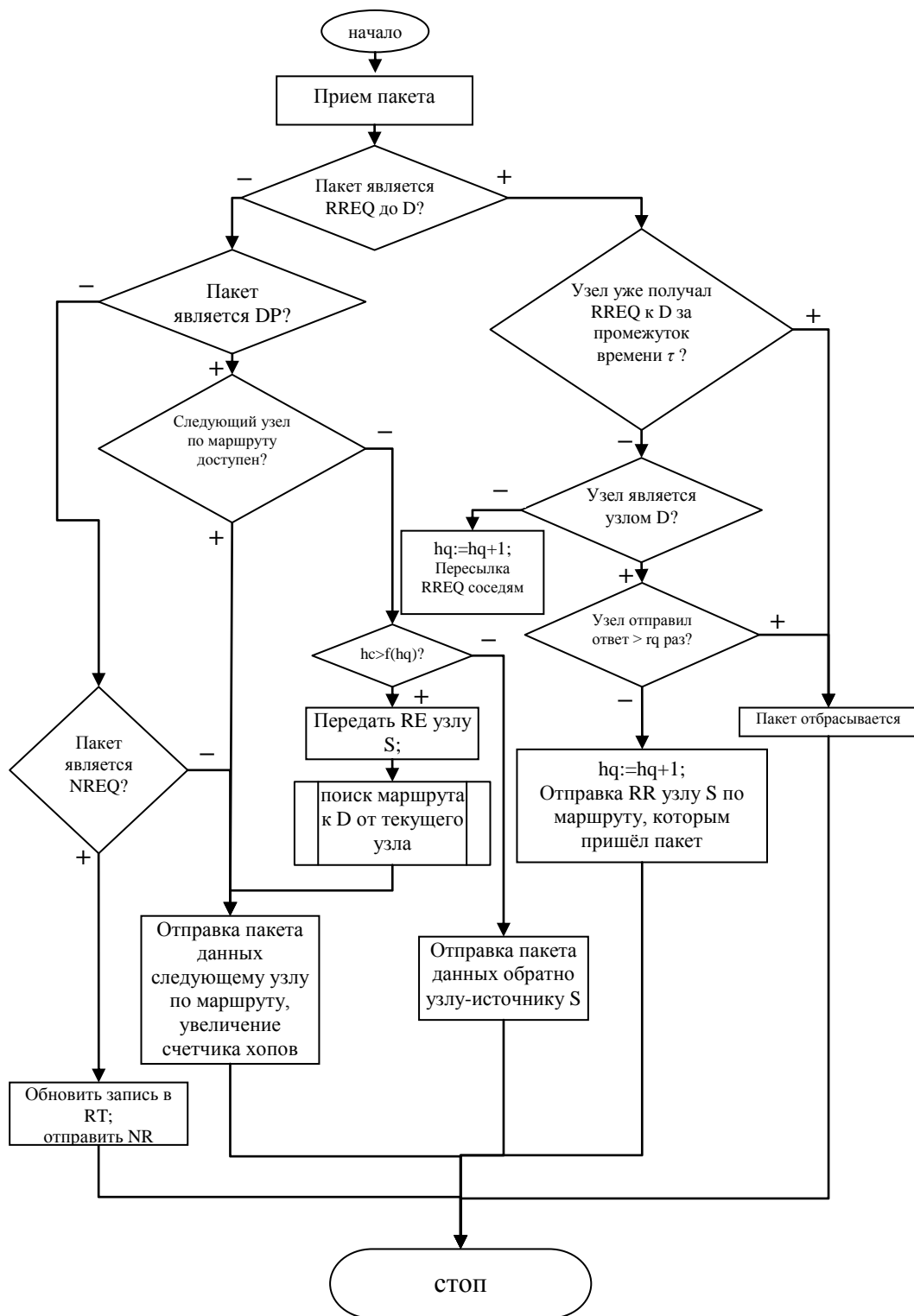


Рис. 1. Блок-схема процедуры обработки пакета узлом

При получении запроса узел назначения посылает ответ узлу-источнику с указанием маршрута. Узел-источник, получив ответ, помещает информацию о маршруте в свою кэш-память. Промежуточные узлы, передающие ответ, также сохраняют полученные маршруты к адресату и отправителю. Если узел-источник за определенное небольшое время получает несколько ответов-маршрутов до узла назначения, то будет выбран маршрут с меньшим «расстоянием» (которое вычисляется с помощью предложенной метрики).

Обозначим множество таблиц маршрутизации узла $RT = \{rt_i\}$, где $i = \overline{1, I}$, I – количество временных полуинтервалов $T_i = (t_{i-1}, t_i]$, где t_{i-1} – начало интервала, t_i – конец интервала. Таблица маршрутизации представлена следующим образом: $rt_i = \{ \langle ID, mc_i \rangle_k \}$, где $k = \overline{1, K}$, K – количество записей в таблице, ID – идентификатор узла самоорганизующейся мобильной сети, mc_i – количество встреч данного узла (хранящего таблицу rt_i) и узла ID на временном полуинтервале i .

Каждый узел рассылает запросы обнаружения соседей NREQ с частотой F . Если запрос был разослан в момент времени $t \in T_i$, то обновляется соответствующая таблица маршрутизации rt_i . Обновление заключается в увеличении или уменьшении счетчика встреч, либо добавлении или удалении строки таблицы.

Пусть $ls(T_i)$ – длительность временного интервала T_i , обозначим ${}^iD_s mc_i$ – счетчик встреч узла s с узлом ID во временном интервале T_i , тогда, (при условии, что присутствие каждого узла в сети не зависит от другого узла) вероятность доступности узла ID для узла s во временном интервале i равна:

$${}^iD_s P_i = \frac{{}^iD_s mc_i}{F \times ls(T_i)}. \quad (1)$$

Обозначим ${}^{dest}_s rs_i^j$ – последовательность узлов маршрута с номером j (j -той альтернативы достижения узла $dest$ из узла s) от узла s до узла $dest$ на временном интервале i , полученная после рассылки запроса, либо сохраненная в кэш-памяти узла ранее, ${}^{dest}_s rs_i^j = \langle n_1, n_2, \dots, n_H \rangle$, где n_1 – является узлом-источником s , n_H – узел назначения $dest$, а узлы n_2, \dots, n_{H-1} – промежуточными узлами маршрута, т.е. общее количество хопов маршрута j равно $H-1$. Обозначим $HQ = \frac{H-1}{HMAX}$, где $HMAX$ – максимально возможное количество хопов (зависит от предполагаемого диаметра сети).

Тогда расстояние до узла dest (ID) рассчитывается следующим образом:

$$D(\overset{dest}{s}rs_i^j) = c1 \times \prod_{k=1}^{H-1} p_k + c2 \times HQ + c3 \times TRC, \quad (2)$$

где $TRC = \frac{TR}{TRMAX}$, TR – время получения ответа на запрос маршрута(NREQ) или пакет проверки маршрута (RC) от узла назначения, $TRMAX$ – максимальное время ожидания ответа, $c1, c2, c3$ – весовые коэффициенты, отражающие важность вероятности доступности узла, количества хопов маршрута и времени следования по маршруту соответственно.

Предлагаемый подход должен понизить вероятность разрыва маршрута и, соответственно, нагрузку на узлы сети, связанную с поддержанием маршрутов.

Оценка эффективности разработанных алгоритмов маршрутизации

На основе анализа работ [7, 8, 18-24], посвященных проблеме моделирования процессов передачи данных в современных компьютерных сетях могут быть выделены следующие подходы:

1. Аналитические (в первую очередь модели теории массового обслуживания [18, 19, 20, 21].

2. Программы-генераторы сетевого трафика (в том числе статистические подходы к моделированию сетевого трафика) [22, 23].

3. Сетевые пакетные симуляторы – специализированные программные продукты, предназначенные для детального описания процесса передачи данных по сети (на уровне отдельных пакетов) и учитывающие механизмы регулирования скорости потоков трафика [24].

4. Жидкостные модели [7], учитывающие механизмы управления скоростью потоков передачи, что позволяет существенно уменьшить число рассматриваемых событий при моделировании Интернет-трафика за счет перехода от рассмотрения процессов распространения в канале передачи данных отдельных пакетов к рассмотрению укрупненных групп пакетов (в большей степени подходят для моделирования магистральных каналов связи).

Относительно применимости перечисленных подходов к MANET необходимо отметить отсутствие аналитических моделей как таковых, в виду сложности создания из-за высокой динамичности протекающих в таких сетях процессов. Источники трафика, применяемые в жидкостных моделях, оказываются весьма приближенными, поскольку в рамках известных моделей не удается учесть рассогласованный (дискретный) характер действий пользователей. При использовании программ-генераторов трафика оказывается невозможным учесть особенности передачи генерируемого трафика по каналу передачи данных, а также учесть механизмы обратной связи при потере пакетов. Поэтому, наиболее целесообразным представляется использование имитационных программных продуктов, предоставляющих возможность создания моделей передачи пакетов данных, что подходит для моделирования каналов с умеренной пропускной способностью (потоки порядка нескольких десятков Мбит/с).

В итоге, на сегодняшний день, тестирование созданных протоколов с целью получения оценок эффективности в различных условиях функционирования сети (количества узлов, плотности узлов и характера их перемещений) обычно проводится с помощью имитационного моделирования [9].

Модели перемещений узлов сети

Одну из ключевых ролей при создании имитационных моделей самоорганизующихся сетей играет используемая модель перемещения мобильных узлов. Исследователи отмечают наличие существенных различия результатов экспериментов при использовании разных моделей перемещений мобильных устройств [10-16]. Модели перемещений, используемые при тестировании протоколов маршрутизации для самоорганизующихся сетей можно разделить на модели индивидуальных перемещений (модель случайных перемещений, модель перемещения в городских кварталах и т.д.) и модели групповых перемещений (экспоненциально коррелированная модель случайных перемещений, колонная модель, модель групповых перемещений с опорной точкой и т.д.). Наиболее часто используемыми при тестировании мобильных самоорганизующихся сетей являются модель случайных перемещений мобильных устройств и модель перемещений мобильных устройств на основе случайных точек.

В модели случайных перемещений мобильный узел перемещается из текущего в новое местоположение, случайным образом выбирая направление и скорость перемещения. Новая скорость и направление выбираются из предопределенных диапазонов - [мин. скорость, макс. скорость] и $[0, 2 * \pi]$ соответственно.

Каждое перемещение происходит либо через постоянные интервалы времени, либо узел перемещается на постоянное расстояние (рис.2, по осям отложено расстояние в метрах, т.е. координаты на плоскости).

В конце каждого перемещения вычисляются новая скорость перемещения и направление движения.

Отличительной особенностью модели перемещений мобильных устройств на основе случайных точек являются паузы между изменениями направления и/или скорости. Перемещение мобильного узла начинается с остановки в одном месте в течение определенного периода времени (т.е. паузы). По истечении этого времени мобильный узел выбирает случайную точку в области моделирования и скорость, которая равномерно распределена в определенном диапазоне. Мобильный узел перемещается в направлении точки назначения с заданной скоростью. Достигнув точки назначения, мобильный узел останавливается на некоторое время, затем процесс повторяется (рис.3).

Интересной модификацией данной модели является модель перемещений с взвешенными точками, где учитывается вероятность перехода из одной точки в другую. В работе авторов-создателей [12] этой модификации в роли точек выступили различные корпуса студенческого городка университета Южной Калифорнии.

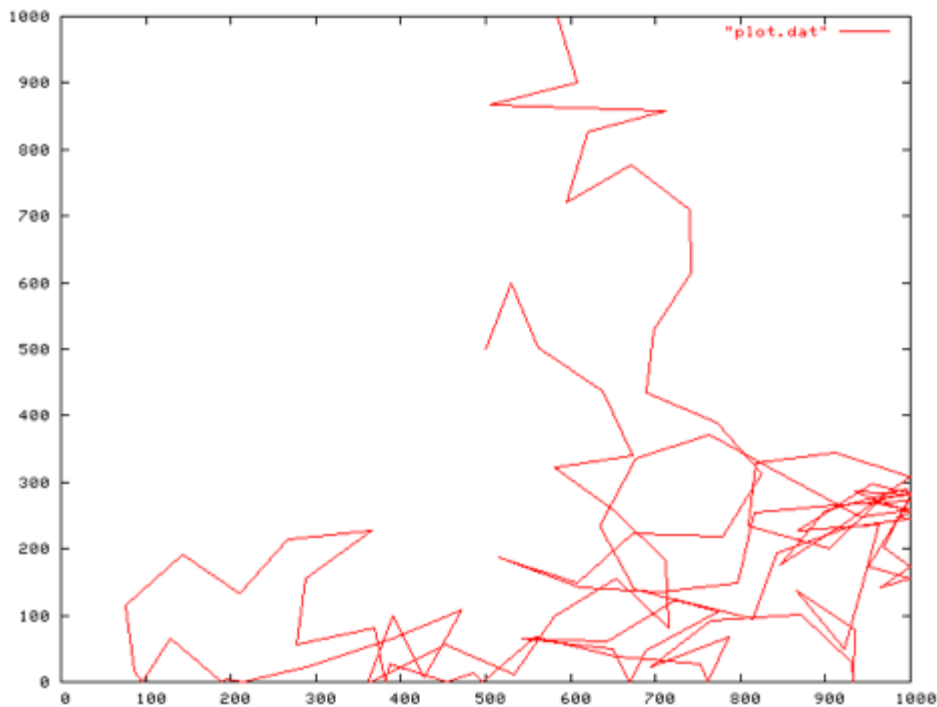


Рис. 2. Модель случайных перемещений мобильных устройств

Коллективом авторов ИИММ КНЦ РАН для тестирования, разрабатываемого алгоритма маршрутизации для MANET, был создан программный прототип модели автомобильного трафика улично-дорожной сети г. Апатиты. Целью, поставленной перед разработчиками, являлось получение «карты» расположения транспортных средств в определенные моменты времени. Основное предположение заключается в том, что в каждом транспортном средстве находится хотя бы одно мобильное устройство, коммуникационный и вычислительный ресурс которого может быть использован для организации информационно-коммуникационной сети без использования базовых станций связи.

В общепринятых терминах, разработанная модель является моделью клеточных автоматов дискретной по времени и пространству. В качестве основы модели использован алгоритм перемещения транспортных средств, предложенный коллективом авторов ИИММ КНЦ РАН [17]. Система координат представляет собой «решетку» в некотором роде, аналогичную решетке клеточного автомата. Дорожная сеть разбита на отрезки различной длины и направлений. Каждый отрезок имеет конечное количество точек (соответствующее длине отрезка), ширину (количество полос), а также информацию о занятости каждой точки отрезка. Транспортное средство представлено следующими параметрами: текущие координаты, средняя скорость (за шаг моделирования), маршрут (набор отрезков дорожной сети), время начала маршрута (номер шага моделирования).

Отличительной особенностью модели является так называемый квази-случайный (маршруты выбираются случайным образом из определенного заранее устоявшегося в данном населенном пункте набора маршрутов) выбор маршрутов и времени появления транспортного средства на определенном участке дороги. Таким образом, в модели присутствует детерминированная составляющая – заранее определенные маршруты, общее количество транспортных средств, и случайная – вероятность выхода/невыхода на маршрут, вероятность изменения маршрута, обгона. На рис. 4 представлена оконная форма, отражающая процесс имитации движения транспортных средств по улично-дорожной сети г. Апатиты.

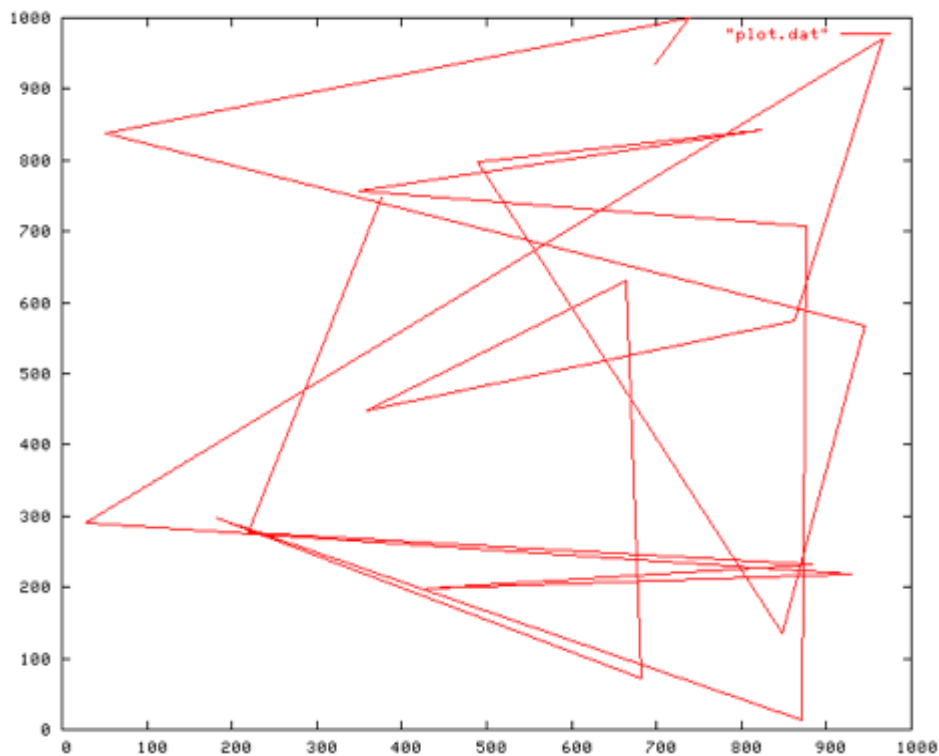


Рис. 3. Модель перемещений мобильных устройств на основе случайных точек

Данная модель использована для получения «карты» расположения в двумерном пространстве координат мобильных узлов в определенные моменты времени. Ключевыми характеристиками, влияющими на процессы передачи данных в одноранговых информационно-коммуникационных сетях и интересующими исследователей при создании модели, являлись плотность мобильных узлов и динамика перемещения. В дальнейшем модель планируется расширить территориально и функционально для увеличения уровня реалистичности.

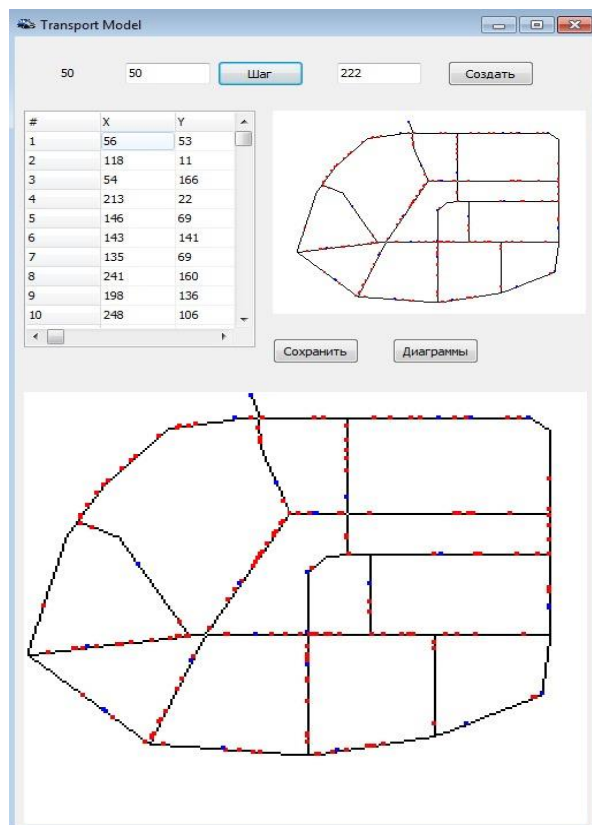


Рис. 4. Оконная форма имитации движения транспортных средств по УДС г. Анапиты

Модель MANET в NS-3

На сегодняшний день, тестирование созданных протоколов с целью получения оценок эффективности в различных условиях функционирования сети (количества узлов, плотности узлов и характера их перемещений) обычно проводится с помощью имитационного моделирования [5]. Для получения сравнительной оценки предложенного протокола маршрутизации по отношению к существующим протоколам маршрутизации сетей MANET, авторами создан программный прототип модели в сетевом симуляторе NS-3[6]. На данный момент, среда моделирования NS-3 является одной из основных сред для исследования различных сетей. NS-3 предоставляет разработчику гибкий и, в то же время, мощный инструмент за счёт использования встроенных объектно-ориентированных языков программирования (C++ и Python) и наличия большого количества файлов-библиотек, содержащих реализации классов-объектов стандартных протоколов и моделей перемещения узлов.

В качестве одной из сложностей разработки модели в NS-3 следует отметить отсутствие подробной документации по созданию моделей новых протоколов маршрутизации. К преимуществам использования NS-3 следует отнести наличие общих классов объектов и структуры сетевой модели, программно реализованных в виде различных библиотек, что ускоряет

разработку и, отчасти, «унифицирует» созданные модели сетей. Основной набор библиотек NS-3 содержит классы и соответствующие методы, реализующие поведение существующих протоколов маршрутизации и передачи данных.

Модель сети представляет собой программное приложение, выполненное на языке программирования C++. Основными задачами, решаемыми в рамках авторской модели являются поиск и поддержание маршрута. Описание этих процессов содержит класс NS3::Routing, который расширен от абстрактного существующего класса NS3::Ipv4L4Protocol. Здесь же реализован механизм широковещательной рассылки с целью определения соседей в определенные моменты времени. Хранение маршрутов - это другой важный компонент моделей в NS-3. Для этого, в модели объявлен класс NS3::Prot::RouteCache, в котором сохраняются обнаруженные в процессе поиска маршруты. Класс NS3::Prot::NSendBuffer разработан для хранения всех неотправленных пакетов данных. NS3::Prot::RreqTble предназначен для того, чтобы избежать повторяющихся запросов маршрута. NS3::Prot::BuffMaintain используется для хранения пакетов данных при отправке из буфера передачи и ожидающих подтверждения от следующего узла сети. ProtOptionsHeader включает в себя все параметры, необходимые для работы протокола.

Выводы

На сегодняшний день, технологии MANET благодаря скорости организации информационно-коммуникационных сетей без использования базовых станций являются стратегически важными для отдельных малозаселенных арктических районов РФ, в том числе при разработке интеллектуальных систем информационно-аналитической поддержки развития Арктических территорий РФ.

Авторами разработан протокол маршрутизации для мобильных самоорганизующихся сетей. В любом маршрутном протоколе (в том числе и для традиционных сетей) используются определенные механизмы, направленные на достижение наибольшей эффективности маршрутизации, такие как: уменьшение генерируемых протоколом служебных данных, поиск наикратчайших и относительно стабильных маршрутов, минимизация временных задержек при передаче пакетов и т. п.

Оценить эффективность предложенных решений можно с помощью имитационного моделирования. Поскольку каждый из протоколов маршрутизации показывает результаты в определенных условиях функционирования, необходимо разработать сценарии имитационных экспериментов. Одной из ключевых компонент таких сценариев является модель перемещения узлов. Наиболее распространенной используемой на сегодняшний день моделью является модель случайных перемещений. Однако эта модель является скорее идеалистической, нежели отражающей реальное перемещение узлов. Поскольку одним из предположений при разработке протокола маршрутизации являлось наличие некоторых устойчивых шаблонов движения в небольшом населенном пункте, то и проверять эффективность предложенного протокола необходимо в условиях, приближенных к реальным. В качестве одного из вариантов решения проблемы, авторы, предположив, что в каждом транспортном средстве находится хотя бы одно мобильное устройство, а сами транспортные средства движутся по

квазислучайным маршрутам, предложили модель перемещения транспортных средств по г. Апатиты. Кроме того, создан прототип модели функционирования MANET на основе разработанного протокола маршрутизации в сетевом симуляторе ns3. На сегодняшний день, в модели реализовано случайное перемещение узлов. В дальнейшем, планируется реализовать другие модели перемещения узлов (в том числе предложенную модель перемещения транспортных средств) и произвести сравнительный анализ характеристик разработанного протокола с существующими протоколами (AODV, OLSR и т.д.) в различных условиях функционирования с целью улучшения параметров разработанного протокола.

Литература

1. MANET. Материал из Википедии — свободной энциклопедии. — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/MANET>
2. Adrian Farrel, Ulrich Herberg. An Optimization for the Mobile Ad Hoc Network (MANET) Neighborhood Discovery Protocol (NHDP). RFC7466. -Режим доступа: <http://datatracker.ietf.org/doc/rfc7466/>
3. Определение сенсорных сетей. — Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/95011/>
4. Кирьянов, А.Г. Аналитический метод исследования механизма управления соединениями в мобильных многошаговых беспроводных сетях на примере протокола NHDP / А.Г. Кирьянов, Е.М. Хоров, Д.М. Островский / Информационные технологии и системы: труды конф., г. Геленджик, 2-7 октября 2011 г. -С.258-264.
5. Прозоров, Д.В. Протоколы геомаршрутизации самоорганизующихся мобильных сетей / Д.В. Прозоров // Т-Comm - Телекоммуникации и Транспорт. -2012. -№ 5. -С.16-19.
6. NS-3. - Режим доступа: <https://www.nsnam.org/>
7. Fluid models and solutions for large-scale ip networks / Y. Liu and others / in Proceedings of ACM/SIGMETRICS. -2003. -P.91-101.
8. Гребенкин, М.К., Поршнев С.В. Исследование сетевого трафика магистрального Интернет-канала / М.К. Гребенкин, С.В. Поршнев // Научно-технические ведомости СПбГПУ, серия «Информатика, Телекоммуникации, Управление». -2011. — №4. — С.107-113.
9. Wehrle, K. Modeling and Tools for Network Simulation / K. Wehrle, M. Günes, J. Gross. -Springer. -2010. -P.357–382.
10. Camp, T. A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research / T. Camp, J. Boleng, V. Davies / Wireless Communication & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications. -2002. - Vol.2, №5. -P.483-502.
11. A detailed study of mobility models in wireless sensor network / Vasanthi.V and others / Journal of Theoretical and Applied Information Technology. -2011. - Vol. 33, No.1. -P.7-14.
12. Weighted Waypoint Mobility Model and its Impact on Ad Hoc Networks / Weijun Hsu and others / Mobile Computing and Communications Review. 2005. -Vol.9, № 1. - P.59.
13. Lu, G. Mobility Modeling in Mobile Ad Hoc Networks with Environment-Aware / Gang Lu / Journal of Networks. -2006. -Vol.1, №1. -P.54-63.

14. Датьев, И.О., Шемякин, А.С. Информационные системы для извлечения данных о перемещениях мобильных устройств / И.О. Датьев, А.С. Шемякин / Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. -Вып. 4. -5/2013(18). -Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2013. -С.46-63.
15. Зацепин, Э.С. Обзор характеристик протоколов маршрутизации в mesh-сетях / Э.С. Зацепин // Международный журнал экспериментального образования. -2013. -№10. -С.342-345.
16. Метелёв, А.П. Протоколы маршрутизации в беспроводных самоорганизующихся сетях / А.П. Метелёв, А.В. Чистяков, А.Н. Жолобов / Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. -2013.-№ 3(1).-С.75-78.
17. Шишаев, М.Г. Имитационная модель пространственных перемещений объектов с квазислучайными параметрами маршрутов / М.Г. Шишаев, С.Ю. Елисеенко / Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. -Вып. 3. – 4/2012(11). –Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2012. - С.106-114.
18. Хинчин, А.Я. Математические методы теории массового обслуживания / А.Я. Хинчин // Труды Математического ин-та АН СССР. -1955. -№49. -С.3–122.
19. Ососков, Г.А. Одна предельная теорема для потоков однородных событий / Г.А. Ососков //Теория вероятностей и ее применение.-1956.- №2. -С.274–282.
20. Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок //пер. с англ. И.И. Грушко; ред. В.И. Нейман. – М.: Машиностроение, 1979. –432 с.
21. Вишневский, В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / В.М. Вишневский. - М.: Техносфера, 2003. –512 с.
22. Hernandez-Campos F., Smith F.D., Jeray K. Generating realistic TCP workloads / F. Hernandez-Campos, F.D. Smith, K. Jeray / In Proc. of Computer Measurement Group (CMG) Conf. -2004. -P.273–284.
23. Огородников, В.А. Квазигауссовская модель сетевого трафика / В.А. Огородников, С.М. Пригарин, А.С. Родионов / Автоматика и телемеханика. -2010. -№ 3. -С.117-130.
24. D-ITG, Distributed Internet Traffic Generator. – Режим доступа: <http://traffic.comics.unina.it/software/ITG/>

Сведения об авторах

Датьев Игорь Олегович – к.т.н., научный сотрудник,

e-mail: datyev@iimm.ru

Igor O. Datyev - Ph.D. (Tech. Sci.), researcher

Павлов Алексей Андреевич – аспирант, стажер-исследователь,

e-mail: pavlov@iimm.ru

Aleksey A. Pavlov – post-graduate, research assistant

Шишаев Максим Геннадьевич – д.т.н., профессор, заведующий лабораторией региональных информационных систем,

e-mail: shishaev@iimm.ru

Maksim G. Shishaev - Dr. of Sci (Tech), professor, head of laboratory for regional information systems

**А.А. Туз¹, Виллиам Браун-Аквей², Форгор Лемпого², А.Г. Кулаков³,
В.Н. Богатиков⁴**

¹Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН, АО «Ковдорский ГОК»

²Ганский университет технологии, Аккра

³АО «Апатит»

⁴Тверской государственный технический университет (ТвГТУ)

УПРАВЛЕНИЕ С ПРОГНОЗИРУЮЩИМИ МОДЕЛЯМИ

Аннотация

В статье рассматривается управление с прогнозирующими моделями процессом измельчения бадделеит-апатит-магнетитовых руд. Приводится комбинированная модель измельчения в шаровой барабанной мельнице. Уточнение коэффициентов модели выполняется на основе нейро-фаззи сетей. Прогнозное управление строится на основе импульсного отклика процесса измельчения. Использование данного подхода позволяет повысить эффективность управления процессом.

Ключевые слова:

управление с прогнозирующими моделями, компьютерное моделирование, кинетика, смешение, измельчение, классификация, месторождения многокомпонентных руд, бадделеит-апатит-магнетитовые руды, оценка состояния, нейросети.

**A.A. Tuz, William Brown-Acquaye, Forgor Lempogo,
A.G. Kulakov, V.N. Bogatikov**

MODEL PREDICTIVE CONTROL

Abstract

The article discusses the predictive control models by process of grinding the baddeleyite-apatite-magnetite ores. Presents a combined model of the grinding process in ball drum mill. Correction of model coefficients is based on neuro-fuzzy networks. Predictive control based on the impulse response of the grinding process. Using this approach allows to improve the management process.

Keywords:

model predictive control, computer modeling, kinetics, mixing, grinding, classification, multicomponent ore deposits, baddeleyite-apatite-magnetite ores, assessment, neural networks.

Введение

Управление с прогнозирующими моделями (УПМ) является перспективным методом управления технологическими процессами, который используется в обрабатывающей промышленности, например, на горных, химических и нефтеперерабатывающих предприятиях. УПМ использует модели для прогнозирования будущего поведения управляемых переменных. На основе прогноза контроллер рассчитывает управляющие воздействия, решая задачи оптимизации в масштабе реального времени. В этом случае контроллер пытается минимизировать ошибку между предсказанным и фактическим значением по горизонту управления, т.е. реализуется первое управляющее действие. В основе работы контроллеров УПМ лежат динамические модели

процесса, чаще всего линейные эмпирические модели, полученные путем идентификации системы [1].

Поведение системы УПМ может быть весьма сложным, поскольку управляющее воздействие определяется как результат решения задачи оптимизации в масштабе реального времени. Задача управления построена на основе модели и измерений параметров процесса. Измерения параметров процесса создают обратные связи в структуре УПМ. На рис. 1 изображена структура типичной системы УПМ [2]. Как правило, различные виды УПМ предлагают различные подходы к решению следующих задач:

- модели «ввода - вывода»;
- прогнозирования неисправностей;
- целевой функции;
- измерения;
- ограничений;
- периода дискретизации (как часто решается задача оптимизации).

Независимо от конкретного выбора вышеуказанных элементов, их объединяет задача оптимизации в режиме реального времени.

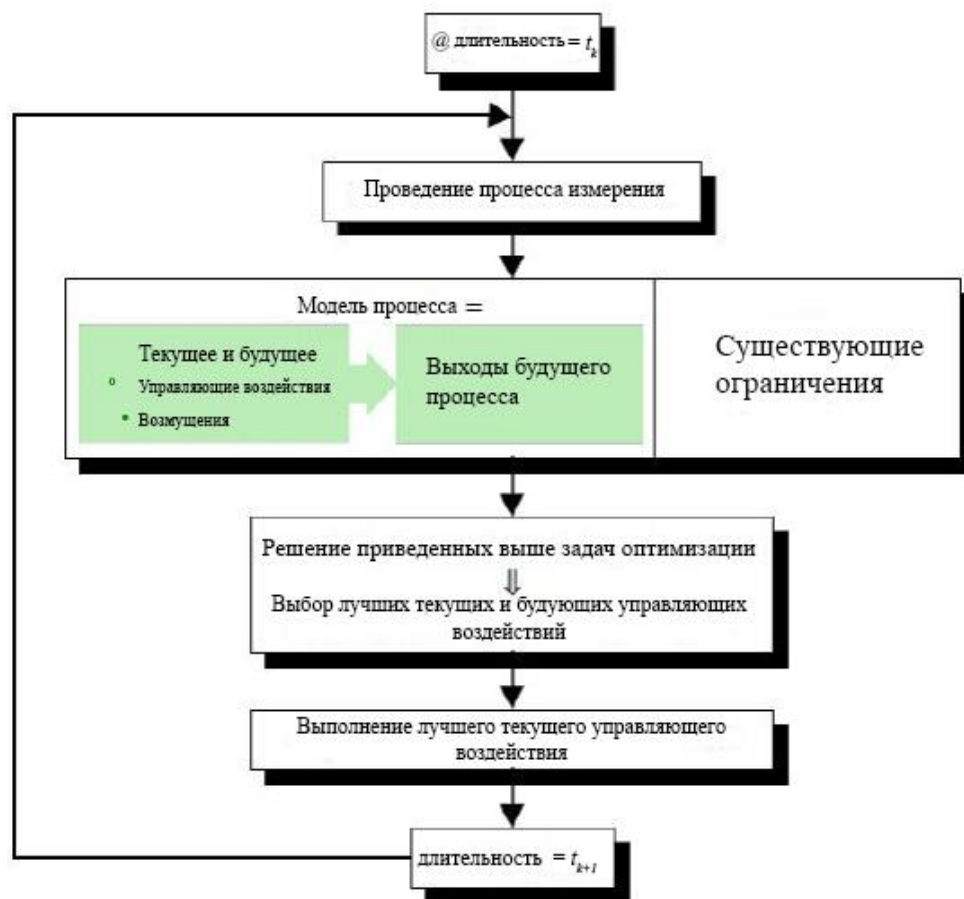


Рис. 1. Схема УПМ

Элементы УПМ

Все алгоритмы УПМ имеют общие элементы, и для каждого элемента можно выбрать различные варианты, что дает основание для применения различных алгоритмов. Такими элементами являются [3-5]:

- модель прогнозирования;
- целевая функция;
- закон управления.

При этом модель прогнозирования является наиболее важной частью УПМ. Полный проект должен включать необходимые механизмы для получения оптимальной модели, которая должна быть достаточно полной, чтобы охватить все динамические характеристики процесса и рассчитать прогнозы, и одновременно интуитивно понятной, чтобы провести теоретический анализ. Использование модели процесса определяется необходимостью расчета прогнозируемого выхода в будущие моменты времени.

Наиболее распространенными в практике промышленных предприятий являются модели импульсной характеристики конечной длительности КИХ или переходной характеристики. Это непараметрические модели, которые широко используются в промышленности. Преимущество таких моделей в том, что они показывают постоянную времени, опережения и запаздывания управляющего воздействия непосредственно на графиках процесса.

Обзор принципов настройки УПМ

Далее представлен обзор принципов настройки УПМ с точки зрения теории и практики. Обсуждаются основные шаги повышения производительности контроллеров. Настраиваемые параметры контроллеров обсуждаются исходя из формулировки закона управления. Существуют методы настройки вывода строки, в которой каждый параметр настраивается индивидуально, как указано ниже [6,7]:

- горизонт прогнозирования;
- горизонт управления;
- горизонт модели;
- взвешенные значения на выходах;
- взвешенные значения скорости изменения входов;
- взвешенные значения величины входов;
- параметры опорной траектории;
- ограничивающие параметры;
- ковариационная матрица и коэффициент усиления фильтра Калмана.

Первым шагом настройки является разработка точной модели процесса. Во всех структурах УПМ разработка адекватной модели существенно облегчает процедуру настройки.

УПМ с жесткими ограничениями. Одним из преимуществ использования УПМ является то, что оно позволяет проводить операции близко к ограничениям по сравнению с обычными моделями управления, что ведет к более устойчивой работе. Часто эти ограничения связаны с прямыми затратами, нередко ценами на энергоносители. Например, на производственном

предприятию потребление энергии должно быть минимальным при том же уровне производства, что является ограничением производственного процесса. Ограничения могут присутствовать как на входе, так и на выходе. Часто входные ограничения на управляющие сигналы, т.е. переменные процесса или регулируемые переменные - это жесткие ограничения. Эти ограничения никогда не допускается нарушать.

Во многих задачах управления с ограничениями решение становится невозможным из-за проблем нарушения жестких ограничений, которые могут быть результатом различных факторов в реальном времени. Ограничения состояния и выходные ограничения могут привести к неосуществимости задачи оптимизации. Например, помехи на выходе могут вывести процесс из допустимой области так, что ни одна возможная траектория входа не сможет вернуть его обратно в ограниченную зону. В этом случае жесткие ограничения выхода больше не смогут выполняться. УПМ с мягкими ограничениями, как описано выше, в основном из-за помех в системе [8].

Системной стратегией борьбы с неосуществимостью является смягчение ограничений. Т.е. вместо того, чтобы рассматривать ограничения как жесткие границы, которые никогда нельзя пересекать, позволять их иногда пересекать, но только в случае необходимости. Обычно входные ограничения - это жесткие ограничения и нет никакого способа, которым их можно смягчить, кроме как ограничив привод. Авторы [9] предоставили подробное объяснение того, как использовать мягкие ограничения в задаче оптимизации. Возможное предложение - отказаться от выходных ограничений, которые являются причиной неосуществимости.

Описание модели измельчения

Технологический процесс сокращения крупности материала в шаровой барабанной мельнице может быть представлен моделью идеального перемешивания. Учесть различное время пребывания частиц удастся, применив представление потока через мельницу в виде каскадных смесителей.

Причем в большинстве случаев достаточно трех смесителей (А, В, С) в каскаде, если принять время пребывания в каждом смесителе соответственно равным [10]:

$$\begin{aligned}\tau_A &= 0.15 \cdot \tau, \\ \tau_B &= 0.15 \cdot \tau, \\ \tau_C &= 0.70 \cdot \tau.\end{aligned}\tag{1}$$

где τ - общее время пребывания материала в мельнице.

На рис. 3 каскадом из трех смесителей (А, В, С) представлен процесс измельчения. Поток частиц i -ой фракции (класса) крупности исходного материала q_{Fi} поступает на вход смесителя А. Поток разгружаемого из смесителя А материала является входным потоком q_{Fbi} смесителя В, и, аналогично, поток разгружаемого из смесителя В материала является входным потоком q_{Fci} смесителя С. Каждый смеситель содержит запас (массу) материала m_{ia}, m_{ib}, m_{ic} , который подвергается измельчению.

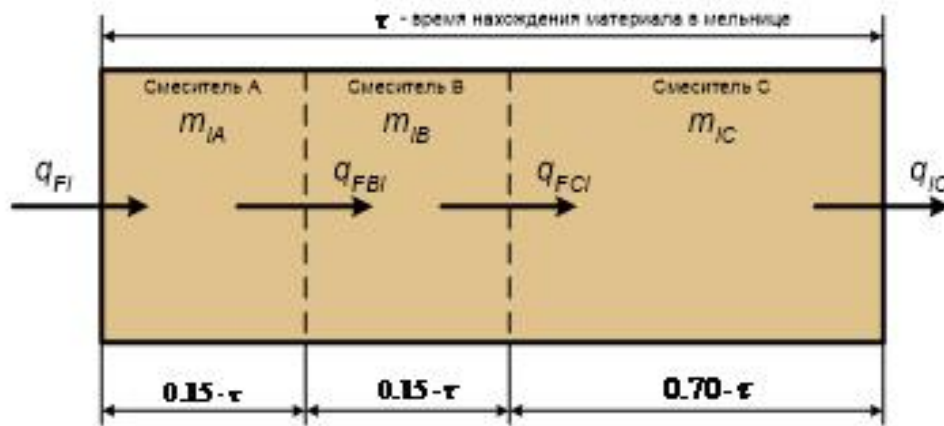


Рис. 3. Каскадное представление процесса измельчения

Как изложено выше кинетическое уравнение для трех смесителей запишется в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned}
 \frac{dm_{iA}}{dt} &= \frac{f_{iA}}{\tau_A} - s_i m_{iA} + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} s_j m_{jA} - \frac{m_{iA}}{\tau_A} \\
 \frac{dm_{iB}}{dt} &= \frac{f_{iB}}{\tau_B} - s_i m_{iB} + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} s_j m_{jB} - \frac{m_{iB}}{\tau_B}, \\
 \frac{dm_{iC}}{dt} &= \frac{f_{iC}}{\tau_C} - s_i m_{iC} + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} s_j m_{jC} - \frac{m_{iC}}{\tau_C}
 \end{aligned} \quad (2)$$

где m_{iA}, m_{iB}, m_{iC} – масса i -ой фракции (класса) крупности, находящегося соответственно в смесителе А, В, С.

f_{iA}, f_{iB}, f_{iC} – масса i -ой фракции (класса) крупности на входе в соответственно в смесители А, В, С;

τ_A, τ_B, τ_C – время пребывания в данном смесителе;

b_{ij} – функция разрушения, определяющая переход материала j -го класса в i -ый класс крупности;

s_i, s_j – функция отбора, определяющая скорость разрушения соответственно i -го и j -го класса крупности.

После разбиения входного потока измельчаемого материала на n классов крупности, например, для смесителя А получим систему из n уравнений, при этом предполагается, что разрушение самого мелкого n -го класса крупности не происходит.

$$\begin{aligned} \frac{dm_{1A}}{dt} &= \frac{f_{1A}}{\tau_A} - s_1 m_{1A} - \frac{m_{1A}}{\tau_A} \\ \frac{dm_{2A}}{dt} &= \frac{f_{2A}}{\tau_A} + b_{21} s_1 m_{1A} - s_2 m_{2A} - \frac{m_{2A}}{\tau_A} \\ &\dots\dots\dots(3) \\ \frac{dm_{(n-1)A}}{dt} &= \frac{f_{(n-1)A}}{\tau_A} + b_{(n-1)1} s_1 m_{1A} + \dots + b_{(n-1)(n-2)} s_{(n-2)} m_{(n-2)A} - s_{(n-1)} m_{(n-1)A} - \frac{m_{(n-1)A}}{\tau_A} \\ \frac{dm_{nA}}{dt} &= \frac{f_{nA}}{\tau_A} + b_{n1} s_1 m_{1A} + \dots + b_{n(n-1)} s_{(n-1)} m_{(n-1)A} - \frac{m_{nA}}{\tau_A} \end{aligned}$$

Для определения функций отбора s_i , s_j и разрушения b_{ij} используется нейронная сеть. На рис. 2 она представлена блоком коррекции модели. На основе предсказаний выхода, корректируются соответствующие коэффициенты отбора и разрушения с использованием нейросети, после чего происходит переход к регулятору.

Прогнозирующее управление на основе импульсной характеристики конечной длительности

Состав системы управления с прогнозирующими моделями включает в себя оценочный модуль и регулятор, а также блок коррекции модели использующий нейросеть для определения коэффициентов отбора и разрушения, как показано на рис. 2.

Входными параметрами УПМ являются заданные значения r , выходы процесса z и измеренные выходы процесса y . Выходными параметрами УПМ будут являться регулируемые переменные u .

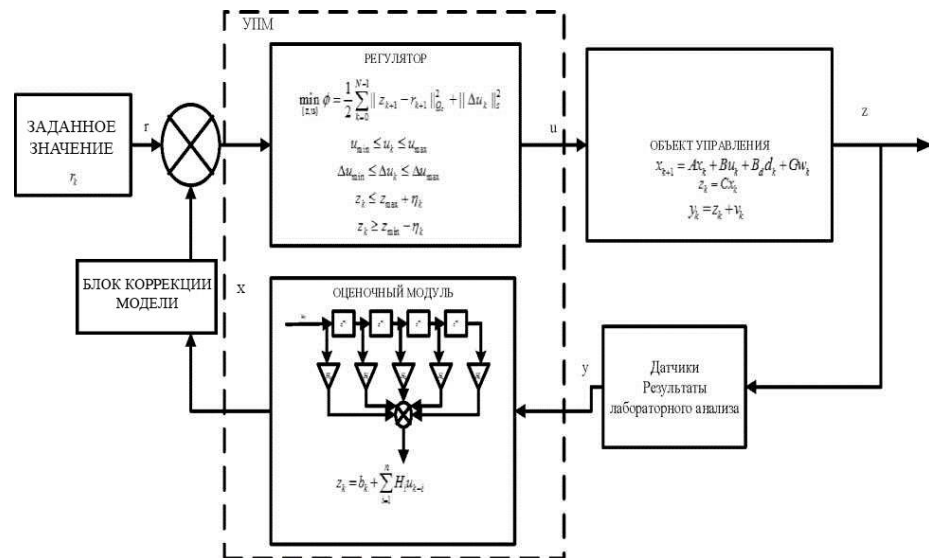


Рис. 2. Структура системы управления на основе УПМ

Технологическая установка и измерительные устройства

Предположим, что установка – это линейная система пространства состояний:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + B_d d_k + Gw_k x_{k+1}, \quad (4)$$

$$z_k = Cx_k, \quad (5)$$

где x – состояния процесса;

u – регулируемая переменная;

d – неизмеряемые возмущения;

w – шум стохастического процесса;

z – управляемые переменные.

Измеренные выходы, y , являются регулируемыми выходами, z , с помехами при измерении, v .

Следовательно:

$$y_k = z_k + v_k. \quad (6)$$

Первоначальное состояние, шум процесса и помехи при измерении, предположительно, являются нормально распределенными стохастическими векторами:

$$x_0 \approx N(\bar{x}_0, P_0), \quad (7)$$

$$w_k \approx N_{iid}(0, Q), \quad (8)$$

$$v_k \approx N_{iid}(0, R). \quad (9)$$

Измеренный выход y – это сигнал обратной связи, используемый оценочным модулем, u – сигнал системы управления, выполняемый на установке.

Регулятор

Ниже представлены устойчивые процессы в режиме КИХ:

$$z_k = b_k + \sum_{i=1}^n H_i u_{k-i}, \quad (10)$$

$\{H_i\}_{i=1}^n$ – коэффициенты импульсной характеристики (параметры Маркова), составляющие смещения оценочного модуля; b_k – объясняет расхождения между прогнозируемым и фактическим выходами.

Таким образом, с помощью модели КИХ ℓ_2 -регуляризованную задачу отслеживания выхода с входными ограничениями можно сформулировать следующим образом:

$$\min_{\{z, u\}} \phi = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \|z_{k+1} - r_{k+1}\|_{Q_z}^2 + \|\Delta u_k\|_s^2, \quad (11)$$

при котором:

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

$$\begin{aligned}
u_{\min} &\leq u_k \leq u_{\max}, \quad k = 0, \dots, N-1, \\
\Delta u_{\min} &\leq \Delta u_k \leq \Delta u_{\max}, \quad k = 0, \dots, N-1, \\
z_k &\leq z_{\max} + \eta_k, \quad k = 1, \dots, N, \\
z_k &\geq z_{\min} - \eta_k, \quad k = 1, \dots, N,
\end{aligned} \tag{12}$$

при этом $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$ и Q_z , S – это веса регуляризации, а $\|z_{k+1} - r_{k+1}\|_{Q_z}^2$ является общим представлением норм метода наименьших квадратов по весу.

Это воспринимается как:

$$\|z_{k+1} - r_{k+1}\|_{Q_z}^2 = \|z_{k+1} - r_{k+1}\|_{Q_z} \|z_{k+1} - r_{k+1}\|^T.$$

Горизонты контроля и прогнозирования идентичны. При желании можно включить горизонт прогнозирования длиннее горизонта управления. Однако предпочтем сделать горизонт управления такой длины, чтобы никакие граничные эффекты в конце горизонта не имели никакого влияния на решение в начале горизонта и могли бы быть преобразованы в ограниченную линейно-квадратичную задачу оптимального управления.

Для решения таких задач с длинными горизонтами прогнозирования существуют эффективные алгоритмы, согласно Йоргенсен и др. (2004).

Постановка задачи квадратичного программирования расчёта регулятора КИХ

Векторы Z , R , U , определяются как:

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_N \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_{N-1} \end{bmatrix}. \tag{13}$$

Следовательно, прогнозы по модели импульсной характеристики можно выразить как:

$$Z = c + \Gamma U.$$

Для случая $N = 6$ и $n = 3$, Γ собирается как:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} H_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_2 & H_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_3 & H_2 & H_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_3 & H_2 & H_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_3 & H_2 & H_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_3 & H_2 & H_1 \end{bmatrix}, \tag{14}$$

и собирается как:

$$c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 + (H_2 u_{-1} + H_3 u_{-2}) \\ b_2 + (H_3 u_{-2}) \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Для случая $N = 6$, определим матрицы Λ и I_0

$$\Lambda = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -I & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -I & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -I & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -I & I \end{bmatrix} I_0 = \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

и

$$Q_Z = \begin{bmatrix} Q_Z & & & \\ & Q_Z & & \\ & & \ddots & \\ & & & Q_Z \end{bmatrix} S = \begin{bmatrix} S & & & \\ & S & & \\ & & \ddots & \\ & & & S \end{bmatrix}, \quad (17)$$

Далее целевую функцию в уравнении можно выразить как:

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \|z_{k+1} - r_{k+1}\|_{Q_z}^2 + \|\Delta u_k\|_S^2 \\ &= \frac{1}{2} \|Z - R\|_{Q_z}^2 + \frac{1}{2} \|\Lambda U - I_0 u_{-1}\|_S^2 \\ &= \frac{1}{2} \|c + \Gamma U - R\|_{Q_z}^2 + \frac{1}{2} \|\Lambda U - I_0 u_{-1}\|_S^2 \\ &= \frac{1}{2} U' (\Gamma' Q_Z \Gamma + \Lambda' S \Lambda) U \\ &\quad + (\Gamma' Q_Z (c - R) - \Lambda' S I_0 u_{-1})' U \\ &\quad + \left(\frac{1}{2} \|c - R\|_{Q_z}^2 + \frac{1}{2} \|I_0 u_{-1}\|_S^2 \right) \\ &= \frac{1}{2} U' H U + g' U + \rho \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$H = \Gamma' Q_z \Gamma + \Lambda' S \Lambda, \quad (19)$$

$$g = \Gamma' Q_z (c - R) - \Lambda' S I_0 u_{-1}, \quad (20)$$

$$\rho = \frac{1}{2} \|c - R\|_{Q_z}^2 + \frac{1}{2} \|u_{-1}\|_S^2. \quad (21)$$

Таким образом, задачу регулятора УПМ на основе КИХ в уравнении можно решить путем нахождения решения следующей задачи выпуклого квадратичного программирования:

$$\min_U \psi = \frac{1}{2} U' H U + g' U. \quad (22)$$

Так, что:

$$U_{\min} \leq U \leq U_{\max}, \quad (23)$$

$$b_l \leq \Lambda U \leq b_u, \quad (24)$$

где

$$U_{\min} = \begin{bmatrix} u_{\min} \\ u_{\min} \\ \vdots \\ u_{\min} \end{bmatrix}, \quad U_{\max} = \begin{bmatrix} u_{\max} \\ u_{\max} \\ \vdots \\ u_{\max} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

и

$$b_l = \begin{bmatrix} \Delta u_{\min} + u_{-1} \\ \Delta u_{\min} \\ \vdots \\ \Delta u_{\min} \end{bmatrix}, \quad b_u = \begin{bmatrix} \Delta u_{\max} + u_{-1} \\ \Delta u_{\max} \\ \vdots \\ \Delta u_{\max} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

В модели прогнозирующего контроллера только первый вектор, u_0^* , из U^* реализован в процессе:

$$U^* = \left[(u_0^*)' (u_1^*)' \dots (u_{N-1}^*)' \right]'. \quad (27)$$

Во время следующей выборки в связи с новым измерением повторяется оптимизация без обратной связи с новой информацией.

Литература

1. Bemporad, A. Robust model predictive control: A survey / A. Bemporad, M. Morari, In A. Garulli, A. Tesi, and A. Vicino (eds.) // Robustness in Identification and Control, volume of Lecture Notes in Control and Information Sciences Springer-Verlag. -1999. -P.207- 26.
2. Ben-Tal and Nemirovski. Lectures on modern convex optimization / Ben-Tal and Nemirovski. - Philadelphia, 2001. – 302 с.
3. Benzer, H. Modeling cement grinding circuits /H. Benzer, L. Ergun, A. Lynch, M. Oner, A. Gunlu, I. Celik, and N. Aydogan //N. Minerals Engineering. – 2001. -14(11). -P.1469-1482.
4. Berger, M. An introduction to probability and stochastic processes / M. Berger. - New York Springer: Verlag New York, Inc., 1993. – 452 p.
5. Berthiaux, H. Analysis of grinding process by Markov chains / H. Berthiaux // ChemicalEngineering Science. - 2000. -P.4117-4127.
6. Шарапов, Р.Р. Шаровые мельницы замкнутого цикла / Р.Р. Шарапов: Монография / Белгородский гос. технол. ун-т. - Белгород, 2008. - 299 с.
7. Андреев, Е.Е. Исследование процесса измельчения на математических моделях / Е.Е. Андреев, Н.В. Николаева // Обогащение руд. - 2007. - №2. - С.3-5.
8. Bemporad, A. The explicit linear quadratic regulator for constrained systems / A. Bemporad, M. Morari, V. Dua, and E. N. Pistikopoulos // Automatica. -2002. - №38. - P.3-20.
9. Bhatti, J. Innovations in Portland cement manufacturing [electronic resource] / J. Bhatti, F. Miller, S. Kosmatka. -2002. -301 p.
10. Гуревич, Л.С. Моделирование структуры потоков в барабанной мельнице Л.С. Гуревич, Е.Б. Кремер // Обогащение руд. – 1989. – №2 – С.34-37.

Сведения об авторах

Туз Андрей Александрович – электромеханик, аспирант,
e-mail: andrew339@yandex.ru
Andrey A. Tuz – post-graduate

Виллиам Браун-Аквей – к. т. н., преподаватель, Ганский университет технологии, Аккра,
e-mail: wbrownacquaye@hotmail.com
William Brown-Acquaye - Cand. of Sci (Tech), lecturer

Кулаков Андрей Геннадьевич – к.т.н., главный механик АНОФ-2 АО «Апатит»
Andrey G. Kulakov - Cand. of Sci (Tech)

Форгор Лемпого – к.т.н., преподаватель, Ганский университет технологии, Аккра
e-mail: forlempto@yahoo.co.nz
Forgor Lempogo - Cand. of Sci (Tech), lecturer

Богатиков Валерий Николаевич – д.т.н., профессор кафедры информационных систем (ИС) ТвГТУ, e-mail: VNBGTK@mail.ru
Valery N. Bogatikov - Dr. of Sci (Tech), professor

УДК 004.89, 004.9

О.В. Фридман

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ УЧЕБНОГО ПЛАНА ВУЗА

Аннотация

В статье проведен анализ программных продуктов, предназначенных для автоматизации формирования учебных планов вузов. Анализ доступных программных продуктов показал, что все из рассмотренных пакетов обладают различными недостатками. В рамках проводимых исследований разработаны методы распространения ограничений на основе матричного представления конечных предикатов. Предлагается использовать имеющийся задел для решения задачи автоматизации формирования учебных планов для вузов.

Ключевые слова:

учебный план вуза, распространение ограничений, матричное представление конечных предикатов.

O.V. Fridman

ANALYSIS SOFTWARE FOR AUTOMATING DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL PLANS OF THE UNIVERSITY.

Abstract

The article analyzes the software designed for automating development of educational plans of the university. analysis of the available software products showed that all of the considered packets have various disadvantages. As part of the research developed methods of distribution restrictions based on the matrix predicate final repose. It is proposed to use the existing foundation for solving the problem of automation of development educational plans of the university.

Keywords:

educational plans of the university, distribution limitations, the matrix representation of the finite predicate.

Введение

Высшие учебные заведения осуществляют подготовку специалистов в соответствии с государственными стандартами специальностей высшего профессионального образования, учебно-программной документацией и другими нормативными документами, утвержденными на государственном уровне.

Непременным приложением и его составной частью любого общеобразовательного стандарта по специальности является типовой учебный план. На базе типового учебного плана вузом разрабатывается рабочий учебный план.

Учебный план - это государственный документ, на основе которого осуществляется подготовка специалистов.

Типовой учебный план - основной документ, устанавливающий государственный компонент соответствующей образовательно-профессиональной программы. Он устанавливает на государственном уровне минимальные объемы

учебных часов и циклов (блоков), перечень обязательных дисциплин в них, предоставляя, таким образом, самостоятельность высшим учебным заведениям в разработке вузовского компонента рабочего учебного плана данной специальности. В этом документе также указывается квалификация выпускаемого специалиста, приводятся дополнительные данные (например, перечень государственных экзаменов, виды практик и т.п.) и примечания.

Рабочий учебный план - это учебный план специальности конкретного высшего учебного заведения, разработанный на основе типового учебного плана с его дополнениями и корректировками (в соответствии с нормативными документами), учитывающий местные условия, специализацию, уточняющий календарную структуру, этапы учебного процесса.

Требования к уровню подготовки выпускников во многом определяет обязательный минимум содержания образовательно-профессиональных программ [1].

Общая характеристика содержания подготовки специалиста, то есть образовательно-профессиональная программа, выражается через перечень дисциплин и видов учебной работы обучающихся, объединенных в следующие циклы (блоки):

- цикл общих социально-гуманитарных дисциплин (цикл СГД);
- цикл общих естественнонаучных дисциплин (цикл ЕНД);
- цикл общепрофессиональных дисциплин по направлению подготовки (цикл ОПД);
- цикл специальных дисциплин (цикл СД);
- другие виды работ обучающегося (практика, военная подготовка, факультативы и др.).

Освоение уровня высшего профессионального образования обуславливается следующими показателями государственного стандарта:

- 1) цикл СГД составляет от общего объема программы не менее 20% - для высшего специального образования;
- 2) цикл естественнонаучных дисциплин составляет от 5 до 30% общего объема программы - для высшего специального образования;
- 3) цикл общепрофессиональных дисциплин составляет от 20 до 25% общего объема программы - для высшего специального образования;
- 4) цикл специальных дисциплин составляет от 15 до 25% общего объема программы - для высшего специального образования. Для реализации вузовского компонента образовательно-профессиональной программы в распоряжение Совета вуза отводиться не менее 90% общего объема программы. В общем объеме учебного материала не менее 15% отводится на учебные курсы по выбору обучающегося [1].

Учебный план является частью учебно-методической документации основной образовательной программы (ООП). Основными документами по планированию учебной работы являются примерные, базовые, рабочие и годовые учебные планы. Разработка примерных учебных планов в составе примерных основных образовательных программ в соответствии с Федеральным законодательством относится к компетенции Министерства образования и науки РФ [1].

Учебный план является государственным документом, определяющим основное содержание и сроки подготовки обучающегося в вузе, содержащим исходные данные для организации и планирования всех видов учебных занятий: перечень всех изучаемых дисциплин ООП и трудоемкость каждой из них (в зачетных единицах и академических часах), распределение времени по годам и семестрам в течение всего срока обучения, а также по видам занятий, характер практик и (или) научно-исследовательской работы, количество курсовых проектов (работ), зачетов, экзаменов.

Учебный план предусматривает необходимое соотношение учебных циклов их базовых и вариативных частей, закрепление теоретической базы обучения на практике. Последовательность изучения дисциплин (модулей), предусматриваемая учебным планом, основана на их преемственности и определяется логическими связями и зависимостями между ними, которые, в свою очередь, опираются на перечень компетенций (или их компонентов), последовательность, траекторию и сроки их формирования. Баланс учебного времени представляет собой сводные данные по бюджету времени в неделях. При его составлении необходимо произвести расчет количества недель по годам обучения и за весь период обучения, выделяемых на теоретическое обучение (в том числе и на экзаменационные сессии), практики, выпускные квалификационные работы, итоговую аттестацию и каникулы.

В календарном графике учебного процесса соответствующими символами для каждого курса и семестра обозначаются календарные дни (по неделям и месяцам) теоретического обучения, практик, экзаменационных сессий, каникул и итоговой государственной аттестации. Планируемое количество учебных недель, как правило, в нечетном семестре составляет 18, а в четном – 16 недель. При составлении графика следует считать, что в году 52 недели.

Трудоемкость, выделяемая на изучение отдельных дисциплин (модулей), определяется объемом и характером формируемых компетенций, значением дисциплин (модулей) в системе подготовки, объемом курса, соотношением в нем теоретического материала и практических работ, воспитательными задачами и др. Учебный план предусматривает также рациональное распределение дисциплин (модулей) по семестрам с точки зрения равномерной загруженности студента и эффективное использование кадрового и материально-технического потенциала вуза [2].

Требования к учебному плану

Учебный план должен удовлетворять следующим требованиям.

Общая трудоемкость освоения ООП не должна превышать нормативную трудоемкость, регламентированную ФГОС ВПО (240 зачетных единиц для бакалавриата и 120 – для магистратуры). Объем факультативных дисциплин, не включаемых в указанное количество зачетных единиц и не обязательных для изучения обучающимися, определяется вузом самостоятельно.

Максимальный объем учебной нагрузки обучающихся не может составлять более 54 академических часов в неделю, включая все виды аудиторной и внеаудиторной (самостоятельной) учебной работы по освоению основной образовательной программы и факультативных дисциплин, устанавливаемых вузом дополнительно к ООП и являющихся необязательными

для изучения обучающимися. Объем факультативных дисциплин не должен превышать 10 зачетных единиц за весь период обучения.

Максимальный объем аудиторных учебных занятий в неделю при освоении ООП бакалавриата в очной форме обучения составляет 27 академических часов. В указанный объем не входят обязательные аудиторные занятия по физической культуре. Раздел «Физическая культура» трудоемкостью 2 зачетные единицы реализуется при очной форме обучения, как правило, в объеме 400 часов, при этом объем практической, в том числе игровых видов подготовки, должен составлять не менее 360 часов.

Максимальный объем аудиторных учебных занятий в неделю при освоении ООП в очной форме обучения составляет 16 академических часов. В соответствии Типовым положением об образовательном учреждении высшего профессионального образования (высшем учебном заведении), утвержденным постановлением Правительства от 14 февраля 2008 г. № 71, максимальный объем аудиторной учебной нагрузки в неделю при освоении основной образовательной программы в очно-заочной (вечерней) форме не может составлять более 16 академических часов, максимальный объем аудиторной учебной нагрузки в год при освоении основной образовательной программы в заочной форме не может составлять более 200 академических часов.

Учебный год для студентов очной и очно-заочной (вечерней) форм обучения начинается 1 сентября и заканчивается согласно календарному учебному графику. Сроки начала и окончания учебного года для студентов заочной формы обучения устанавливаются рабочим учебным планом.

Общий объем каникулярного времени в учебном году должен составлять 7-10 недель, в том числе не менее двух недель в зимний период. Студенты, обучающиеся в высших учебных заведениях, при промежуточной аттестации сдают в течение учебного года не более 10 экзаменов и 12 зачетов. В указанное число не входят экзамены и зачеты по физической культуре и факультативным дисциплинам.

Учебный план основной образовательной программы подготовки бакалавра и магистра включает в себя следующие разделы: учебный план на весь срок обучения, бюджет времени в неделях, календарный график учебного процесса.

В соответствии с требованиями ФГОС общая трудоемкость учебной дисциплины не может быть менее 2 зачетных единиц (за исключением дисциплин по выбору обучающихся). При этом по дисциплинам, трудоемкость которых составляет более 3 зачетных единиц, должна выставляться оценка («отлично», «хорошо», «удовлетворительно») [2].

Формирование учебных планов

Формирование учебных планов должно быть основано на перечне компетенций (или их компонентов), последовательности, траектории и сроков их формирования. Определению состава компетенций предшествует дополнение перечня задач профессиональной деятельности (по видам деятельности), зафиксированных в ФГОС, и их конкретизация применительно к специфике, реализуемой ООП. После этого определяется содержание образования в виде перечней учебных курсов, предметов, дисциплин (модулей) и других

компонентов, в которых должны быть приобретены знания, умения и владения, входящие в состав конкретных компетенций.

Процесс формирования учебных планов «вручную» является трудоемким и долгим, поэтому в настоящее время создан ряд программных продуктов, позволяющих в некоторой степени автоматизировать ввод необходимой информации и контроль ее корректности. Ниже представлено описание некоторых программных продуктов, предназначенных для решения этой задачи [2].

Программа ПЛАН

Учебный план является основным документом процесса обучения. В настоящее время содержание обучения необходимо достаточно часто обновлять, чтобы выпускаемые специалисты соответствовали требованиям, предъявляемым к ним рынком труда. Это обновление связано с добавлением в программу обучения новых дисциплин, исключением или объединением каких-либо дисциплин, изменением содержания существующих дисциплин.

Таким образом, первоначально имеется некоторый объем учебного материала, суммарная трудоемкость которого превышает трудоемкость учебного плана. Необходимо определить наиболее важный, с точки зрения требований, предъявляемых к специалисту, учебный материал и расположить его по семестрам оптимальным для усвоения образом.

Программа предназначена для расчета оптимального учебного плана вуза по исходным данным, формируемым пользователем и критериям, заложенным в программе, обоснование которых приводится в описании задачи [3].

Краткая постановка задачи

Все учебные дисциплины, входящие в план, связаны между собой, то есть в более поздних по времени изучения дисциплинах используется информация из ранее изученных без ее конкретизации, т.е. предполагается, что обучаемый знает, какой смысл вкладывается в то или иное определение или понятие.

Для более подробного рассмотрения структуры учебного материала дисциплины дробятся на более мелкие по объему единицы, называемыми в дальнейшем *модулями*.

Модуль, информационная база которого используется для последующего изучения других модулей, будем называть *предком* по отношению к этим модулям. Модуль, который использует информационную базу ранее изученных модулей, будем называть *потомком* по отношению к этим модулям.

Каждой дуге, отражающей связь модулей, можно поставить в соответствие некоторое число - тесноту связи. Тогда имеем некоторый граф, называемый графом связанности учебного материала (рис.1).

Если содержание обучения является связанным, то на качество его усвоения влияет его расположение во времени. Течение времени будем отслеживать по понедельно, начиная с 0, т.е. начало первого семестра – 0.

Для прочного усвоения материала необходимо соблюдение логичности его изложения, т.е. модуль-предок должен изучаться раньше, чем модуль-потомок, чтобы введенные в нем понятия к моменту начала изучения модуля-потомка были известны обучаемому [3].

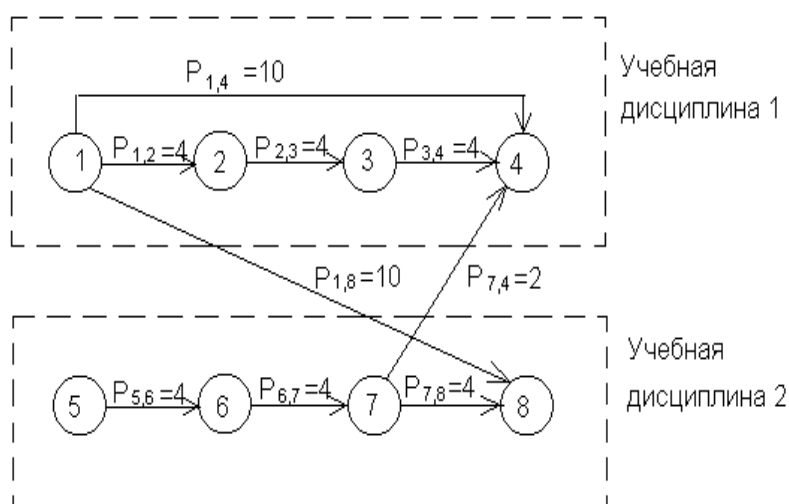


Рис. 1. Пример графа связанности

На процесс осмысленного запоминания влияют такие факторы, как структура материала, образование ассоциативных связей между понятиями, частота использования понятий.

Особенностью человеческой памяти является забывание информации, если она не повторяется в течение длительного промежутка времени. Поэтому чем меньше будет промежуток времени между информационно связанными модулями, тем лучше будет усвоен материал.

На этих соображениях основан выбор критерия минимизации суммарной величины временных разрывов между информационно, связанными друг с другом модулями учебного плана с учетом тесноты связи [3].

$$\sum_{l=1}^N \sum_{i=1}^M \sum_{r=1}^N \sum_{j=1}^M k(i, j, l, r) \times P(i, l, j, r) \times [nm(j, r) - km(i, l)] \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $nm(j, r)$ - начало r -го модуля j -й дисциплины (модуля-потомка);

$km(i, l)$ - конец l -го модуля i -й дисциплины (модуля-предка);

$P(i, l, j, r)$ - теснота связи между модулем-предком и модулем-потомком.

$$k(i, j, l, r) = \begin{cases} 1, & \text{если } nm(j, r) - km(i, l) \geq 0 \\ -f, & \text{если } nm(j, r) - km(i, l) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Коэффициент f определяется из соотношения

$$\forall i \forall j \forall l \forall r [f * P(i, l, j, r) = Q_{max}]. \quad (3)$$

Для возможности отбора наиболее важных для специальности модулей в план каждому модулю ставится в соответствие коэффициент значимости модуля для профессиональной подготовки.

Также вычисляется коэффициент обобщенной значимости модуля, который включает в себя коэффициент значимости модуля для профессиональной подготовки и степень связанности данного модуля с другими учебными модулями.

Кроме того, алгоритм задачи предусматривает следующие *ограничения*, налагаемые на план [3]:

1. Календарное время окончания реализации любого раздела учебной дисциплины не должно превышать установленного срока обучения в вузе.

2. Количество дисциплин в плане не более заданного.

3. Количество дисциплин в семестре не более заданного.

4. Количество учебных часов в неделю не должно превышать заданной нормы.

5. На каждой учебной неделе сумма аудиторных часов занятий с учетом времени на самостоятельную работу не должна превышать недельного ресурса времени на аудиторные занятия и самостоятельную работу.

6. Начало и окончание изучения любого учебного модуля должно находиться "внутри" какого-либо семестра.

7. Интенсивность изучения каждого модуля на любой учебной неделе должна находиться в границах, заданных для соответствующей учебной дисциплины.

8. "Внутри" семестра интенсивность изучения любой учебной дисциплины должна быть величиной постоянной (это требование непосредственно отражает принцип типовой учебной недели при составлении учебного плана).

9. Изучение разделов должно быть организовано таким образом, чтобы обеспечить временное согласование связей между разделами (использование сведений из разделов может начинаться только после того, как эти разделы изучены).

Обеспечение этого ограничения не всегда возможно, поэтому его нарушение можно включить в критерий, допустив таким образом его нарушение.

10. По одной дисциплине в семестре планировать либо экзамен, либо зачет.

11. Количество экзаменов в одном семестре не более заданного.

12. Количество зачетов в семестре не более заданного.

13. В качестве рубежного контроля по дисциплине, изучаемой более одного семестра, планировать зачеты, а экзамены только в тех случаях, когда лекционный курс по дисциплине занимает более 80 часов.

Для отбора наиболее важных модулей в план используются критерии максимизации суммарной профессиональной значимости модулей, включенных в план и максимизации суммарной обобщенной значимости модулей, включенных в план.

Некоторые данные, необходимые для расчета, должны быть получены методом экспертных оценок. Это:

- коэффициенты значимости каждого учебного модуля для профессиональной подготовки;
- коэффициенты тесноты связи между модулями.

Формирование исходных данных для программы расчета учебных планов при помощи метода экспертных оценок

Целью данной экспертизы является сбор информации, которая обеспечит повышение качества обучения специалиста за счет более эффективного составления плана учебного процесса. Критерием оценки эффективности учебного плана будем считать суммарный временной разрыв между информационно связанными модулями.

Теснота связи между модулями и значимость модуля для профессиональной подготовки специалиста являются субъективными понятиями, которые трудно оценить без какого-либо алгоритма. Используемый в работе [3] алгоритм основан на методе составления тезауруса.

Под тезаурусом будем понимать множество базовых понятий, определений, законов, умений, из которого исключены все синонимы. Любую учебную программу можно рассматривать как прообраз тезауруса соответствующего типа.

Особый интерес представляет метод составления тезауруса по специальности. Тезаурус специальности представляет собой список понятий, законов, умений, которые должен усвоить студент в процессе обучения.

Кроме тезауруса по специальности в теории педагогики используется тезаурус дисциплин, т.е. для каждой дисциплины составляется список понятий, введенных ею. Так же, как дисциплина разбивается на модули, тезаурус дисциплины разбивается на тезаурусы модулей.

Студент имеет в начале обучения некоторый начальный тезаурус. Процесс обучения сводится к усвоению студентом некоторого предложенного ему нового тезауруса (тезауруса специальности).

Чем большее количество понятий из модуля-предка используется в модуле-потомке и чем активнее они используются, тем теснее между ними связь.

Можно воспользоваться строгими математическими выкладками для подсчета коэффициентов значимости модулей для профессиональной деятельности и коэффициентов тесноты связи между модулями или получить их после обработки множества оценок компетентных экспертов (режим получения указанных коэффициентов из множества оценок экспертов реализован в программе составления учебных планов).

Первая часть экспертизы - это оценка коэффициентов значимости модулей для профессиональной подготовки специалистов, которые проставляются в последней графе таблицы разделов по шкале от 0 до 10. Он характеризует, какая часть материала модуля используется в профессиональной деятельности специалиста. Оценка 10 - весь материал, изучаемый в модуле, будет необходим выпускнику при работе по данной специальности, 0 - материал раздела не нужен для данной специальности (он необходим как база для изучения потомков).

Вторая часть экспертизы - это оценка тесноты связи между учебными модулями. Этот коэффициент оценивается по десятибалльной шкале, исходя из того, какая часть материала предка и насколько интенсивно используется при изучении материала потомка. То есть: 0 - материал предка не используется при изучении материала потомка, 10 - весь материал предка используется при

изучении материала потомка с достаточной интенсивностью, 5 - половина материала предка используется при изучении материала потомка с достаточной интенсивностью [3].

На рис. 2 и рис. 3 приведены экранные формы для ввода необходимой при построении макета учебного плана информации.

Настройка ограничения исходных данных

Форма обучения
 Дневная
 Вечерняя
 Заочная

Год: 1998

OK Cancel

Специальность: 270300 000 Технология X-П производс

Показ назначения разделов
 Ручные Автоматические

Количество
 Часов аудиторной работы в неделю: 27
 Дисциплин в семестре: 10 Учебных часов в неделю: 54
 Дисциплин в плане: 36 Лекционных часов: 51

Рис. 2. Экран настройки ограничений исходных данных

Специальность 270300 000 1998

Код: 24 Наименование: Алгебра

Полное наименование:

Код предмета: 10 Коэффициент: 5

Лекции: 17 Лабораторные: 0

Самоподготовка: 0 Индивидуальные: 0

Практика: 34

Дополнительные данные:

- 24 Алгебра
- 26 Анализ
- 71 Анализ нутриенто
- 63 АСУ, АСУТП
- 45 Белки, ферменты,
- 86 Биотехнологич. о
- 47 Биохим. процессы
- 28 Вероятность и ст
- 75 Виды основного и
- 55 Влияние микрок
- 27 Геометрия
- 89 Гигиена и санита
- 53 Детали машин
- 25 Дискретная мате
- 58 Законы термодин
- 56 Защитные меры и

Рис. 3. Экранная форма редактирования разделов плана

Программа требует ввести исходную информацию, начальные параметры расчета, заполнить экранные формы настроек на план. Затем производится синтез плана, проверка корректности его составления в соответствии с ограничениями, приведенными выше, далее выводится макет учебного плана [3].

Исходные данные

Для синтеза каждого учебного плана исходными данными являются следующие:

- график учебного процесса;
- список циклов дисциплин;
- список предлагаемых для изучения дисциплин;
- список учебных модулей с содержанием (тезаурусом) и расценовкой (количество часов лекций, лабораторных работ, практических занятий, самостоятельной работы);
- нормы времени по дисциплинам: каждой дисциплине может соответствовать максимально допустимая интенсивность изучения;
- нормы времени по циклам дисциплин: для каждого цикла возможно указание минимального количества часов в цикле;
- список экспертов;
- результаты экспертного опроса по коэффициенту значимости каждого учебного модуля для профессиональной подготовки;
- результаты экспертного опроса по коэффициенту тесноты связи между модулями;
- список курсовых работ и проектов с множеством учебных модулей для каждого, после изучения которых планируется курсовая работа или проект.
- список “жестко” назначаемых по семестрам модулей [3].

Возможности настройки расчета

1. Назначение некоторых модулей “жестко” в определенные семестры.

Это может потребоваться для слабо информационно связанных с остальными модулями, но обязательных к обучению. В частности, для технических специальностей, это цикл гуманитарных и социально-экономических дисциплин. Дисциплины этого цикла можно назначить в нужные семестры. При этом уменьшается на соответствующую величину объем оставшегося учебного времени в семестре.

2. Отделение “жестко” назначенных модулей от графа связности.

Для каждого “жестко” назначенного модуля нужно задать параметр - отделять его от графа связности или нет. В случае отделения все связи, входящие в модуль и выходящие из него, отбрасываются и не анализируются. Этот модуль получается оторванным от графа связности. Он не является ни для каких других модулей базой и не использует базу других модулей. В случае, когда модуль не отделяется, все связи, входящие в него и выходящие из него, анализируются.

3. Назначение всех модулей без предков сразу в первый семестр или начинать заполнение только с одного модуля.

Во втором случае начальных вариантов расчета будет столько, сколько имеется модулей без предков в графе связности. В этом случае при большом количестве таких модулей значительно (в несколько раз) увеличивается время расчета.

4. Задание количества вариантов, которые оставляются для дальнейшей обработки после расчета каждого семестра.

Рекомендуемое значение - 20. При увеличении этого числа увеличивается время расчета. При уменьшении - могут быть удалены перспективные варианты заполнения учебного плана. Если быстрое действие позволяет увеличить это число, то рекомендуется это сделать, т.к. это позволяет обработать большее количество вариантов заполнения.

5. Выбор критерия оптимизации. Пользователь имеет возможность провести синтез плана по различным критериям, а именно:

- максимизация суммарной значимости модулей, включенных в план с учетом связности;
- максимизация суммарной обобщенной значимости модулей, включенных в план без учета связности;
- максимизация суммарной обобщенной значимости модулей, включенных в план с учетом связности [3].

Выходные данные

Результатом расчета является учебный план, состоящий из наиболее важных для профессии исходных модулей, разнесенных по семестрам оптимальным для усвоения образом в смысле выбранного критерия.

Данный программный продукт одним из первых появился в свободном доступе, разработчик – Трофимова Ольга Константиновна, которая в 1999 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Автоматизация процесса составления учебных планов вузов». Создана гибкая автоматизированная система синтеза учебных планов вузов, позволяющая изменять параметры расчета и получать, таким образом, учебный план, максимально удовлетворяющий запросам вуза [3].

Достоинства данной разработки – понятный и дружелюбный интерфейс, наличие различных справочных баз. Недостатки – программный продукт устарел, в данное время существуют более мощные программные продукты для решения той же задачи, информация о них представлена ниже.

Программный модуль «Учебный процесс»

Программный продукт разработан в корпорации «Галактика», разработчик - эксперт - аналитик Светлана Лесневская [4].

Основные задачи модуля:

- Формирование и ведение учебных планов;
- Планирование штатного расписания вуза;
- Формирование нагрузки кафедр;
- Формирование и учет нагрузки профессорско-преподавательского состава;
- Разработка расписания занятий на семестр обучения.

На рис. 4. представлена упрощенная схема программного модуля и его основных функций.



Рис. 4. Схема программного модуля «Учебный процесс»

На рис. 5-7 показаны экранные формы для ввода информации на различных этапах формирования макета учебного плана.

Код	Наименование	Кафедра	Всего мин.	Всего макс.
001 М.1	Общенаучный курс		25	30
001 М.1.Б.1	Базовая часть		12	17
002 М.1.Б.2	Современные проблемы прикладной математики и инф.			
003 М.1.Б.3	История и методология прикладной математики и инф.			
004 М.1.Б.4	Непрерывные математические модели			
002 М.1.Б	Иностранный язык		13	18
002 М.2	Экспертная часть		35	40
003 М.3	Профессиональный курс		40	50
	Практика и научно-исследовательская работа			

Рис. 5. Экранная форма для ввода первичной информации при формировании макета учебного плана

Вид работ	Объем	Ед. изм.	Итого объем	Итого з.е.
Ауд.	36	часы	36	1
Кон.	1	экзамен	1	1
Сам.	36	часы	36	1
КСР	36	часы	36	1

Рис. 6. Экранная форма для ввода информации о содержании дисциплины.

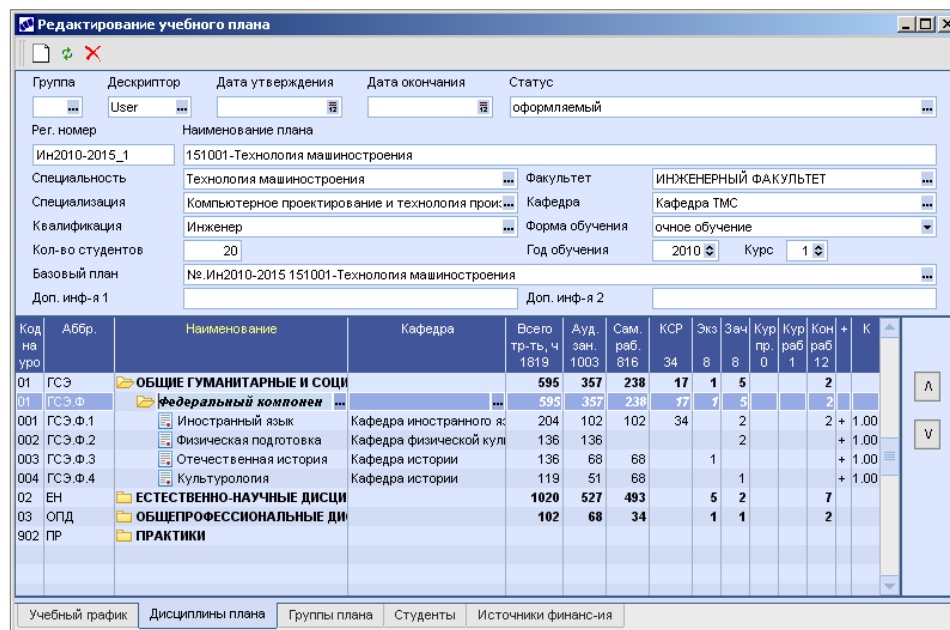


Рис. 7. Экранная форма для редактирования учебного плана

Достоинства разработки – понятный и дружелюбный интерфейс, наличие различных справочных баз, возможность создания не только учебного плана, но и планирования штатного расписания вуза, формирование нагрузки кафедр и учет нагрузки профессорско-преподавательского состава, разработка расписания занятий на семестр обучения. Недостатки – отсутствие в свободном доступе.

Заключение

При проведенном исследовании набора существующих программных продуктов, предназначенных для автоматического формирования учебных планов были найдены описания «Модуля формирования рабочего учебного плана вуза» [5] и [6]. Эти программы имеют одинаковое название, но созданы в разное время и разными людьми. Описания содержат только руководство пользователя по работе с программным продуктом, нет никакой информации о принципах и ограничениях, положенных в основу разработок, что не позволяет объективно оценить их достоинства и недостатки.

В ходе совместной работы с учебным отделом КФ ПетрГУ выяснилось, что ими для автоматизированного формирования учебных планов используется усеченная (бесплатно распространяемая) версия программного модуля "GosInsp" [7], предназначенная для формирования рабочих учебных планов направлений и специальностей с целью представления их для проверки на соответствие федеральным государственным стандартам высшего и среднего профессионального образования. Программный продукт создан Компанией ММИС Лаборатория и имеет дополнительный пакет "Планы Мини", который является платным приложением и для работы с ним необходимо получить регистрационный ключ в Учебном управлении. В [8] представлена инструкция для

пользователей пакета GosInsp по формированию учебных планов специалистов, бакалавров и магистров. Изучение этой инструкции позволило определить, что при работе с пакетом используется представление информации в виде книги Excel. Общение со специалистами учебного отдела показало, что использование именно этого программного продукта обусловлено скорее его доступностью, а не удобством, понятным и дружелюбным интерфейсом и т.д.

Проведенный анализ доступных программных продуктов, предназначенных для автоматизации формирования учебных планов для вузов показал, что все из рассмотренных пакетов обладают различными недостатками, в частности доступные программы не предоставляют полной функциональности, а платно распространяемые пакеты не описываются подробно и дорожи. Таким образом, у пользователя недостаточно информации для оправданного выбора дорогостоящего программного продукта.

В рамках проводимых исследований по теме НИР и грантов РФФИ разработаны методы распространения ограничений на основе матричного представления конечных предикатов. Предлагается использовать имеющийся задел для решения задачи автоматизации формирования учебных планов для вузов.

Литература

1. Методические рекомендации по разработке и реализации на основе деятельностно-компетентного подхода образовательных программ ВПО, ориентированных на ФГОС третьего поколения. Серия «Инновационный Университет»; сост. Афанасьева Т.П. и др. – М.: Изд-во МГУ, 2007. -96 с.
2. Бейгуленко, О.Я. Методические рекомендации по разработке учебных планов бакалавриата и магистратуры. – Режим доступа: <http://ed.dgu.ru/Content/plans.pdf>
3. Описание задачи расчета учебных планов вузов. – Режим доступа: <http://progcpp.narod.ru/plan/describ.htm>
4. Лесневская, С. Управление учебным процессом. – Режим доступа: <http://www.galaktika.ru/vuz/uchebnyj-process.html>
5. Работа с учебными планами. Модуль формирования рабочего учебного плана вуза. – Режим доступа: <http://isu.tisbi.ru/help/index.php>
6. Ужва, В.В. Модуль формирования рабочего учебного плана вуза. – Режим доступа: http://www.msiu.ru/upload/iblock/555/zdexaw_lotkoosvldj%20jmhhtahcjhabdafhyfejuyti%20nmdpxgyhtgamhhor%20ppssqxaodfyxdsgr%20ejgcqfjjlj%20wsrljgbc.doc
7. GosInsp. Учебное управление УлГТУ. – Режим доступа: <http://uch.ulstu.ru/gosIns>
8. Программный комплекс GosInsp. – Режим доступа: <http://www.tusur.ru/filearchive/fgos/instruction-GosInsp.pdf>.

Сведения об авторе

Фридман Ольга Владимировна - к.т.н, старший научный сотрудник,

e-mail: ofridman@iimm.ru

Olga V. Fridman - Ph.D. (Tech. Sci.), senior researcher

УДК 622.341:622.778-913.3

А.С. Опалев,¹ А.В. Щербаков²

¹ ФГБУН Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук

² Акционерное общество «Оленегорский горно-обогатительный комбинат» (АО «Олкон»)

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ НА АО «ОЛКОН»

Аннотация

Рассмотрены пути повышения энерго- и ресурсоэффективности технологических схем обогащения железистых кварцитов. Предложено теоретическое обоснование механизма высокоселективной магнитно-гравитационной сепарации для разделения минеральных частиц с близкими физическими свойствами. Разработана технология получения готового магнетитового концентрата в каждой стадии обогащения с использованием комбинации тонкого грохочения и магнитно-гравитационной сепарации, приведены технологические результаты по стадильному выводу товарной продукции с содержанием $Fe_{\text{общ}}$ 65,7% - 70,0% при переработке железистых кварцитов на ДОФ АО «Олкон».

Ключевые слова:

железистые кварциты, технологическая схема, железорудный концентрат, энерго- и ресурсоэффективность, тонкое грохочение, магнитно-гравитационная сепарация, магнитно-стабилизированный оживленный слой, магнитный диполь, структурообразование, МГ-сепаратор, стадильный вывод готового концентрата, автоматизация.

A.S. Opalev, A.V. Scherbakov

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF ENERGY SAVING TECHNOLOGY OF BENEFICIATION OF FERRUGINOUS QUARTZITES IN THE JSC "OLKON"

Abstract

The ways to improve energy and resource efficiency technological flowsheets of beneficiation of ferruginous quartzites have been considered. A theoretical justification of the mechanism of highly selective magnetic-gravity separation for division of mineral particles with close physical properties has been proposed. The technology of production bulk magnetite concentrate at each stage of concentration with using a combination of fine screening and magnetic-gravity separation has been developed, the technological results on stadial output of commercial products with the content Fe_{total} up 65.7% to 70.0% in the processing of ferruginous quartzites on DOF JSC "OLCON" has been presented.

Keywords:

ferruginous quartzites, technological flowsheet, iron ore, energy and resource efficiency, fine screening, magnetic-gravity separation, magnetically stabilized fluidized bed, magnetic dipole, structure formation, MG-separator, stadial output of concentrate, automatization.

Эффективная работа железорудных предприятий в условиях мировой конкуренции требует не только постоянного снижения затрат на производство конечной продукции, но и диктует необходимость расширения ассортимента выпускаемой продукции - от рядовых концентратов с содержанием $Fe_{\text{общ}}$ не менее 68,5% для доменного производства до концентратов для процессов внедоменного получения стали с содержанием $Fe_{\text{общ}}$ более 70,0%. При этом постоянное повышение качества продукции необходимо осуществлять на фоне

общей тенденции снижения качества добываемых руд при существенном повышении себестоимости их добычи.

Основным направлением решения проблемы повышения качества производимых железорудных концентратов при одновременном снижении себестоимости переработки руды является внедрение новых принципов построения технологических схем обогащения с использованием мирового опыта эксплуатации современного высокоэффективного технологического оборудования.

Существующие технологические схемы магнитного обогащения железистых кварцитов большинства ГОКов построены по принципу стадийного выделения хвостов и получения готового концентрата в последней стадии обогащения, при этом общее количество стадий может достигать значений 4-5 [1-2]. Главным недостатком таких технологических схем является нерациональное использование энергии измельчающего оборудования, поскольку при данной организации массопотоков магнетитсодержащий промпродукт последовательно проходит через все стадии измельчения, что приводит к переизмельчению магнетита при низкой степени раскрытия его сростков с порообразующими минералами и, следовательно, высоким потерям тонких фракций магнетита с отвальными хвостами.

Одним из путей повышения энерго- и ресурсоэффективности технологических схем обогащения при переработке железистых кварцитов является внедрение стадийного выделения готового концентрата по мере раскрытия магнетита в каждой стадии измельчения. Практическая реализация данного принципа построения технологических схем позволит существенно снизить затраты в циклах измельчения, а также повысить выход концентрата и извлечение железа за счет снижения потерь тонких частиц магнетита в результате уменьшения степени его переизмельчения [3-5].

Мировой опыт показал, что наиболее интересным и перспективным направлением работ по решению указанной выше задачи является применение операции тонкого вибрационного грохочения в циклах измельчения вместо традиционно применяемой операции классификации в гидроциклонах [6-7]. Очевидно, что разделение материала по крупности на сите более эффективно, чем разделение в гидроциклонах, поскольку при гидроциклонировании распределение частиц по продуктам классификации происходит по крупности и плотности и носит вероятностный характер. Операция же тонкого грохочения позволяет концентрировать в подрешетном продукте преимущественно раскрытый материал, а надрешетный продукт представлен нераскрытой рудной смесью, при измельчении которой в отдельном цикле резко повышается коэффициент измельчаемости, что предопределяет уменьшение циркуляционной нагрузки в цикле измельчения-классификации. При этом задача энергоресурсосбережения решается либо путем сокращения числа мельниц при неизменной производительности секции, либо увеличением объема переработки руды на секции при неизменном фронте измельчения без снижения выхода и качества концентрата [8-9]. Такой подход модернизации технологии производства железорудных концентратов уже широко применяется в мировой практике переработки железистых кварцитов, в том числе на ряде предприятий СНГ, таких как АО «Карельский окатыш», АО «Ковдорский ГОК», АО «Соколовско-Сарбайское ГПО» и ряде других. В настоящее время на ДОФ

АО «Олкон» находятся в эксплуатации 20 единиц грохотов «Stack Sizer™» 5-дечной модели 2S648-1STK американской фирмы «Derrick Corporation» производительностью более 250 т/час твердого (рис. 1), при этом достигнуто существенное снижение энергопотребления измельчительного передела, выразившееся в уменьшении количества эксплуатируемых мельниц шаровой загрузки с двух до одной во второй стадии измельчения.

Однако получение товарного железорудного концентрата в каждой стадии обогащения применением только тонкого грохочения и последующей стандартной магнитной сепарации подрешетного продукта весьма затруднительно, поскольку магнитная сепарация, осуществляемая в фабричных условиях на серийных сепараторах, позволяет выделить в хвосты только немагнитные зерна пустой породы, а вся рудная смесь (зерна магнетита, богатые и бедные сростки) переходит в магнитный продукт.

Многолетними исследованиями Горного института КНЦ РАН показано, что операция магнитно-гравитационной сепарации (МГ-сепарации) при разделении магнетитсодержащих продуктов позволяет выделить фракции сростков в отдельный продукт (слив сепаратора), обеспечивая возможность получения готового концентрата из любой стадии технологического процесса в отличие от серийно выпускаемых магнитных сепараторов [10-11].



Рис. 1. Общий вид грохотов «Stack Sizer™» корпорации «Derrick Corporation» на ДОФ АО «Олкон»

Соответствующим подбором управляющих параметров может быть достигнута значительная селективность процесса, обеспечивающая разделение минеральных зерен с близкими физическими свойствами. Микрофотографии сливов МГ-сепарации, полученных при доводке товарного концентрата ДОФ ОАО «Олкон», представлены на рис. 2.

Значения напряженности магнитного поля и скорости восходящего водного потока, необходимые для гидротранспорта сростков через агрегированную оживленную ферросуспензию в верхнюю часть потока с последующим удалением их в слив могут быть определены из следующего теоретического представления процесса МГ-сепарации, базирующегося на теории магнито-стабилизированных оживленных слоев (Magnetically Stabilized Fluidized Bed–MSFB), основы которой заложены и развиты в работах [12-16].

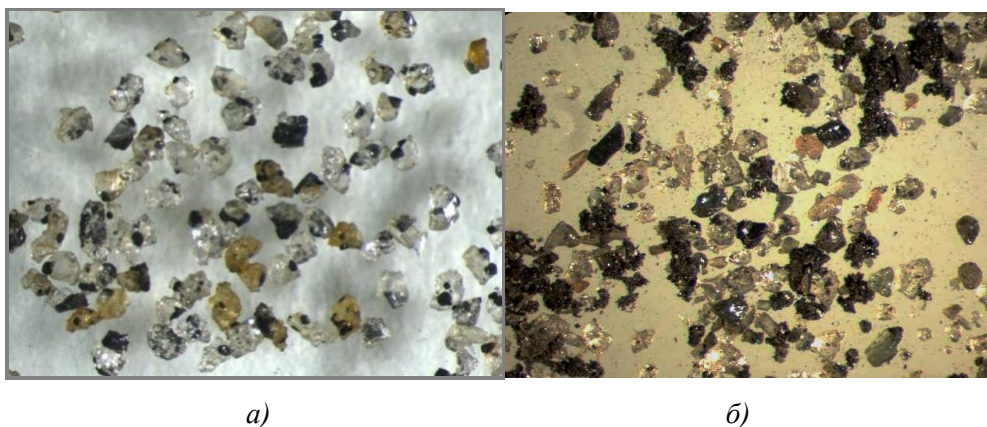


Рис. 2. Микрофотографии сливов МГ-сепарации с содержанием $Fe_{общ.}$:
а) – 16%; б) – 24%

Агрегирование ферромагнитных частиц, находящихся в оживленном слое, на который воздействуют однородным магнитным полем с напряженностью H происходит за счет силы диполь-дипольного взаимодействия \vec{F}_{mi} (силы потококо сцепления), величина которой, согласно рис. 3, может быть определена из выражения (1):

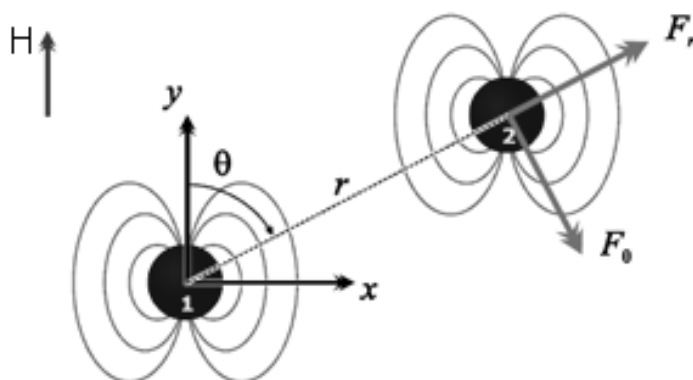


Рис. 3. Силы дипольного магнитного межчастичного взаимодействия во внешнем магнитном поле

$$\bar{F}_{mi} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{p_1 p_2}{r^2} \bar{i}, \quad (1)$$

где μ - магнитная проницаемость, p_1, p_2 - магнитные моменты частиц, r - расстояние между ними.

Продольная и поперечная составляющие этих сил, соответственно:

$$F_r = \frac{3\mu_0 |m|^2}{4\pi r^4} (1 - 3\cos^2 \theta), \quad F_\theta = \frac{3\mu_0 |m|^2}{2\pi r^4} \sin \theta \cos \theta. \quad (2)$$

В MFSB, аналогично кипящему слою, ферромагнитные агрегаты подвижны и обладают упругими свойствами, растягиваясь в направлении действия вектора скорости жидкости. Физические свойства (крупность, плотность и магнитная восприимчивость) частиц, участвующих в структурообразовании ферромагнитных агрегатов, определяют технологические свойства магнитного продукта, концентрирующегося в нижней части сепарационной зоны МГ-сепаратора, а частицы, не участвующие в процессах агрегирования, выносятся восходящим водным потоком из межагрегатного пространства в верхнюю часть сепаратора. Структурирование частиц слоя приводит к снижению коэффициента гидродинамического сопротивления для ферромагнитных частиц в D раз, где

$$D = \frac{C_{D0}|_{B_0}}{C_{D0}|_{B_0=0}}. \quad (3)$$

Теоретическая оценка коэффициента D дает значение, где

$$D = 1 - 0,56B^{0,62}, \quad (4)$$

$$B = \frac{|F_{IM,max}|}{(\rho_p - \rho_f) g V_p}, \quad (5)$$

$$|F_{IM,max}| = \frac{6\mu_0 m^2}{4\pi d_p^4}. \quad (6)$$

- максимальная сила магнитного взаимодействия.

В условиях непрерывной подачи исходной суспензии и непрерывного вывода слива с неструктурирующими частицами наблюдается процесс постоянного роста ферромагнитных агрегатов на верхней границе MSFB и их постоянного осаждения под действием гравитационной силы и вывода в концентрат сепаратора в виде суспензии с высокой плотностью.

В Горном институте Кольского научного центра РАН разработан ряд конструкций магнитно-гравитационных аппаратов различного назначения и производительности, способных селективно обогащать тонко измельченные сильно магнитные руды, обобщенная конструкция которых представлена на рис. 4.

Аппарат состоит из цилиндрико-конического корпуса из немагнитного материала (нерж. сталь, пластик), соленоидной катушки и снабжен системой автоматической разгрузки концентрата (САРК). Благодаря наличию этой системы в сепараторе поддерживается неизменный по высоте уровень

ферромагнитного слоя, что необходимо для оптимизации массопотоков внутри корпуса аппарата. Отличительной особенностью рассматриваемой конструкции является отсутствие вращающихся частей (восходяще-центробежная гидродинамика потоков промывной воды обеспечивается специальным устройством с тангенциальным подводом воды, расположенным в нижней части корпуса аппарата), простота обслуживания и отсутствие необходимости в профилактических ремонтных работах, так как износ в процессе работы аппарата практически не имеет места. С 80-х годов прошлого века по настоящее время процесс МГ-сепарации используется на ОАО «Олкон», в тот же период различные конструкции сепараторов испытывались на ряде ГОКов СССР (в т. ч. на Лебединском, Ингулецком, Костомукшском ГОКах), а также межведомственной комиссией Минчермета были рекомендованы для серийного производства.

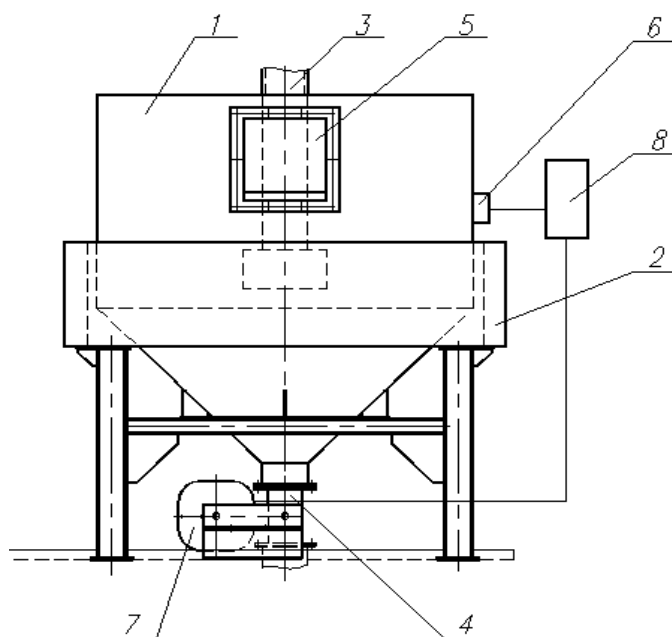


Рис. 4. Общий вид магнитно-гравитационного сепаратора, оснащенного САКР: 1 - цилиндрический корпус; 2 - соленоидная катушка; 3 - питающая труба; 4 - разгрузочный патрубок; 5 - сливной желоб; 6 - датчик уровня ферромагнитного слоя; 7 - магнитный затвор, 8 - блок управления системы автоматической разгрузки концентрата

Однако в силу существовавших тогда экономических условий (перестроечные процессы и переход на рыночную экономику) широкого применения МГ – сепараторы не получили (кроме ОАО «Олкон», где на сегодняшний день находятся в эксплуатации более 20 единиц) (рис. 5).



Рис. 5. Общий вид стадии магнитно-гравитационных сепараторов (ЭМС-150) на ДОФ АО «Олкон»

В 1992-1993 гг., после приобретения лицензии норвежской стороной, промышленный образец МГ – сепаратора (MGS-1750) в количестве 17 единиц был успешно внедрен на АО «Судварангер» в цикле классификации слива II стадии измельчения с целью исключения из процесса IV стадии измельчения и сепарации. Общий вид магнитно-гравитационного сепаратора MGS-1750 представлен на рис. 6.

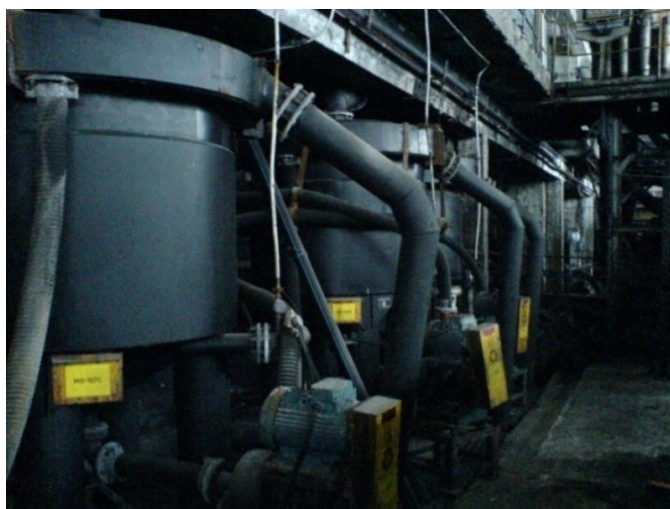


Рис.6. Общий вид стадии магнитно-гравитационной сепарации (MGS-1750) на АО «Судварангер» (Норвегия)

Прогнозированием технологических показателей разделения магнитно-гравитационной сепарации различных продуктов обогащения железистых кварцитов с низкой контрастностью физических свойств в магнитно-стабилизированной сжиженной суспензии, основанной на закономерностях магнитного

взаимодействия минеральных частиц в условиях центробежно-восходящей гидродинамики и учитывающей вещественный состав разделяемых продуктов, показано, что высокая эффективность разделения частиц магнетита и его сростков с породообразующими минералами достигается при сепарации под-решетных продуктов тонкого грохочения. В процессе технологических исследований по стадийному выделению готового концентрата на примере АО «Олкон» установлено, что напряженность магнитного поля в рабочем объеме магнитно-гравитационного сепаратора является определяющим параметром разделения, который позволяет изменять качество получаемых готовых концентратов в широком диапазоне.

На рис. 7 представлены зависимости выхода концентрата:

а) содержание $Fe_{общ}$ в концентрате; б) зависимость от напряженности магнитного поля, показывающую рост выхода концентрата при увеличении значения поля и одновременном снижении содержания железа в нем.

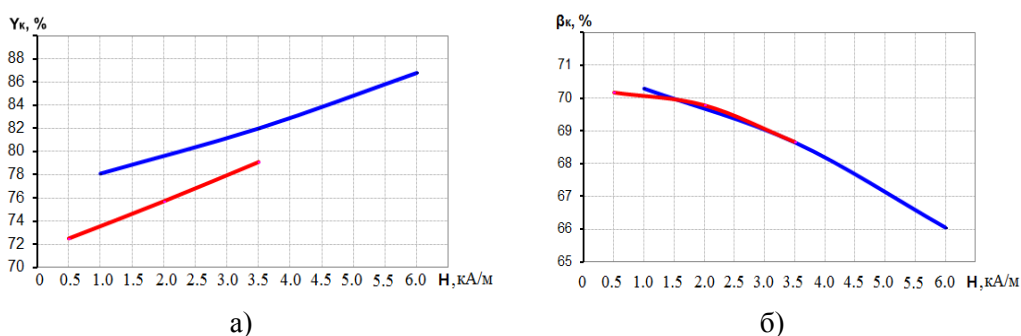


Рис. 7. Зависимость выхода концентрата:

а) и содержания $Fe_{общ}$ в нем; б) от напряженности магнитного поля для:

— - первой стадии обогащения; — - второй стадии обогащения

Проведенные технологические исследования показали принципиальную возможность применения комбинации тонкого грохочения и МГ-сепарации для получения магнетитовых концентратов с кондиционным содержанием $Fe_{общ}$ и выше (до 70%) в каждой стадии обогащения. Использование указанных выше технологических решений применительно к перерабатываемым на АО «Олкон» железистым кварцитам позволяет уже сейчас уменьшить энерго-ресурсозатраты при производстве концентрата, а в будущем решить вопросы стабилизации качества товарной продукции при внедрении соответствующих систем автоматизации технологических процессов.

Литература

1. Остапенко, П.Е. Обогащение железных руд / П.Е. Остапенко. -М.: Недра, 1985. -270 с.
2. Кармазин, В.В. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых / В.В. Кармазин, В.И. Кармазин. - М.: Изд-во МГГУ, 2005. -Т.1. -672 с.
3. Пелевин, А.Е. Стадийное выделение железного концентрата / А.Е. Пелевин // Обогащение руд. - 2007. - № 3. - С.10-15.

4. Авдохин, В.М. Основные направления развития процессов глубокого обогащения железных руд / В.М. Авдохин, С.Л. Губин // Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья: сборник трудов. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2008. -С.164-179.
5. Патковская, Н.А., Тасина, Т.И. Модернизация технологии обогащения железосодержащих руд Северо-Запада России / Н.А. Патковская, Т.И. Тасина // Обогащение руд. - 2011. - №1. -С.6-10.
6. Стаханов, В.В. Перспективы применения тонкого грохочения в технологии обогащения железорудного сырья: отчет о НИР / В.В. Стаханов, Г.В. Зайцев // НИИ «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, 2000. -167с.
7. Сухорученков, А.И. Тонкое грохочение – высокоэффективный метод повышения технологических показателей обогащения тонковкрапленных магнетитовых руд / А.И. Сухорученков, В.И. Стаханов, Г.В. Зайцев // Горный журнал. - 2001. - №4. -С.48-50.
8. Баранов, В.Ф. Пути снижения расхода электроэнергии на железорудных обогатительных фабриках / В.Ф. Баранов, В.А. Сентемова, А.О. Ядрышников // Обогащение руд. - 2000. - №2. -С.14-19.
9. Дремин, А.А. Стратегия энергосбережения при добыче и переработке железных руд / А.А. Дремин // Горный журнал. -2006. -№ 12. -С.45-47.
10. Усачев, П.А. Магнитно-гравитационное обогащение руд / П.А. Усачев, А.С. Опалев. - Апатиты: КНЦ РАН. - 1993. - 92 с.
11. Усачев, П.А. Получение высококачественных железных концентратов на обогатительной фабрике ОАО «Лебединский ГОК» / П.А. Усачев // Горный журнал. - 2000. - №3. -С.41-44.
12. Кирко, И.М., Филиппов, М.В. Особенности взвешенного слоя ферромагнитных частиц в магнитном поле / И.М. Кирко, М.В. Филиппов // Журнал технической физики. - 1960. - Т.30, № 9. - С.1081-1084.
13. Филиппов, М.В. Взвешенный слой ферромагнитных частиц и действие на него магнитного поля /М.В. Филиппов // Прикладная магнитогидродинамика. - Рига, 1961. - Т.12. - С. 215-236.
14. Rosensweig, R. E. Fluidization: Hydrodynamic stabilization with a magnetic field / R. E. Rosensweig // Science. - 1979. - Vol. 204. - P.57-60.
15. Siegel, J. Magnetized-fluidized beds / J.H. Siegel // Powder Technology. – 1991, №64. - P.1.
16. Conan, J. Fee. Stability of The Liquid-Fluidized Magnetically Stabilized Fluidized Bed / J. Fee Conan // AIChE Journal. - 1996. -Vol.42. - No.5. - P.4-46.

Сведения об авторах

Опалев Александр Сергеевич - к.т.н, старший научный сотрудник,

e-mail: opalevAS@rambler.ru

Alexander S. Opalev - Ph.D. (Tech. Sci.), senior researcher

Щербаков Алексей Владимирович - директор дробильно-обогатительной фабрики акционерного общества «Олкон»,

e-mail: av.scherbakov@olcon.ru

Aleksey V. Cherbakov – director of dressing of JSC «Olcon»

УДК 622.7:519.711.2

В.Ф. Скороходов, Р.М. Никитин, В.В. Бирюков, А.С. Степанникова
ФГБУН Горный институт КНЦ РАН

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НАД МОДЕЛЬЮ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛОВ ФЛОТАЦИОННЫМ МЕТОДОМ*

Аннотация

На примере флотации хвостов апатитового производства при получении нефелинового концентрата рассмотрена возможность применения вычислительного эксперимента для изучения распределения минералов в продукты флотации. Разработан аналитический метод инициализации узких сепарационных фракций (УСФ – Narrow Separation Fractions (NSF)), позволяющий определять интегральные значения свойств компонентов твердой фазы питания флотации, интерпретируемые как условия однозначности ее математической модели.

Ключевые слова:

узкие сепарационные фракции, свойства компонентов питания флотации, математическая модель.

V.F. Skorokhodov, R.M. Nikitin, V.V. Birukov, A.S. Stepannikova

COMPUTATIONAL EXPERIMENT ON A MODEL OF MINERALS SEPARATION BY FLOTATION

Abstract

Apatite tailings flotation during nepheline concentrate production was used as to examine possible application of a computational experiment for the purpose of studying minerals distribution in flotation products. An analytical method for initializing narrow separation fractions has been developed. The method allows determining integral values of components' properties in the solid phase of flotation feed which are interpreted as conditions of single-valuedness of its mathematic model.

Keywords

narrow separation fractions, components' properties of flotation feed, mathematic model.

Анализ состава проб хвостов производства апатитового концентрата показывает, что, при действующей на АНОФ-2 ОАО «Апатит» технологической схеме, на подготовительных операциях получения нефелинового концентрата, потери полезных минералов составляют: нефелин – 5438 тыс.т/год; эгирин – 173 тыс.т/год; полевой шпат – 1901 тыс.т/год; сфен – 74 тыс.т/год; титаномагнетит – 56 тыс.т/год. Как демонстрирует анализ продуктов основной обратной флотации нефелина, операционные потери Al_2O_3 , составляют порядка 36%.

* Работа выполнена в рамках фундаментальных научных исследований (ФНИ) по теме № 0232-2014-007 Программы ФНИ государственных академий наук на 2013-2020 годы, утвержденной Распоряжением Правительства РФ от 3 декабря 2012 г. № 2237-р, в части пункта 74 «Комплексное освоение и сохранение недр Земли, инновационные процессы разработки месторождений полезных ископаемых и глубокой переработки минерального сырья» по направлению № 5-13-0008 «Развитие методологии глубокой переработки минерального сырья на основе модифицирования технологических свойств компонентов многофазных сред и выявления закономерностей разделительного массопереноса» № г.р. 01201355279.

Повышение извлечения в концентрат Al_2O_3 возможно за счет вовлечения в переработку частиц крупных фракций (+0,20), сбрасываемых в отвал в операциях классификации, и модернизации системы подготовки, дозирования и подачи реагентов-собирателей в виде активированных водных дисперсий воздуха. Так же в ходе лабораторных исследований показано, что оптимизация операций доизмельчения хвостов апатитового производства и их магнитной сепарации, позволит с большей эффективностью раскрывать сростки нефелина и удалять из процесса темноцветные минералы. Это обеспечит увеличение извлечения Al_2O_3 до 20-22%% при существующем значении 12,64% и повышение его содержание в концентрате до 29,4-29,8%% при существующем значении 28,7% [1].

Одним из направлений исследований по данной проблеме является использование для анализа гидродинамики флотационной пульпы методов CFD (Computational Fluid Dynamics) моделирования процесса флотации [2-5].

Для многофазных систем понятие фазы более широко, чем отождествление ее с одним из агрегатных состояний вещества – газообразным, жидким или твердым. В общем случае, количество фаз неограниченно. Каждая из них должна отвечать определенным отличительным признакам. Очевидно, что этими признаками должны являться свойства различной природы, которые ответственны за характер взаимодействия данной фазы с другими фазами, с потоком в целом и с внешними воздействиями на поток.

Твердая фаза питания флотации представлена совокупностью минеральных и полиминеральных частиц, обладающих различными физическими и физико-химическими свойствами, значения величин которых имеют непрерывное распределение [6]. Проведение вычислительного эксперимента над моделью гетерогенной системы процесса флотации (ГСПФ) требует определения конечного числа твердых дисперсных (вторичных) фаз с конечными значениями величин свойств частиц их составляющих. Возможности постановки вычислительного эксперимента ограничены возможностями исполнительного устройства – компьютера, а точность расчета, определяющая успешную верификацию его результатов, зависит, в том числе, от количества вторичных фаз таким образом, что она повышается с увеличением их числа. Рост числа вторичных фаз приводит к резкому увеличению объема машинного кода задачи, объема баз данных вычислительного эксперимента и времени расчета.

В потоке флотационной пульпы можно выделить фазы, состоящие из твердых частиц, принадлежащих разным классам крупности; отличающиеся степенью раскрытия полезного минерала; проявляющие избирательную интенсивность адсорбции к используемым реагентам и т.д. Таким образом, в его состав входят фазы, состоящие из частиц, принадлежащих к различным УСФ.

Вне зависимости от того является ли моделируемый процесс процессом, где вещество переходит из одной фазы в другую или нет, вычислительный эксперимент основывается на однозначном определении начальных и граничных условий. И, если граничные условия любого сепарационного процесса – это геометрия и механика сепарационной машины, внешние энергетические воздействия (например – электромагнитное поле, теплопередача и т. д.), массовый баланс, то начальные условия это, в первую очередь, физические и физико-химические свойства УСФ, участвующих в процессе.

Для решения этой проблемы разработан аналитический метод инициализации УСФ при проведении вычислительного эксперимента над моделью ГСПФ, позволяющий определять интегральные значения свойств компонентов твердой фазы питания флотации, интерпретируемые как условия однозначности математической модели процесса флотации [7].

Метод основывается на результатах гранулометрического и минералогического анализов, а также анализа сростковых фаз питания моделируемого процесса [8]. На рис. 1 и 2 показаны общий вид пробы до разделения на классы крупности и виды двух из пяти выделенных классов крупности, а также сростковые формы нефелина в классификации по содержанию другой минеральной фазы.

В методе учтены распределение минеральных частиц по крупности, минеральный состав, степень раскрытия сростков полезного минерала, содержание полезного компонента, оценка поверхностной энергии минеральных и полиминеральных частиц. Валидация метода осуществлялась на основе оценок интегральных и пофракционных значений плотности твердой фазы и содержания полезного компонента.

Метод обеспечивает получение результатов математического моделирования процесса флотации в значениях содержания и извлечения полезного компонента и верификацию математической модели и технологической схемы реального производства или лабораторного эксперимента.

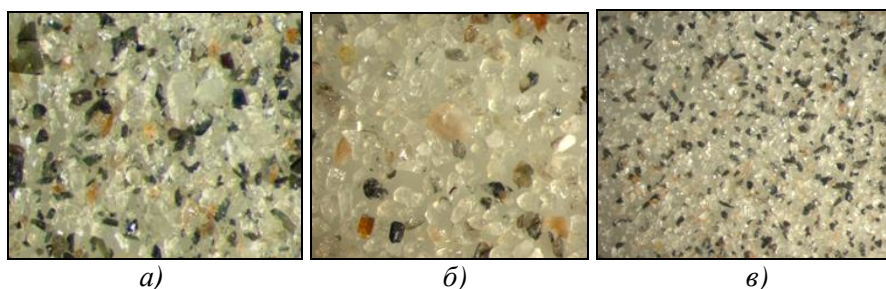


Рис. 1. а) общий вид пробы до разделения на классы крупности; б) зерно пробы класса $-0,315+0,2$ мм; в) зерно пробы класса $-0,1+0,071$ мм

Теоретическими предпосылками метода явились, интегрированные в решатель программного комплекса ANSYS Fluent (R14.5), субстанциональные уравнения многофазной модели Эйлера (Eulerian Model Theory), предназначенной для моделирования гетерогенных систем, представленных несколькими взаимодействующими фазами, количество которых может быть ограничено только возможностями исполнительного устройства и требованиями к сходимости результатов расчета. В том числе [9]:

Уравнение сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \rho_i \mathbf{v}_i \nabla = \sum_{j=1}^N J_{ji},$$

где ρ – плотность среды, \mathbf{v} – вектор скорости, t – время, ∇ – оператор Гамильтона, J_{ji} - характеристика интенсивности переноса массы от j -ой к i -ой фазе.

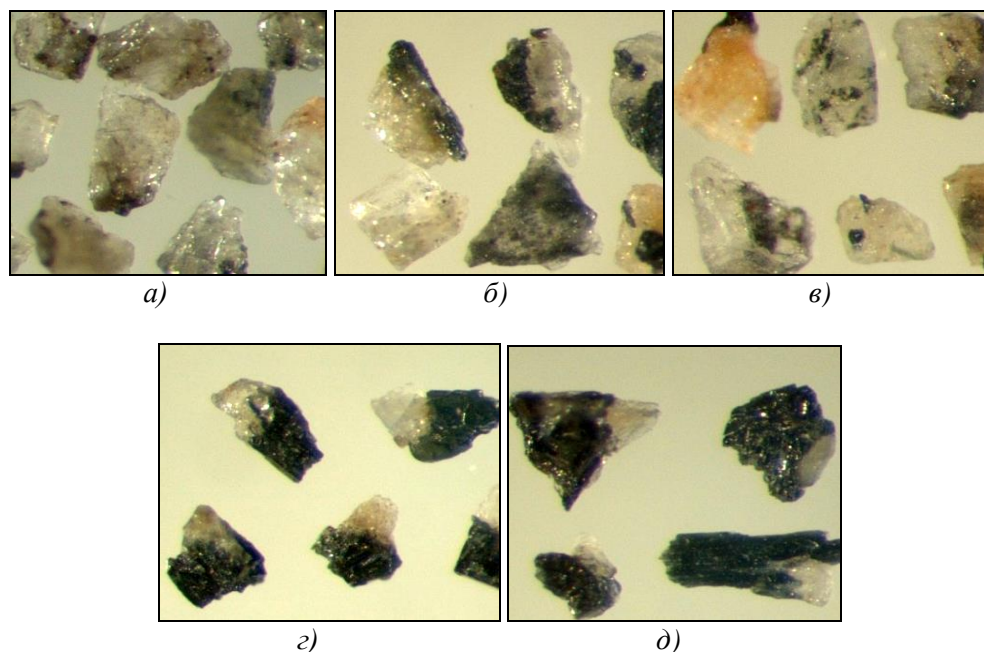


Рис. 2. Сротковые формы нефелина
 в классификации по содержанию x другой минеральной фазы:
 а) раскрытые зерна $0 < x < 5\%$; б) бедные зерна $5 < x < 25\%$;
 в) средние зерна $25 < x < 55\%$; г) богатые зерна $55 < x < 75\%$;
 д) очень богатые зерна $75 < x < 95\%$

Уравнение сохранения импульса:

$$\rho_i \frac{dv_i}{dt} = \nabla^k \sigma_i^k + \rho_i g_i + \sum_{j=1}^N (P_{ji} - J_{ji} v_i),$$

где P_{ji} – интенсивность обмена импульсом между j -ой и i -ой фазами, k – верхний индекс, указывающий на номер декартовой координаты, σ – тензор поверхностных сил, g – вектор массовых сил, относящийся к среде в целом.

Уравнение сохранения энергии:

$$\rho_i \frac{d}{dt} \left(u_i + \frac{v_i^2}{2} \right) = \nabla (c_i - q_i) + \rho_i g_i v_i + \sum_{j=1}^N \left[E_{ji} - J_{ji} \left(u_i + \frac{v_i^2}{2} \right) \right],$$

где u_i – внутренняя энергия i -ой фазы, $v_i^2/2$ – кинетическая энергия i -ой фазы, c_i – работа внешних сил, q_i – приток тепла, E_{ji} – интенсивность обмена энергией между j -ой и i -ой фазами.

Фазы гетерогенной среды, заполняя весь ее объем, неограниченно проникают друг в друга и сохраняют свой мгновенный объем. Необходимым уточнением и дополнением балансовых соотношений является введение объемной фракции фазы. Данная величина является функцией пространства и времени и численным критерием «плотности» потока:

$$\alpha_{\Sigma q} = \frac{V_{\Sigma q}}{V},$$

где $V_{\Sigma q}$ – полный объем вторичных фаз, V – объем системы, q – индекс фазы. При этом если $\alpha_{\Sigma q} < 10\%$, то поток считают разбавленным и полагают, что среднее расстояние между частицами вторичных фаз составляет не менее их удвоенного размера и межчастичным взаимодействием можно пренебречь. Алгебраическая сумма всех объемных фракций среды равна единице.

Учет фактора сопротивления в Eulerian Model Theory осуществлен в уравнении сохранения импульса, которое с введением объемной фракции вторичной фазы можно записать в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq},$$

где p – давление равномерно распределенное между всеми фазами; $\bar{\tau}_q$ – тензор напряжений q – фазы, учитывающий ее сдвиговую и объемную вязкость; \vec{R}_{pq} – сила взаимодействия между фазами ($\vec{R}_{pq} = -\vec{R}_{qp}$; $\vec{R}_{qq} = 0$):

$$\sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q); \quad K_{pq} = K_{qp},$$

где K_{pq} – межфазный коэффициент обмена импульсом. В такой форме записи уравнение сохранения импульса не предполагает межфазного массообмена и наличия внутри ГСПФ источников и стоков массы фаз. Кроме того, правая часть уравнения не учитывает роль т.н. эффектов подъема частиц в поле градиента скорости потока. Такие эффекты существенны, если частицы вторичной фазы предполагаются сравнительно крупными или объединяются в виде плотноупакованных агрегатов. Также уравнение не учитывает влияния сторонних сил, которые побуждали бы частицы любой из вторичных фаз ускоряться относительно первичной фазы.

Для режима взаимодействия пузырек газа – жидкость использована универсальная модель сопротивления [10] с коэффициентом обмена

$$K_{pq} = \frac{\alpha_q \alpha_p \rho_p f}{\tau_p},$$

где q – индекс жидкой фазы, p – индекс газовой пузырьковой фазы; время релаксации пузырька:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_e};$$

функция сопротивления:

$$f = \frac{C_D Re}{24}, \quad Re = \frac{\rho_q |\vec{v}_q - \vec{v}_p| d_p}{\mu_e};$$

коэффициент сопротивления:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,1Re^{0,75});$$

эффективная вязкость жидкой фазы с учетом влияния компонентов ММК

$$\mu_e = \frac{\mu_q}{1 - \alpha_p}.$$

Для режима взаимодействия твердая частица – жидкость использована модель сопротивления Вена и Ю [11] с коэффициентом обмена

$$K_{sl} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_l \rho_l |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{d_s \alpha_l^{2,65}},$$

где

$$C_D = \frac{24}{\alpha_l Re_s} [1 + 0,15(\alpha_l Re_s)^{0,687}], \quad Re_s = \frac{\rho_l d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{\mu_l}.$$

Для режима взаимодействия твердая частица – пузырек газа использована модель сопротивления Шиллера и Науманна [12], определяемая по аналогии с универсальной моделью сопротивления за исключением вычисления коэффициента сопротивления и числа Рейнольдса для пары вторичных фаз:

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0,15Re^{0,687})/Re & Re \leq 1000 \\ 0,44 & Re > 1000 \end{cases}, \quad Re = \frac{\rho_{rp} |\vec{v}_r - \vec{v}_p|}{\alpha_p \mu_p + \alpha_r \mu_r} d_{rp}.$$

Для режима взаимодействия твердая частица – твердая частица использована симметричная модель сопротивления Сиамлала и О’Бриена [13] без учета взаимного трения для разбавленных фаз с коэффициентом обмена

$$K_{ls} = \frac{3\alpha_s \rho_s \alpha_l \rho_l (d_l + d_s)^2}{2(\rho_l d_l^3 + \rho_s d_s^3)} |\vec{v}_l - \vec{v}_s|.$$

Особенностью метода является использование возможности определения поверхностной энергии частиц УСФ из количественной оценки поверхностной энергии минеральных зерен по установленной связи между ее величиной и значениями энергии ионного взаимодействия в кристаллической решетке минерала. Такой подход основывается на геоэнергетической теории А.Е. Ферсмана [14] и работах В.В. Зуева и др. [15], посвященных кристаллоэнергетике и оценке свойств твердых материалов.

Геоэнергетическая теория А.Е.Ферсмана рассматривает энергию ионного взаимодействия в кристаллической решетке минерала, исходя из представлений о полном потенциале ионизации (энергетической константе, эк), присущем каждому входящему в решетку аниону или катиону.

Формула, предложенная А.Е.Ферсманом, имеет вид:

$$U_v = 1071,5 \cdot \frac{\rho}{\mu} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{k_i} j_i \quad [\text{кДж/см}^3],$$

где U_v – объемная энергия ионного взаимодействия в кристаллической решетке минерала; 1071,5 – поправка на вклад ионов в энергию решетки минерала;

ρ – плотность минерала, г/см³; μ – молярная масса минерала, г/моль; n – количество сортов ионов, входящих в решетку; εK_i – энергетическая константа иона i -го сорта; j_i – количество ионов i -го сорта.

В свою очередь исследования, проведенные в работах В.В. Зуева и др., показывают, что большинство физико-химических свойств минералов может быть количественно описано с позиций удельных значений энергии ионного взаимодействия в кристаллической решетке, и позволяют проводить расчеты, в частности, поверхностной энергии минералов по линейной эмпирической зависимости

$$E_s = 0,0025 \cdot U_v + 0,3052 \text{ [Дж/м}^2\text{]}.$$

Вычислительный эксперимент над моделью гетерогенной системы процесса обратной флотации нефелина был проведен на основе инициализации узких сепарационных фракций пробы питания, имеющей состав и свойства, приведенные в таблицах 1, 2, 3 и 4.

В общем случае гранулометрический состав пробы представлен набором классов крупности частиц:

$$g_1[-d_1 + d_2], g_2[-d_2 + d_3], \dots, g_{n-1}[-d_{n-1} + d_n], g_n[-d_n].$$

Каждый класс крупности в пробе характеризуется своим выходом:

$$\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{n-1}, \gamma_n. \quad \sum_{i=1}^n \gamma_i = 1.$$

Минеральный состав пробы представлен набором минералов, распределенных в классах крупности. Этот набор упорядочен таким образом, что на первом месте в списке минералов находится минерал, представляющий наибольший исследовательский и (или) промышленный интерес:

$$m_1, m_2, \dots, m_{m-1}, m_m.$$

Распределение минералов в классах крупности учитывается весовым содержанием:

$$\beta_{m_1}^{g_1} \dots \dots \beta_{m_1}^{g_n} \quad (*)$$

$$\beta_{m_m}^{g_1} \dots \dots \beta_{m_m}^{g_n}$$

$$\sum_{j=1}^m \beta_{m_j}^{g_i} = 1. \quad \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (\beta_{m_j}^{g_i} \cdot \gamma_i) = 1.$$

Фазовый состав пробы предполагает, что все частицы пробы, в той или иной мере содержат включения минерала m_1 . В общем случае, удобно рассматривать все частицы пробы, как частицы, состоящие из минерала m_1 , но с различными по величине весового содержания (x) включениями сростков:

$$x_1[0; \delta_1] \text{ – частицы чистого минерала } m_1$$

$$x_2[\delta_1; \delta_2],$$

$$x_{k-1}[\delta_{k-2}; \delta_{k-1}],$$

$$x_k[\delta_{k-1}; 1] \text{ – частицы со следами минерала } m_1.$$

Минералогический состав пробы питания

Таблица 1

Классы, мм	Выход, %	Содержание минералов, вес %													Σ
		Нефелин	Эгирин	Полевой шпат	Сфен	Слюды	Апатит	Гидрослюды	Ильменит	Лампрофиллит	Цеолипы	Титаномагнетит	Гидроокислы Fe	Энигмагит	
-0,315+0,2	9,98	73,0	5,0	16,0	0,2	1,0	2,4	0,7	0,0	0,4	0,8	0,0	0,5	0,0	100
-0,2+0,16	11,93	73,0	8,0	13,1	0,6	0,8	2,0	1,0	0,2	0,2	0,5	0,0	0,6	0,0	100
-0,16+0,1	30,72	66,5	16,4	9,4	2,5	1,3	1,1	0,9	0,5	0,3	0,5	0,1	0,4	0,1	100
-0,1+0,071	17,58	59,0	21,2	9,0	2,8	2,0	0,9	1,1	1,5	1,2	0,4	0,3	0,3	0,3	100
-0,071	29,79	52,0	26,7	6,5	3,5	2,5	1,1	1,3	2,0	1,7	1,0	1,1	0,3	0,3	100
Итого:	100	62,3	18,2	9,6	2,4	1,7	1,3	1,0	1,0	0,9	0,7	0,4	0,4	0,2	100

Таблица 2

Минерально-фазовый состав нефелина в пробе

Классы, мм	Выход, %	Доля минерала-примеси x в сростках с нефелином, вес %.					Σ
		0 ÷ 5	5 ÷ 25	25 ÷ 55	55 ÷ 75	75 ÷ 95	
-0,315+0,2	9,98	57,7	10,1	3,8	0,7	0,7	73,0
-0,2+0,16	11,93	60,6	7,6	3,9	0,6	0,3	73,0
-0,16+0,1	30,72	61,2	3,0	1,7	0,3	0,3	66,5
-0,1+0,071	17,58	55,5	2,2	1,3	–	–	59,0
-0,071	29,79	51,5	0,3	0,2	–	–	52,0
Итого:	100	56,9	3,3	1,6	0,2	0,2	62,3

Таблица 3

Энергетические константы ионов, входящих в структуры кристаллических решеток минералов, содержащихся в пробе

<i>H</i>	<i>O</i>	<i>F</i>	<i>Na</i>	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Ti</i>	<i>Fe²⁺</i>	<i>Fe³⁺</i>	<i>Sr</i>
0,32	1,55	0,37	0,45	2,15	4,95	8,60	14,40	0,36	1,75	8,40	2,12	5,15	1,58

Таблица 4

Представление чистых минералов в виде сумм оксидов и расчетные данные*

л	Минера	ρ	μ	Химическая формула	ΔV^*	U_{μ}^*	U_v^*	E_s^*
	Нефелин	2,625	580	$2KNa_3[AlSiO_4]_4 = 3Na_2O + 4Al_2O_3 + 8SiO_2 + K_2O$	1,087	86481	391	1,284
	Эгирин	3,500	231	$2NaFe[Si_2O_6] = Na_2O + Fe_2O_3 + 4SiO_2$	0,896	34395	521	1,608
	Полевой шпат	2,645	277	$2K[AlSi_3O_8] = K_2O + Al_2O_3 + 6SiO_2$	1,032	46621	445	1,418
	Сфен	3,500	196	$CaTi[SiO_4]O = CaO + TiO_2 + SiO_2$	0,955	28395	507	1,573
	Апатит	3,300	504	$2Ca_5[PO_4]_3F = 9CaO + 3P_2O_5 + CaF_2$	0,846	75991	498	1,549
	Слюда (флогопит)	2,930	415	$2KMg_3[Si_3AlO_{10}] \cdot (OH)_2 =$ $= K_2O + 6MgO + Al_2O_3 + 6SiO_2 + 2H_2O$	0,926	60861	430	1,379
	Гидрослюда (по вермикулиту)	2,427	512	$2(Fe^{2+}Fe^{3+}Mg[Si_3AlO_{10}] \cdot (OH)_2 \cdot 4H_2O) =$ $= 2MgO + 2Fe^{2+}O + Fe_2^{3+}O_3 + Al_2O_3 + 6SiO_2 + 10H_2O$	1,002	73044	346	1,171
	Ильменит	4,750	152	$FeTiO_3 = FeO + TiO_2$	1,000	16255	508	1,575
	Лампрофиллит	3,470	790	$2(Sr_2Na_3Ti_3[Si_2O_7]_2O_3(OH)) =$ $= 4SrO + 3Na_2O + 6TiO_2 + 8SiO_2 + H_2O$	0,944	98932	435	1,392
	Цеолиты (по натролату)	2,255	360	$Na_2[Al_2Si_3O_{10}] \cdot H_2O = Na_2O + Al_2O_3 + 3SiO_2 + 2H_2O$	1,151	58172	364	1,216
	Титаномагнетит	5,050	456	$Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4 = FeO + Fe_2O_3 ;$ $Fe^{2+}TiO_4 = 2FeO + TiO_2$	1,028	40138	445	1,416
	Гидроокислы Fe (по гётиту)	4,260	89	$8(Fe^{3+}O(OH)) = 4Fe_2O_3 + 4H_2O$	0,860	9183	440	1,404
	Энигматит	3,790	862	$Na_2Fe_5^{2+}Ti[Si_6O_{18}]O_2 = Na_2O + 5FeO + TiO_2 + 6SiO_2$	0,930	109829	483	1,512

 ΔV^* – структурная рыхлость минерала; U_{μ}^* – молярная энергия связи кристаллической решетки минерала, кДж/моль; U_v^* – объемная энергия связи кристаллической решетки минерала, кДж/см³; E_s^* – поверхностная энергия, Дж/м².

Тогда строку (*) можно представить как

$$\beta_{m_1}^{g_1} \dots \dots \beta_{m_1}^{g_n} \Leftrightarrow \frac{\beta_{m_1 x_1}^{g_1} \dots \dots \beta_{m_1 x_1}^{g_n}}{\beta_{m_1 x_k}^{g_1} \dots \dots \beta_{m_1 x_k}^{g_n}}$$

$$\sum_{f=1}^k \beta_{m_1 x_f}^{g_1} = \beta_{m_1}^{g_1}, \dots, \sum_{f=1}^k \beta_{m_1 x_f}^{g_n} = \beta_{m_1}^{g_n},$$

а общую форму результатов гранулометрического, минералогического и фазового анализов пробы можно представить в виде таблицы 5.

Таблица 5

Содержание минералов и сростковых форм в пробе

	g_1	-----	g_n	Итого:
	γ_1	-----	γ_n	
$m_1 x_1$	$\beta_{m_1 x_1}^{g_1}$	-----	$\beta_{m_1 x_1}^{g_n}$	$\sum_{i=1}^n (\beta_{m_1 x_1}^{g_i} \cdot \gamma_i)$
-----	-----	-----	-----	-----
$m_1 x_k$	$\beta_{m_1 x_k}^{g_1}$	-----	$\beta_{m_1 x_k}^{g_n}$	$\sum_{i=1}^n (\beta_{m_1 x_k}^{g_i} \cdot \gamma_i)$
m_2	$\beta_{m_2}^{g_1}$	-----	$\beta_{m_2}^{g_n}$	$\sum_{i=1}^n (\beta_{m_2}^{g_i} \cdot \gamma_i)$
-----	-----	-----	-----	-----
m_m	$\beta_{m_m}^{g_1}$	-----	$\beta_{m_m}^{g_n}$	$\sum_{i=1}^n (\beta_{m_m}^{g_i} \cdot \gamma_i)$
Итого:	$\sum_{f=1}^k \beta_{m_1 x_f}^{g_1} +$ $+ \sum_{j=2}^m \beta_{m_j}^{g_1} = 1$	-----	$\sum_{f=1}^k \beta_{m_1 x_f}^{g_n} +$ $+ \sum_{j=2}^m \beta_{m_j}^{g_n} = 1$	$\sum_{f=1}^k \sum_{i=1}^n (\beta_{m_1 x_f}^{g_i} \cdot \gamma_i) +$ $+ \sum_{j=2}^m \sum_{i=1}^n (\beta_{m_j}^{g_i} \cdot \gamma_i) = 1$

Общая форма результатов гранулометрического, минералогического и фазового анализов пробы позволяет определить значение ее плотности. Данная величина не используется при постановке вычислительного эксперимента, но позволяет осуществлять в рамках выполнения метода его валидацию. Очевидно, что переход от совокупности минеральных и полиминеральных частиц, обладающих различными свойствами, значения величин которых имеют непрерывное распределение, к УСФ с набором интегральных значений параметров,

присущих каждой из них, не должен повлиять на изменение величины плотности пробы.

Для определения значения плотности пробы необходимо знать значения величин плотностей минералов ρ_{m_j} , входящих в ее минеральный состав.

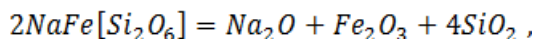
Формула для расчета плотности пробы имеет вид:

$$\rho_{solid} = \left(\sum_{f=1}^k \sum_{i=1}^n \frac{\beta_{m_1 x_f}^{g_i} \cdot \gamma_i}{\rho_{m_1}} + \sum_{j=2}^m \sum_{i=1}^n \frac{\beta_{m_j}^{g_i} \cdot \gamma_i}{\rho_{m_j}} \right)^{-1} . \quad (1)$$

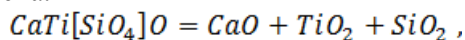
Поскольку на последующих этапах выполнения метода, промежуточные результаты сводятся к виду, представленному в таблице 5, расчет плотности пробы по приведенной формуле (1) на каждом из этапов должен давать одинаковый результат.

Процесс флотации направлен на повышение содержания того или иного минерала, содержащего полезный компонент, в концентрате. Полезным компонентом, таким образом, является не сам минерал, извлекаемый в концентрат, а один из составляющих его компонентов, как правило, оксид. В случае апатитового концентрата, например, таковым является пятиокись фосфора, в случае нефелинового концентрата оксид алюминия – Al_2O_3 и т.д.

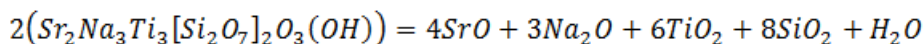
Расчет весового содержания полезного компонента в отдельных минералах и в питании флотации в целом основан на том, что каждый минерал можно представить как набор оксидов. Например, для эгирина такой набор имеет вид:



для сфена:



для лампрофиллита:

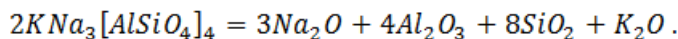


и т.д.

Для реализации метода введем следующие обозначения:

a_j – первый коэффициент, используемый в разложении химической формулы j – го минерала на оксиды. Например, для эгирина $a = 2$, для сфена $a = 1$, для лампрофиллита $a = 2$, и т.д.

b_ξ ($1 \leq \xi \leq E$) – вторые коэффициенты, показывающие сколько «молекул» того или иного оксида участвует в разложении химической формулы минерала. Рассмотрим для примера химическую формулу нефелина и соответствующий ей набор оксидов:



В примере – $a = 2$; $b_1 = 3$; $b_2 = 4$; $b_3 = 8$; $b_4 = 1$.

E – полное количество различных оксидов, входящих в различных минералах в пробу.

μ_ξ – молярная масса ξ – го оксида.

M_j – молярная масса j – го минерала.

Тогда весовое содержание ξ – го оксида в j – ом минерале можно считать по формуле:

$$\beta_{\xi}^j = \frac{b_{\xi}^j \cdot \mu_{\xi}}{a_j \cdot M_j} \cdot \sum_{\xi=1}^{\Xi} \beta_{\xi}^j = 1. \quad (2)$$

Используя формулу (2), расчет весового содержания оксида в питании флотации в целом можно осуществить по формуле:

$$\beta_{\xi}^{solid} = \sum_{j=1}^m \left(\beta_{\xi}^j \cdot \sum_{i=1}^n (\beta_{m_j}^{g_i} \cdot \gamma_i) \right) \cdot \sum_{\xi=1}^{\Xi} \beta_{\xi}^{solid} = 1. \quad (3)$$

Очевидно, что УСФ можно сформировать, группируя ближайшие столбцы и строки таблицы 5. Тогда соответственно УСФ будут размещены в более широкие классы крупности и обобщенные сростковые формы. Алгоритм такого преобразования для сведения таблицы 5 к размеру 3×3 можно представить следующим образом.

Объединим набор классов крупности в три группы. Тогда

$$g_1^*[-d_1 + d_{n-\Delta_1}], \quad g_2^*[-d_{n-\Delta_1} + d_{n-\Delta_2}], \quad g_3^*[-d_{n-\Delta_2}],$$

и

$$\gamma_1^* = \sum_{i=1}^{n-\Delta_1-1} \gamma_i; \quad \gamma_2^* = \sum_{i=n-\Delta_1}^{n-\Delta_2-1} \gamma_i; \quad \gamma_3^* = \sum_{i=n-\Delta_2}^n \gamma_i \cdot \sum_{i=1}^3 \gamma_i^* = 1.$$

Результат преобразования целесообразно проверить по параметру плотности твердого в питании моделируемого процесса флотации:

$$\rho_{solid} = \left(\sum_{f=1}^k \sum_{i=1}^3 \frac{\beta_{m_1 x_f}^{g_i^*} \cdot \gamma_i^*}{\rho_{m_1}} + \sum_{j=2}^m \sum_{i=1}^3 \frac{\beta_{m_j}^{g_i^*} \cdot \gamma_i^*}{\rho_{m_j}} \right)^{-1}. \quad (4)$$

Сгруппируем все частицы, составляющие твердое пробы, как частицы, состоящие из минерала m_1 , но с различными по величине весового содержания (x^*) включениями сростков таким образом, что:

- $x_1^*[0; \delta_1^*]$ – частицы чистого минерала m_1 ,
- $x_2^*[\delta_1^*; \delta_2^*]$ – частицы сростковых форм минерала m_1 ,
- $x_3^*[\delta_2^*; 1]$ – частицы со следами минерала m_1 .

Очевидно, что
 $\delta_1^* = \delta_1, \quad \delta_2^* = \delta_{k-1}.$

Результат преобразования целесообразно проверить по значению плотности твердого в питании моделируемого процесса флотации:

$$\rho_{solid} = \left(\sum_{f=1}^3 \sum_{i=1}^3 \frac{\beta_{m_1 x_f}^{g_i^*} \cdot \gamma_i^*}{\rho_{m_1}} + \sum_{j=2}^m \sum_{i=1}^3 \frac{\beta_{m_j}^{g_i^*} \cdot \gamma_i^*}{\rho_{m_j}} \right)^{-1}. \quad (5)$$

На данном этапе можно выделить первые три УСФ, состоящие из частиц чистого минерала m_1 :

Фракция ph_{11} : Группа крупности g_1^* , выход группы крупности γ_1^* , содержание в группе крупности $\beta_{m_1 x_1}^{g_1^*}$, плотность ρ_{m_1} , весовое содержание ξ – го оксида

$$\beta_{\xi}^1 = \frac{b_{\xi}^1 \cdot \mu_{\xi}}{a_1 \cdot M_1}.$$

Размер частиц, входящих во фракцию определим следующим способом:

$$d_1^* = \sum_{i=1}^{n-\Delta_1-1} \left(\frac{d_i + d_{i+1}}{2} \cdot \frac{\gamma_i}{\gamma_1^*} \right).$$

Фракция ph_{12} : Группа крупности g_2^* , выход группы крупности γ_2^* , содержание в группе крупности $\beta_{m_1 x_1}^{g_2^*}$, плотность ρ_{m_1} , весовое содержание ξ – го оксида β_{ξ}^1 , размер частиц:

$$d_2^* = \sum_{i=n-\Delta_1}^{n-\Delta_2-1} \left(\frac{d_i + d_{i+1}}{2} \cdot \frac{\gamma_i}{\gamma_1^*} \right).$$

Фракция ph_{13} : Группа крупности g_3^* , выход группы крупности γ_3^* , содержание в группе крупности $\beta_{m_1 x_1}^{g_3^*}$, плотность ρ_{m_1} , весовое содержание ξ – го оксида β_{ξ}^1 , размер частиц:

$$d_3^* = \sum_{i=n-\Delta_2}^n \left(\frac{d_i + d_{i+1}}{2} \cdot \frac{\gamma_i}{\gamma_1^*} \right).$$

Для d_3^* отметим, что $d_{n+1} = 0$.

Далее:

Определим среднее значение диапазона $[\delta_1^*; \delta_2^*]$:

$$\overline{\delta_{1/2}^*} = \frac{\delta_1^* + \delta_2^*}{2}.$$

Для каждой группы крупности рассчитаем усредненную величину вхождения сростковой фазы в m_1 :

$$\beta_{m_1 x_2}^{g_1^* f} = \frac{\beta_{m_1 x_2}^{g_1^*} \cdot \overline{\delta_{1/2}^*}}{1 - \overline{\delta_{1/2}^*}}; \quad \beta_{m_1 x_2}^{g_2^* f} = \frac{\beta_{m_1 x_2}^{g_2^*} \cdot \overline{\delta_{1/2}^*}}{1 - \overline{\delta_{1/2}^*}}; \quad \beta_{m_1 x_2}^{g_3^* f} = \frac{\beta_{m_1 x_2}^{g_3^*} \cdot \overline{\delta_{1/2}^*}}{1 - \overline{\delta_{1/2}^*}}.$$

Для каждой группы крупности рассчитаем полную величину содержания минералов сростковой фазы:

$$\sum_{j=2}^m \beta_{m_j}^{g_1^*}; \quad \sum_{j=2}^m \beta_{m_j}^{g_2^*}; \quad \sum_{j=2}^m \beta_{m_j}^{g_3^*}.$$

Для каждой группы крупности и каждого минерала сростковой фазы рассчитаем величину его содержания в ней:

$$\beta_{m_j x_2}^{g_i^* f} = \beta_{m_j x_2}^{g_i^*} \cdot \beta_{m_1 x_2}^{g_i^* f} / \sum_{j=2}^m \beta_{m_j}^{g_i^*}.$$

Для каждой группы крупности рассчитаем величину плотности сростковой фазы:

$$\rho_{2i} = \frac{\beta_{m_1 x_2}^{g_i^*} + \sum_{j=2}^m \beta_{m_j x_2}^{g_i^* f}}{\frac{\beta_{m_1 x_2}^{g_i^*}}{\rho_{m_1}} + \sum_{j=2}^m \frac{\beta_{m_j x_2}^{g_i^* f}}{\rho_{m_j}}}.$$

Для каждой группы крупности рассчитаем величину содержания ξ – го оксида в сростковой фазе:

$$\beta_{\xi}^{2i} = \frac{\beta_{m_1 x_2}^{g_i^*} \cdot \beta_{\xi}^1 + \sum_{j=2}^m \beta_{m_j x_2}^{g_i^* f} \cdot \beta_{\xi}^j}{\beta_{m_1 x_2}^{g_i^*} + \sum_{j=2}^m \beta_{m_j x_2}^{g_i^* f}}.$$

На данном этапе можно выделить вторые три УСФ, состоящие из частиц сростковых форм минерала m_1 :

Фракция ph_{21} : Группа крупности g_1^* , выход группы крупности γ_1^* , содержание в группе крупности

$$\beta_{21} = \beta_{m_1 x_2}^{g_1^*} + \sum_{j=2}^m \beta_{m_j x_2}^{g_1^* f},$$

плотность ρ_{21} , весовое содержание ξ – го оксида β_{ξ}^{21} , размер частиц, входящих во фракцию d_1^* .

Фракция ph_{22} : Группа крупности g_2^* , выход группы крупности γ_2^* , содержание в группе крупности

$$\beta_{22} = \beta_{m_1 x_2}^{g_2^*} + \sum_{j=2}^m \beta_{m_j x_2}^{g_2^* f},$$

плотность ρ_{22} , весовое содержание ξ – го оксида β_{ξ}^{22} , размер частиц, входящих во фракцию d_2^* .

Фракция ph_{23} : Группа крупности g_3^* , выход группы крупности γ_3^* , содержание в группе крупности

$$\beta_{23} = \beta_{m_1 x_2}^{g_3^*} + \sum_{j=2}^m \beta_{m_j x_2}^{g_3^* f},$$

плотность ρ_{23} , весовое содержание ξ – го оксида β_{ξ}^{23} , размер частиц, входящих во фракцию d_3^* .

Для каждой группы крупности и каждого минерала фазы, состоящей из частиц со следами минерала m_1 , рассчитаем величину его содержания в ней:

$$\beta_{m_j x_2}^{g_i^* f} = \beta_{m_j}^{g_i^*} - \beta_{m_j x_2}^{g_i^*}.$$

Для каждой группы крупности рассчитаем величину плотности фазы, состоящей из частиц со следами минерала m_1 :

$$\rho_{3i} = \frac{\beta_{m_1 x_3^*}^{g_i^*} + \sum_{j=2}^m \beta_{m_j x_3^*}^{g_i^* f}}{\beta_{m_1 x_3^*}^{g_i^*} + \sum_{j=2}^m \frac{\beta_{m_j x_3^*}^{g_i^* f}}{\rho_{m_j}}}$$

Для каждой группы крупности рассчитаем величину содержания ξ – го оксида в фазе, состоящей из частиц со следами минерала m_1 :

$$\beta_{\xi}^{3i} = \frac{\beta_{m_1 x_3^*}^{g_i^*} \cdot \beta_{\xi}^1 + \sum_{j=2}^m \beta_{m_j x_3^*}^{g_i^* f} \cdot \beta_{\xi}^j}{\beta_{m_1 x_3^*}^{g_i^*} + \sum_{j=2}^m \beta_{m_j x_3^*}^{g_i^* f}}$$

На данном этапе можно выделить оставшиеся три УСФ, состоящие из частиц со следами минерала m_1 :

Фракция ph_{31} : Группа крупности g_1^* , выход группы крупности γ_1^* , содержание в группе крупности

$$\beta_{31} = \beta_{m_1 x_3^*}^{g_1^*} + \sum_{j=2}^m \beta_{m_j x_3^*}^{g_1^* f},$$

плотность ρ_{31} , весовое содержание ξ – го оксида β_{ξ}^{31} , размер частиц, входящих во фракцию d_1^* .

Фракция ph_{32} : Группа крупности g_2^* , выход группы крупности γ_2^* , содержание в группе крупности

$$\beta_{32} = \beta_{m_1 x_3^*}^{g_2^*} + \sum_{j=2}^m \beta_{m_j x_3^*}^{g_2^* f},$$

плотность ρ_{32} , весовое содержание ξ – го оксида β_{ξ}^{32} , размер частиц, входящих во фракцию d_2^* .

Фракция ph_{33} : Группа крупности g_3^* , выход группы крупности γ_3^* , содержание в группе крупности

$$\beta_{33} = \beta_{m_1 x_3^*}^{g_3^*} + \sum_{j=2}^m \beta_{m_j x_3^*}^{g_3^* f},$$

плотность ρ_{33} , весовое содержание ξ – го оксида β_{ξ}^{33} , размер частиц, входящих во фракцию d_3^* .

Введем обозначения для содержания фракций в группах крупности:

$$\beta_{m_1 x_1^*}^{g_1^*} = \beta_{11}, \quad \beta_{m_1 x_1^*}^{g_2^*} = \beta_{12}, \quad \beta_{m_1 x_1^*}^{g_3^*} = \beta_{13}.$$

Также: $\rho_{m_1} = \rho_{11} = \rho_{12} = \rho_{13}$.

Результат преобразования целесообразно привести к виду таблицы 5 (таблица 6) и выполнить проверку по параметру плотности твердого в питании моделируемого процесса флотации:

$$\rho_{solid} = \left(\sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 \frac{\beta_{ji} \cdot \gamma_i^*}{\rho_{ji}} \right)^{-1}.$$

Таблица 6

УСФ нефелина					
\bar{d} , мм		0,2153	0,1300	0,0541	$\Sigma(\beta_{ij})$
Выход фракции		0,2191	0,3072	0,4737	
Сростковые формы нефелина	$x_1^* [< 5\%]$ – раскрытые частицы нефелина	$\beta_{11} = 0,593$ $\beta_{Al_2O_3}^{11} = 0,3448$ $\beta_{P_2O_5}^{11} = 0$ $\rho_{11} = 2,625$ $E_s^{11} = 1,284$	$\beta_{12} = 0,612$ $\beta_{Al_2O_3}^{12} = 0,3448$ $\beta_{P_2O_5}^{12} = 0$ $\rho_{12} = 2,625$ $E_s^{12} = 1,284$	$\beta_{13} = 0,530$ $\beta_{Al_2O_3}^{13} = 0,3448$ $\beta_{P_2O_5}^{13} = 0$ $\rho_{13} = 2,625$ $E_s^{13} = 1,284$	0,5689
	$x_2^* [5 \div 75\%]$ – сростковые частицы	$\beta_{21} = 0,221$ $\beta_{Al_2O_3}^{21} = 0,2509$ $\beta_{P_2O_5}^{21} = 0,0137$ $\rho_{21} = 2,729$ $E_s^{21} = 1,347$	$\beta_{22} = 0,083$ $\beta_{Al_2O_3}^{22} = 0,2317$ $\beta_{P_2O_5}^{22} = 0,0056$ $\rho_{22} = 2,811$ $E_s^{22} = 1,362$	$\beta_{23} = 0,027$ $\beta_{Al_2O_3}^{23} = 0,2241$ $\beta_{P_2O_5}^{23} = 0,0038$ $\rho_{23} = 2,852$ $E_s^{23} = 1,364$	0,0867
	$x_3^* [> 75\%]$ – частицы со следами нефелина	$\beta_{31} = 0,187$ $\beta_{Al_2O_3}^{31} = 0,1161$ $\beta_{P_2O_5}^{31} = 0,0333$ $\rho_{31} = 2,893$ $E_s^{31} = 1,446$	$\beta_{32} = 0,305$ $\beta_{Al_2O_3}^{32} = 0,0649$ $\beta_{P_2O_5}^{32} = 0,0137$ $\rho_{32} = 3,138$ $E_s^{32} = 1,501$	$\beta_{33} = 0,443$ $\beta_{Al_2O_3}^{33} = 0,0431$ $\beta_{P_2O_5}^{33} = 0,0020$ $\rho_{33} = 3,276$ $E_s^{33} = 1,516$	0,3444
$\Sigma(\beta_{ij})$		1,000	1,000	1,000	1,0000

\bar{d} – эффективный размер зерна фракции;

x_2^* – диапазон значений содержания в зерне фракции минералов – сростков с нефелином;

β_{ij} – содержание фракции;

$\beta_{Al_2O_3}^{ij}$ – содержание во фракции полезного компонента;

$\beta_{P_2O_5}^{ij}$ – содержание во фракции контрольного компонента (для верификации результатов эксперимента);

ρ_{ij} – плотность зерна фракции;

E_s^{ij} – поверхностная энергия зерен фракции.

Таким образом, расчетный алгоритм метода позволил из всей совокупности данных о составе пробы, полученных в ходе ее исследования и проведенных расчетов, инициализировать конечное число УСФ нефелина с конечными значениями свойств, определяющими результат флотационного процесса.

В основной нефелиновой флотации полезный компонент извлекается в камерный продукт, а в пенный продукт извлекаются апатит и темноцветные минералы. Эта операция на АНОФ-2 ОАО «Апатит» осуществляется в двух-камерных флотационных машинах ОК-38 производства компании Outokumpu (Финляндия), соединенных по три в две параллельные технологические линии, расположенные на спадающих по ходу пульпы уровнях.

Геометрический образ модели камеры флотационной машины ОК-38 создан в программной среде ANSYS Fluent с использованием сеточного генератора Gambit и включает в себя область пульпы до нижнего уровня захвата пеносъемных механизмов, области пульпы в зонах люка загрузки пульпы и люка выгрузки камерного продукта, область импеллера и область статора. Основой создания геометрического образа камеры флотационной машины явилась конструкторская документация, разработанная компанией Outokumpu. Конструктивные элементы камеры флотационной машины ОК-38 показаны на рис. 3.

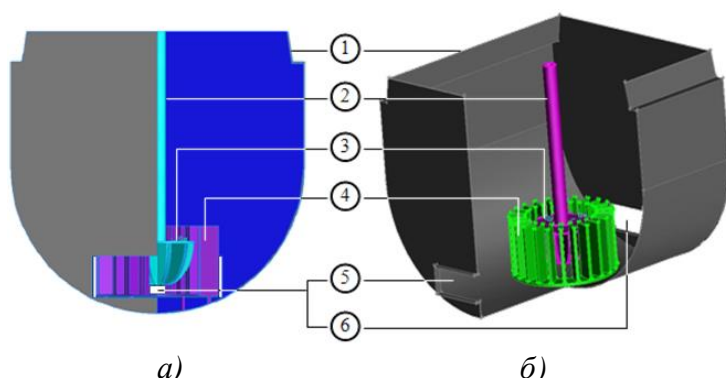


Рис. 3. Конструктивные элементы флотационной машины ОК-38:
 а) фронтальная проекция; б) изометрическая проекция;
 1 – камера; 2 – вал импеллера; 3 – импеллер; 4 – статор;
 5 – люк загрузки пульпы; 6 – люк выгрузки камерного продукта

При построении модели разделительного процесса важно соблюдение условий реального производства. Основой расчета объемных характеристик модели явилась технологическая схема получения нефелинового концентрата в ОАО «Апатит» (рис. 4).

ММС в слабом поле				Условные обозначения			
100	0,65	215,3	333,7	γ %	βP_2O_5 %	Q т/ч	W м ³ /ч
23,07				βAl_2O_3 %			
100	100	39,22	431,6	εAl_2O_3 %	εP_2O_5 %	% тв.	V м ³ /ч
Немагнитный продукт							
Основная нефелиновая флотация							
52,00	0,38	112,0	92,7	48,00	0,94	103,3	241,0
28,38				17,31			
64,00	30,61	54,71	153,7	36,00	69,39	30,00	277,9
Камерный продукт				Пенный продукт			

Рис. 4. Качественно-количественные показатели операции основной нефелиновой флотации в ОАО «Апатит»

Исходя из количества камер двухкамерных машин ОК-38, равного шести ($z = 6$), и определенных для данной технологической схемы коэффициентов учета интенсивности потоков жидкой и твердой фазы в многокамерной компоновке передела флотации

$$k_w = 1 - z \sqrt{\frac{W_{\text{кам.}}}{W_{\text{пит.}}}} = 1 - 6 \sqrt{\frac{92,7}{333,7}} = 0,192 ;$$

$$k_s = 1 - z \sqrt{\frac{V_{\text{кам.}} - W_{\text{кам.}}}{V_{\text{пит.}} - W_{\text{пит.}}}} = 1 - 6 \sqrt{\frac{61}{97,9}} = 0,076 ,$$

рассчитаны базовые параметры качественно-количественных показателей CFD модели ГСПФ в первой камере, необходимые как в процессе задания условий однозначности модели, так и при верификации результатов вычислительного эксперимента (рис. 5).

Коэффициенты учета интенсивности потоков жидкой и твердой фазы определяют покамерную развертку баланса их объемных расходов, учитывая последовательный отвод хвостов в переделе с пенным продуктом. Так для первой камеры соответственно получим:

$$W_{\text{пен.}} = k_w \cdot W_{\text{пит.}} = 0,192 \cdot 333,7 = 64,1 \text{ м}^3/\text{ч} .$$

$$W_{\text{кам.}} = W_{\text{пит.}} - W_{\text{пен.}} = 333,7 - 64,1 = 269,6 \text{ м}^3/\text{ч} .$$

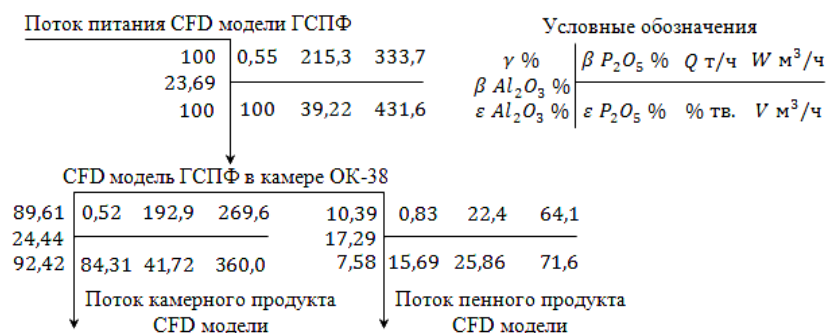


Рис. 5. Базовые параметры качественно-количественных показателей CFD модели ГСПФ в первой камере технологической цепочки нефелиновой флотации с учетом результатов анализа пробы

Инициализация УСФ и определение граничных условий ГСПФ обусловили выбор ключевых настроек решателя программы ANSYS Fluent.

За основу был принят переходной (Transient) субстанциональный режим решателя, алгоритмы которого учитывают в уравнениях математической модели присутствие производной параметров по времени.

Применительно к узкой направленности данной работы, основное внимание было сконцентрировано на рассмотрении и применении математического аппарата Eulerian Model Theory (рис. 6). Это было обосновано тем, что

процесс флотации протекает в многофазном плотном потоке; отношение плотностей фаз отлично от единицы, а частицы, которые их составляют, проявляют и инертные, и поверхностные свойства, что в значительной мере определяет характер и интенсивность межфазного взаимодействия.

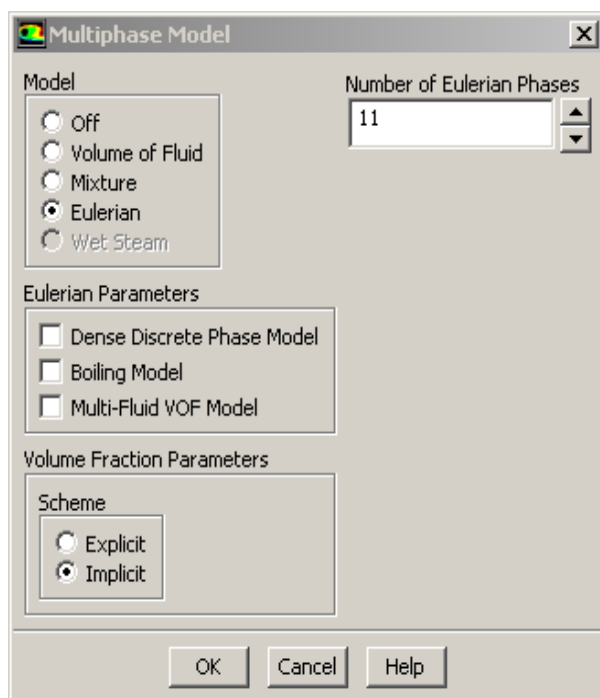


Рис. 6. Блок интерфейса ANSYS Fluent «Multiphase Model»

В свою очередь Eulerian Model Theory, как производная Euler – Euler approach и теории многоскоростного многофазного континуума (ММК) [16], дополненная введением понятия объемной фракции вторичной фазы, предполагает возможность сделать ряд существенных допущений в отношении как системы в целом, так и каждой вторичной фазы в отдельности:

- Система изобарна, т.е. первичная и любая из вторичных фаз испытывают постоянное равномерно распределенное давление.
- В силу ничтожности энергии локальных колебаний твердых частиц около их центров тяжести по сравнению с кинетической энергией ГСПФ, полной энергией таких колебаний можно пренебречь.
- Совокупности твердых частиц, представляющих любую одну из вторичных фаз, движутся в элементарных объемах (конечных элементах) модели ГСПФ подобно потоку псевдо жидкой фазы. Тем самым в модели ГСПФ в любой момент времени можно выделить поток отдельной твердой фазы, который подобно реальной жидкости характеризуется свойством вязкости.
- Явления вязкого трения и разница инерционных свойств различных фаз обуславливают даже при незначительных значениях скоростного режима формирование зон турбулентной активности. Турбулентность негативно влияет на процесс флотации в силу проявления значительных разностей центробежных

составляющих скоростей дисперсной газовой и различных твердых фаз, что вызывает резкое снижение количества элементарных актов флотации.

- Мгновенный объем ГСПФ большей частью содержит первичную фазу и в меньшей степени распределенные в нем вторичные фазы, которые двигаются взаимопроникая друг в друга, образуя в совокупности ММК флотации.

- Каждая из вторичных фаз движется в модели ГСПФ одновременно со всеми остальными фазами. В каждом элементарном объеме модели ГСПФ в любой момент времени могут быть обнаружены частицы, представляющие с различной вероятностью, весь набор фаз. В зависимости от принадлежности к той или иной вторичной фазе, разные частицы испытывают неодинаковое воздействие со стороны ГСПФ и, в свою очередь, влияют на движение и первичной и вторичных фаз. Eulerian Model Theory учитывает этот эффект взаимного влияния движения фаз посредством введения различных математических моделей фактора сопротивления.

Несмотря на сложность явления турбулентности, многообразие и эмпирический характер подходов к ее описанию, при моделировании гетерогенных систем используется концепция изотропной турбулентной вязкости, основанная на приближении Буссинеска, где рейнольдсовы напряжения считаются пропорциональными осредненным по времени скоростям деформаций. Следствиями названной концепции являются k - ϵ стандартная модель и RSM (Reynolds Stress model – модель напряжений Рейнольдса). При этом та и другая модели напрямую учитывают диссипативные проявления в первичной (основной, несущей) фазе. Однако уравнения этих моделей содержат члены дополнительных условий, учитывающие влияние на турбулизацию потоков вторичных фаз. Применимость таких дополнительных условий допустима при выполнении следующих ограничений: 1) – рассматриваемый поток является разбавленным; 2) – отношение плотностей каждой пары фаз, входящих в гетерогенную систему соизмеримо с единицей.

В данной работе для учета диссипации потока пульпы была использована двухпараметрическая k - ϵ модель, в которой для описания турбулентных величин используется система двух нелинейных диффузионных уравнений [17, 18] – для массовой плотности турбулентной энергии k и скорости диссипации турбулентной энергии ϵ , с константами (рис. 7).

$$\sigma_k = 1, \quad \sigma_\epsilon = 1,3, \quad C_{\epsilon 1} = 1,44, \quad C_{\epsilon 2} = 1,92, \quad C_\mu = 0,09.$$

В настройке решателя также были включены свойства инициализированных УСФ (табл. 6), базовые параметры качественно-количественных показателей CFD модели ГСПФ в первой камере технологической цепочки нефелиновой флотации с учетом результатов анализа пробы (рис. 5) и условия взаимодействия фаз системы (рис. 8).

Вычислительный эксперимент был проведен на ПК с модификацией Intel(R) Core, 2.93 GHz, 8.00 ГБ, 64-ОС // Windows 7 (max). Распараллеливание задачи – 8 ядер. Интервал итераций $5e-5 \text{ c}^{-1}$. Время процесса 600 секунд. Время расчета 2673 часа.

В эксперименте определялись потоки массы фаз через поверхности ввода питания и выходов камерного и пенного продуктов, а также объемное распределение фаз в расчетной области (рис. 9).

Получены поля скоростей системы (рис. 10). Это позволило выявить в объеме модели зоны гидродинамической активности, характеризующиеся образованием локальных турбулентных потоков, снижающих вероятность элементарных актов флотации, а также зоны, где гидродинамическая активность низка, что способствует образованию застойных областей с пониженной концентрацией газовой фазы. Тем самым получено представление о расположении зон, где установившиеся гидродинамические режимы в различной степени способствуют процессу флотации.

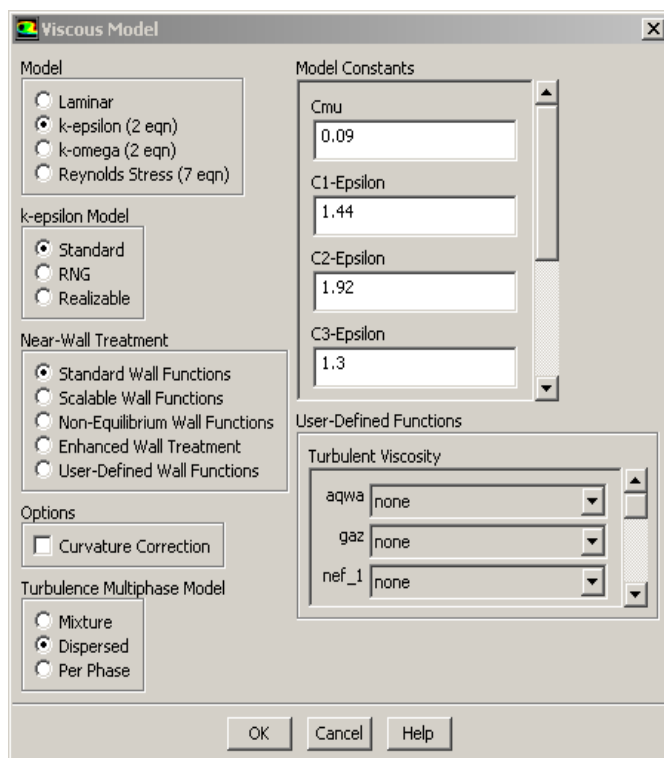


Рис. 7. Блок интерфейса ANSYS Fluent «Viscous Model»

Получены индикаторные распределения (рис. 11) концентрации УСФ, в которых индикатором распределения является их объемная доля в потоке питания. Данное распределение позволяет оценить характер положения фракции в объеме камеры по сравнению с распределением в питании моделируемого процесса, что выявляет тенденцию заполнения фракцией рабочего объема камеры.

Получены средневзвешенные распределения (рис. 12) концентрации УСФ, для которых центр распределения определен как среднее арифметическое объемных долей твердых фаз модели. Средневзвешенное распределение позволяет установить качественную и количественную прогнозные оценки формирования камерного и пенного продуктов.

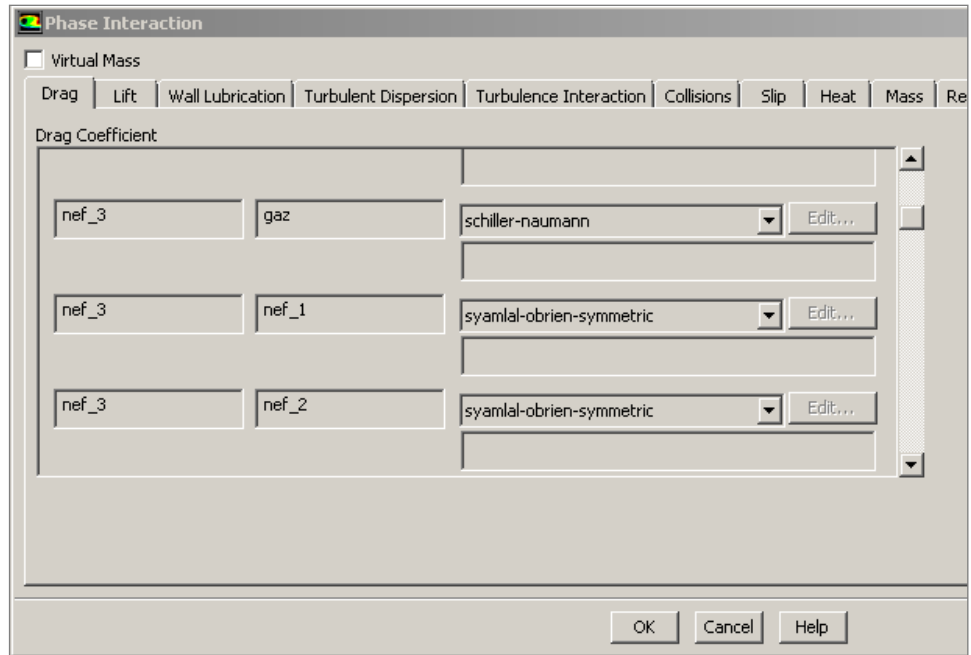


Рис. 8. Блок интерфейса ANSYS Fluent «Phase Interaction»

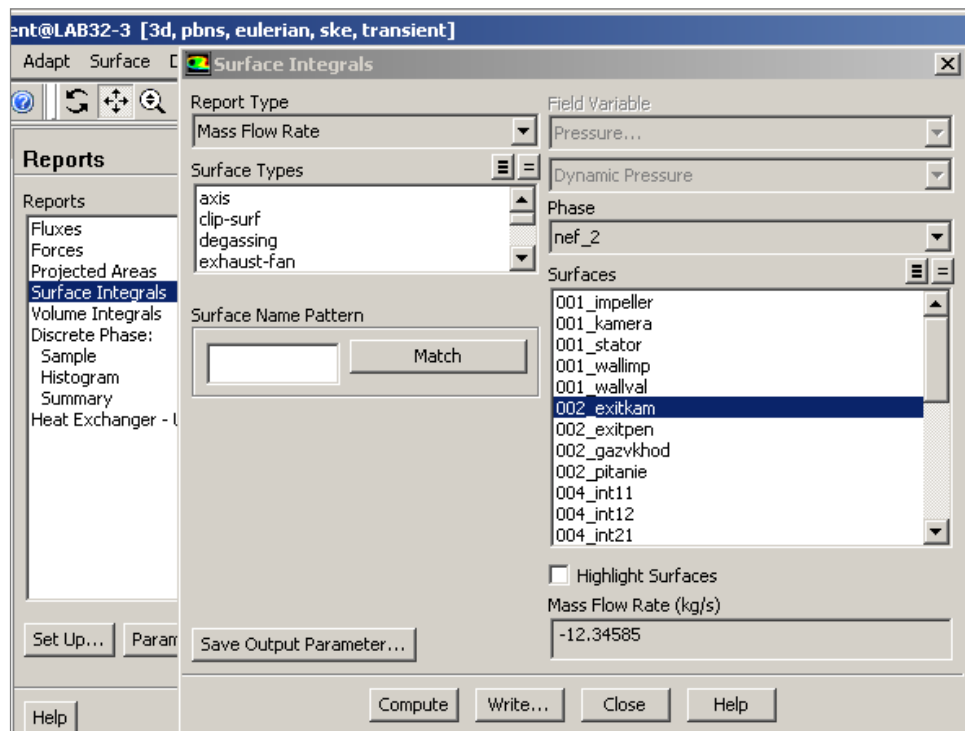


Рис. 9. Блок интерфейса ANSYS Fluent «Reports»

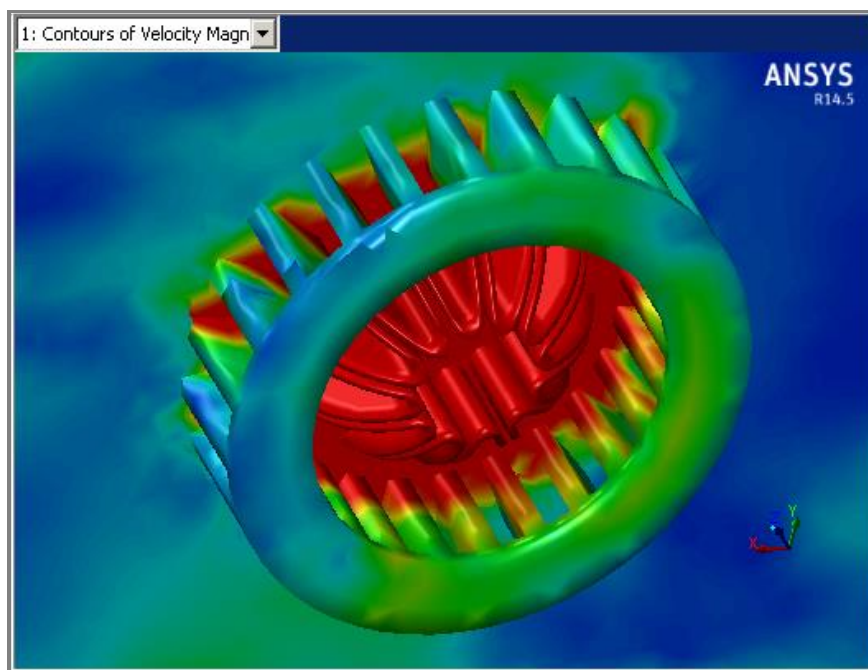


Рис. 10. Эюра поля скоростей системы в пересечении горизонтального сечения камеры, расположенного на 0,3 м ниже диска импеллера, поверхностей импеллера и статора

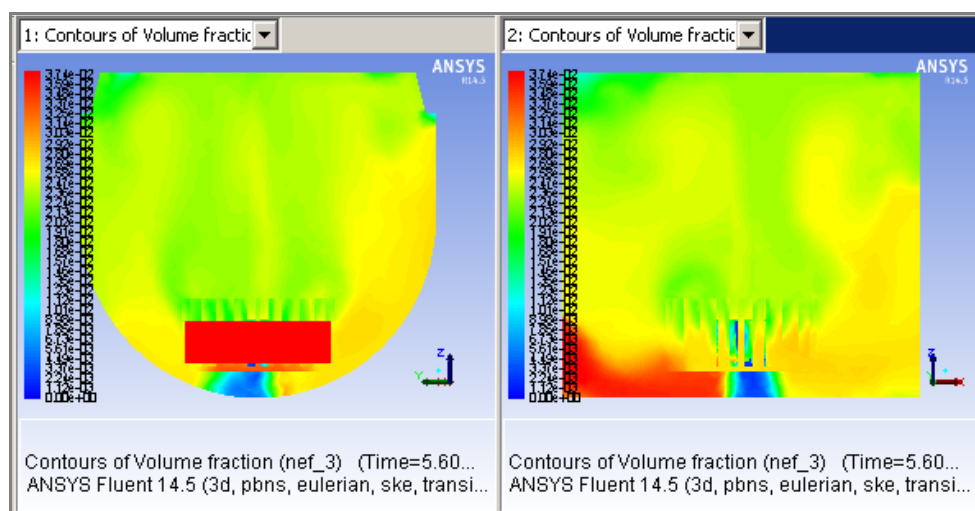


Рис. 11. Индикаторное распределение концентрации фракции ($i = 1; j = 3$, см. табл. 6), имеющей объемное содержание в питании 0,0374 и расход подачи 11,765 кг/с в проекциях нормальных осевых сечений

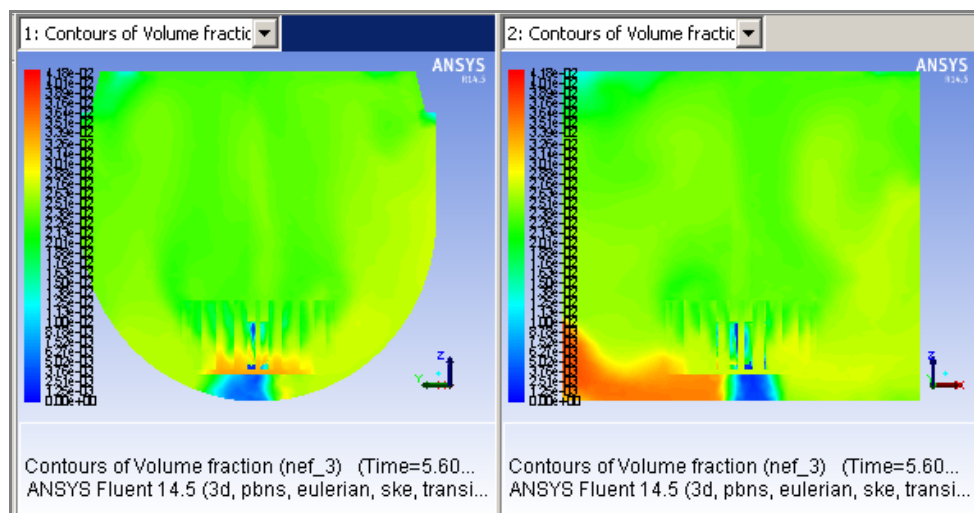
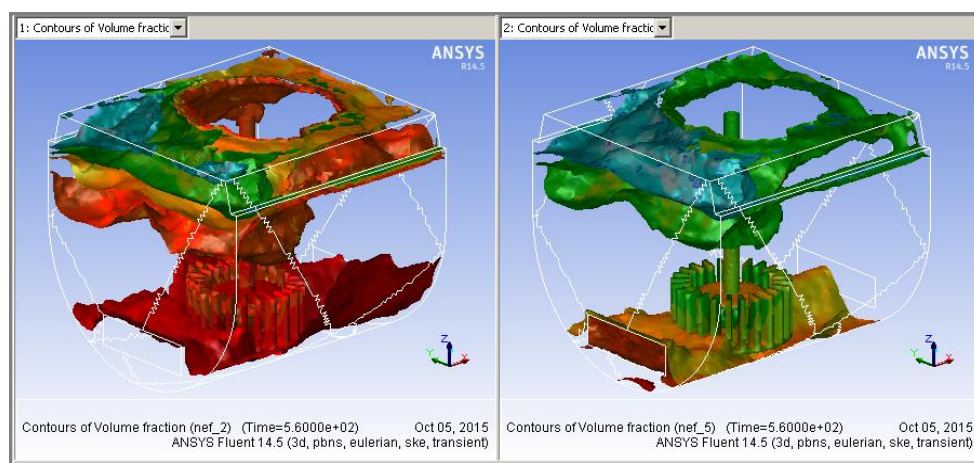


Рис. 12. Средневзвешенное распределение концентрации фракции ($i = 1; j = 3$, см. табл. б), имеющей объемное содержание в питании 0,0374 и расход подачи 11,765 кг/с, в проекциях нормальных осевых сечений при средней доле твердых фаз модели 0,0418

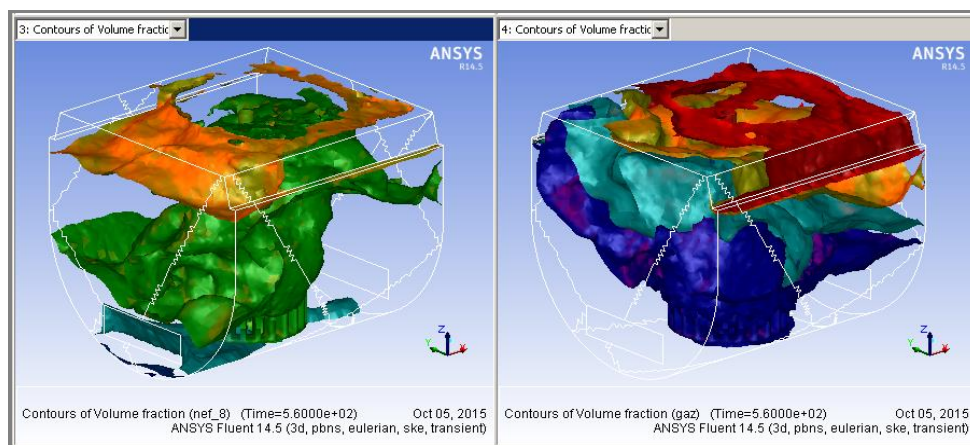
Исследовано расположение в объеме флотационной камеры изоповерхностей УСФ с разным содержанием полезного компонента и дисперсной газовой фазы (рис. 13).



а)

б)

Рис. 13.1. Изоповерхности концентрации:
а) – фракция, обогащенная нефелином; б) – сростковая фракция



а)

б)

Рис. 13.2. Изоповерхности концентрации:

а) – фракция, обедненная нефелином; б) – дисперсная газовая фаза

В табл. 7 и 8 приведены значения технологических параметров моделируемого процесса флотации, полученные в результате выполнения вычислительного эксперимента. Столбцы «Расчет» содержат значения параметров, соответствующие базовым параметрам качественно-количественных показателей CFD модели (рис. 5), а столбцы «Результат» содержат значения поверхностных интегралов, взятых по поверхностям выходов камерного и пенного продуктов моделируемого объема при выполнении вычислительного эксперимента.

Таблица 7

Выхода камерного и пенного продуктов в модели

Параметр	Камерный продукт модели			Пенный продукт модели		
	Расчет	Результат	Δ	Расчет	Результат	Δ
Выход, γ	89,61%	89,71%	0,10%	10,37%	10,29%	-0,08%

Таблица 8

Содержание и извлечение Al_2O_3 и P_2O_5 в продуктах модели

Параметр	Al_2O_3			P_2O_5		
	Расчет	Результат	Δ	Расчет	Результат	Δ
β кам	24,44%	24,61%	0,17%	0,52%	0,53%	0,01%
ϵ кам	92,42%	93,19%	0,77%	84,31%	84,97%	0,66%
β пен	17,29%	16,95%	-0,34%	0,83%	0,82%	-0,01%
ϵ пен	7,85%	7,36%	-0,49%	15,69%	15,39%	-0,30%

Использование предложенного метода инициализации УСФ при проведении вычислительного эксперимента над моделью ГСПФ позволяет формулировать условия однозначности с учетом физических и физико-химических свойств компонентов твердой фазы питания флотации. Важным преимуществом

метода является возможность учета процессов, происходящих на границах раздела фаз, для всех УСФ, обладающих различными инертными и поверхностными свойствами. Верификация результатов вычислительных экспериментов, проведенных с использованием данного метода, показала высокую степень корреляции с технологическими параметрами реализации флотационных процессов в лабораторных и промышленных условиях.

Рассмотренный подход к исследованию распределения минералов в продукты флотации обеспечивает использование вычислительного эксперимента с CFD моделью процесса флотации, дающего представление о гидродинамике системы, выявляющего закономерности распределения концентраций и скоростей компонентов флотационной пульпы и позволяющего оценить технологические параметры флотации. Кроме того, эксперимент обеспечивает прогноз результатов комплексного разделения минералов, входящих в состав питания флотации, с учетом присутствия в нем их сростковых форм.

Использование в вычислительном эксперименте ANSYS Fluent позволяет получать интегрально-дифференциальные оценки физических и статистических параметров фаз в любой области исследуемой системы в каждый момент времени, как в графическом, так и в числовом виде. Проведение вычислительного эксперимента для исследования ММК флотации позволяет избежать установки измерительных приборов и датчиков в рабочий объем камеры флотационной машины и при этом получать данные о процессе, минимизировав необходимые для проведения подобного физического эксперимента материальные и временные ресурсы.

Литература

1. Скороходов, В.Ф., Никитин, Р.М., Степанникова, А.С. Совершенствование технологии получения нефелинового концентрата / В.Ф. Скороходов, Р.М. Никитин, А.С. Степанникова // Вестник Кольского научного центра РАН. – Апатиты: КНЦ РАН, 2014, №2. - С.74-79.
2. Применение методов вычислительной гидродинамики к исследованию и анализу процессов разделения минералов / Скороходов В.Ф. и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (ФТПРПИ). – 2013. - №3. - Новосибирск, ИГД СО РАН. - С.179-188.
3. Computational Fluid Dynamics as the Research Tool for Minerals Separation Processes / Skorokhodov V.F and др. // Proceedings of 5-th Balkan Mining congress. 18-21 September 2013, Ohrid, Republic of Macedonia. – 2013. – P.299-304.
4. Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли / Н.Н. Мельников и др. // Горный журнал. -2013. - №12. - С.109-116.
5. Исследование распределения минералов в продуктах флотации на основе математического аппарата вычислительной гидродинамики (на примере получения нефелинового концентрата) / В.Ф. Скороходов и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). - Москва, Горная книга. – 2014. - №12. - С.123-137.
6. Тихонов, О.Н., Теория сепарационных процессов: учебное пособие /О.Н. Тихонов // Технический университет. - СПб, 2003, Ч.1. - 102 с.

7. Инициализация узких сепарационных фракций при проведении вычислительного эксперимента над моделью гетерогенной системы процесса флотации / В.Ф. Скороходов и др. // Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения 2015): материалы Междунар. совещания, г. Иркутск, 21-25 сентября 2015 г.- Изд-во ООО «Полиграфический центр «РИЭЛ», 2015. -С.258-261.
8. Оценка флотационных свойств компонентов пробы питания основной нефелиновой флотации для вычислительного эксперимента / В.Ф. Скороходов и др. // Вестник Кольского научного центра РАН. -Апатиты: КНЦ РАН, 2013, №2. - С.79-91.
9. Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред // Р.И. Нигматулин. - М.: Наука: Гл. ред. физ. мат. лит., 1987. -Ч.1 – 464 с.
10. Kolev, N.I. Multiphase Flow Dynamics 2: Thermal and Mechanical Interactions / N.I. Kolev. - Springer, Berlin, Germany, 2nd edition, 20051994.
11. Wen, C.Y., Yu, Y.H. Mechanics of Fluidization / C.Y. Wen, Y.H. Yu // Chem. Eng. Prog. Symp. Series 62, 1966. -P.100–111.
12. Schiller L., Naumann Z.Z. Ver. Deutsch. Ing., 77:318, 1935.
13. Syamlal, M. The Particle-Particle Drag Term in a Multiparticle Model of Fluidization /M. Syamlal// National Technical Information Service, Springfield, VA, 1987.
14. Ферсман, А.Е. Геохимия // А.Е. Ферсман. - М.-Л., ОНТИ, Химтеорет, 1936. - 355 с.
15. Зуев, В.В., Поцелуева, Л.Н., Гончаров, Ю.Д. Кристаллоэнергетика как основа оценки свойств твердотельных материалов /В.В. Зуев, Л.Н. Поцелуева, Ю.Д. Гончаров. - СПб, 2006, 136 с.
16. Рахматулин, Х.А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред /Х.А. Рахматулин // Прикладная математика и механика. - 1956. -Т.20, № 2. - С. 84-195.
17. Фрик, П.Г. Турбулентность: модели и подходы / П.Г. Фрик // Курс лекций. - Перм. гос. техн. ун-т., г. Пермь, 1998, Ч.1. -108 с. – 1999, Ч.2. - 136 с.
18. Greenspan, D. Molecularand particle modelling of laminarand turbulent flows / D. Greenspan // 5 Toh Tuck Link, Singapore 596224, 2005. - 168 p.

Сведения об авторах

Скороходов Владимир Федорович - д.т.н., заведующий лабораторией,
e-mail: skorohodov@goi.kolasc.net.ru
Vladimir F. Skorokhodov - Dr. of Sci. (Tech.), head of laboratory

Никитин Роман Михайлович – научный сотрудник,
e-mail: remnik@yandex.ru
Roman M. Nikitin – researcher

Бирюков Валерий Валентинович - научный сотрудник,
e-mail: birukov@goi.kolasc.net.ru
Valeri V. Birukov – researcher

Степанникова Анна Сергеевна - аспирант, инженер,
e-mail: 1990nuta2008@rambler.ru
Anna S. Stepannikova - graduate student, engineer