



Российская Академия Наук
ТРУДЫ

Кольского научного центра РАН

6/2016(40)

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**
ВЫПУСК 7

Апатиты
2016

Российская Академия Наук
ТРУДЫ

6/2016(40)

издается с декабря 2010 г.

УДК 004.9
ISSN 2307-5252

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 7

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, 2016
- © Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Кольский научный центр Российской академии наук, 2016

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 как в рамках государственных заданий, так и 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
Р.А. Македонов А.А. Зуенко	Модель QDE как основа качественного моделирования динамических систем	10
П.А. Ломов	Технология автоматизированного синтеза составных онтологических паттернов содержания	26
В.В. Диковицкий И.О. Датьев	Особенности программной реализации протокола маршрутизации OLSR в сетевом симуляторе NS-3	37
А.А. Павлов И.О. Датьев	Исследование влияния различных параметров на характеристики передачи данных беспроводных многошаговых сетей	45
Д.Г. Степенщиков А.В. Чернявский	Программный комплекс для диагностики минералов по спектрам комбинационного рассеяния	56
В.В. Диковицкий А.А. Менькова	Повышение качества визуализации стереоизображений за счёт изменения угла конвергенции	62
А.В. Клименко В.Н. Горбачев	Слепое детектирование цифрового водяного знака в изображениях с палитрой без изменения цвета	71
А.А. Зуенко О.В. Фридман	Формирование учебных планов вузов как задача удовлетворения ограничений	80
Д.Н. Халиуллина В.В. Быстров С.Н. Малыгина	Прогнозирование дополнительной потребности в кадрах отраслей экономики Мурманской области	94
А.В. Вицентий	Применение адаптивной геовизуализации в геосоциальных медиа	108
А.С. Шемякин С.Ю. Яковлев	Расчёт зоны поражения для химически опасных объектов	120

И.Е. Кириллов	Разработка и исследование адаптивной модели САУ электропривода с учетом изменения передаточной функции исполнительного механизма	132
И.Н. Морозов И.Е. Кириллов	Использование теории нечетких множеств при построении автоматизированной системы регулирования процесса измельчения горно-обогатительных предприятий	141
Е.А. Сотников И.Н. Морозов	Моделирование температурных полей при различной технической реализации тепловых насосов	148
К.С. Музыченко И.Н. Морозов	Имитационное моделирование отопительных радиаторов с различными режимами работы	154
В.В. Бирюков А.Г. Олейник	Нетрадиционный подход к моделированию процесса магнитно – гравитационной сепарации	157

6/2016(40)

Published since 2010

Russian Academy of Sciences
transactions

UDC 004.9
ISSN 2307-5252

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 7

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, 2016

© The Branch of Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 2016

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 as within the framework of governmental assignments, 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
R.A. Makedonov A.A. Zuenko	Qde-model as a basis for qualitative simulation of dynamical systems	10
P.A. Lomov	Automation of sythesis of composite content ontology design pattern	26
V.V. Dikovitsky I.O. Datyev	Features software implementation of routing protocols olsr the network simulator NS-3	37
A.A. Pavlov I.O. Datyev	Research of influence the different parameters on characteristics data communication of wireless multihop networks	45
D.G. Stepenshchikov A.V. Chernyavsky	An application software for raman diagnostics of minerals	56
V.V. Dikovitskiy A.A. Menkova	Improving quality of visualization of stereo images by changing the convergence angle	62
A.V. Klimenko V.N. Gorbachev	The blind detection for palette image watermarking without changing the color	71
A.A. Zuenko O.V. Fridman	Synthesis of university curriculum as a constraint satisfaction problem	80
D.N. Khaliullina V.V. Bystrov S.N. Malygina	Forecasting additional staffing needs of the murmansk region economy branches	94
A.V. Vicentiy	Application of adaptive geovisualization in geosocial media	108
A.S. Shemyakin S.Yu. Yakovlev	Calculation of contaminated area for chemically hazardous objects	120

I.E. Kirillov	Development and research adaptive model sau electric in view of changes transfer function actuator	132
I.N. Morozov I.E. Kirillov	Using the theory of fuzzy sets in construction of automated system of managing grinding mining and processing enterprises	141
E.A. Sotnikov I.N. Morozov	Modeling of temperature fields at various technical implementation of heat pumps	148
K.S. Muzychenko I.N. Morozov	Simulation radiators with different modes of operation	154
V.V. Birukov A.G. Oleynik	Innovative approaches to modeling of processes of magnetic – gravity separation	157

ВВЕДЕНИЕ

Седьмой выпуск серии «Информационные технологии» Трудов Кольского научного центра РАН в основном представляет результаты, полученные молодыми исследователями. Наряду с достаточно «новаторскими» работами, посвященными разработке оригинальных методов, технологий представления и обработки знаний, в выпуск включены статьи, имеющие четко выраженную практическую направленность.

Достаточно традиционным для выпусков серии является широкий спектр предметных областей, в которых находят приложение разрабатываемые авторами подходы и прикладные решения. Это и «внутренняя» область современных информационных технологий – онтологическое моделирование и многошаговые беспроводные сети, и системы адаптивного управления технологическим оборудованием. Не оставлена без внимания такая важная для территорий Севера проблема, как кадровое обеспечение.

Авторами представляются результаты прогнозирования кадровых потребностей Мурманской области и применение авторских методов распространения ограничений к задаче формирования учебных планов для вузов. Несколько работ посвящено тематике, связанной с формированием и обработкой изображений.

УДК 004.832

Р.А. Македонов, А.А. Зуенко

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

МОДЕЛЬ QDE КАК ОСНОВА КАЧЕСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

Аннотация

В статье описываются особенности качественной модели дифференциальных уравнений – QDE. В рамках данного подхода разработана упрощенная модель развития торговых предприятий, применимая для качественных рассуждений о свойствах моделируемой системы и прогнозах ее развития. Использование качественных моделей позволяет избежать необходимости выдвижения необоснованных предположений о неизвестных параметрах модели предметной области и делает процесс моделирования интуитивно-понятным для конечного пользователя.

Ключевые слова:

динамические системы, качественное моделирование, задача удовлетворения ограничений.

R.A. Makedonov, A.A. Zuenko

QDE-MODEL AS A BASIS FOR QUALITATIVE SIMULATION OF DYNAMICAL SYSTEMS

Abstract

The article describes the features of qualitative model of differential equations – QDE. Under this approach, we developed a simplified model of the evolution of commercial enterprises, applicable for qualitative reasoning about the properties of such systems and forecast of its evolution. The use of qualitative models eliminates the necessity for unfounded hypothesizing about the unknown parameters of the subject domain model and makes the modeling more intuitive for the end user.

Keywords:

dynamical systems, qualitative modeling, constraint satisfaction problem.

Введение

В реальных системах бывает трудно выявить точные соотношения между переменными в моделируемой системе, но все еще остается возможность установить некоторые качественные зависимости между ними [1]. Кроме того, даже при наличии строгой аналитической модели, для ее применения требуется знать значения всех параметров модели, измерение которых может быть сильно осложнено. В такой ситуации пользователь пытается заменить значения неизвестных параметров предполагаемыми значениями, надеясь, что они не слишком отличаются от истинных. Применение качественных моделей позволяет избежать необходимости выдвижения необоснованных предположений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 14-07-00205а, 15-07-02757-а, 16-07-00273а, 16-07-00377а, 16-07-00313а, 16-07-00562а).

При решении многих задач точные числовые данные и вовсе не требуются. К типичным задачам, в которых качественное моделирование является более предпочтительным, относятся функциональные рассуждения, диагностика и проектирование на основе «исходных принципов», например, законов физики [1]. Заметим также, что с точки зрения конечного пользователя задача разработки качественных моделей является более простой по сравнению с созданием количественных моделей. При исследовании динамических систем применение моделей и методов качественного моделирования менее распространено. Существенной трудностью при разработке методов качественного моделирования является обеспечение приемлемой скорости процесса вычислений, поскольку возникающие задачи, как правило, относятся к классу задач комбинаторного поиска и связаны с обработкой большого объема информации. При моделировании динамических систем возникают специфические задачи, имеющие высокую вычислительную сложность.

Далее в статье описываются особенности качественной модели дифференциальных уравнений – QDE (Qualitative Differential Equation). В рамках данного подхода разработана упрощенная динамическая модель развития торговых предприятий, применимая для качественных рассуждений о свойствах моделируемой системы и прогнозах ее развития.

Модель QDE

В настоящее время среди динамических систем достаточно хорошо изучены различные классы дискретных систем, такие, как дискретно-аргументные системы, системы с нечеткой информацией, логико-динамические системы, системы на конечных множествах (т-цепи). С другой стороны, изучаются и гибридные динамические системы, в которых присутствуют как гладкая, так и дискретная части, такие, как дифференциальные автоматы, модель Нерода-Кона, модель Брокета и некоторые другие [2]. В качестве наиболее близких прототипов предлагаемых в статье исследований являются работы Г.С. Осипова [3], посвященные интеллектуальным динамическим системам, а также работы ряда западных исследователей, где рассматриваются качественные дифференциальные уравнения (QDE) и метод качественного машинного моделирования QSIM [1]. Отличительной особенностью выбранных прототипов является то, что каждое из состояний образуется путем замыкания некоторого порождающего множества событий – фактов и аксиом.

В настоящей статье для описания состояния динамической системы предлагается использовать только переменные, области определения которых конечны, а, значит, информация о динамической системе может быть представлена с помощью многоместных отношений. Наиболее пригодной для этого, по мнению авторов, является качественная абстракция дифференциальных уравнений – QDE, где предложены конкретные типы конечных предикатов для описания дифференциальных уравнений. В данной модели числа заменяются их знаками (положительными или отрицательными), символическими значениями (иногда называемыми отметками) или интервалами, вместо точных значений времени применяются символические обозначения моментов времени и интервалов, а производные по времени упрощенно представляются в виде направлений изменения (возрастающее,

уменьшающееся или постоянное). Конкретные функциональные зависимости могут быть заменены менее определенными, такими как монотонные отношения. При проведении качественных рассуждений арифметические операции упрощенно представляются с помощью качественных арифметических действий. Как правило, результаты качественных арифметических действий являются недетерминированными. Другими словами, в модели QDE приводится типизация многоместных отношений (конечных предикатов), требуемых для нечислового моделирования дифференциальных уравнений и некоторых других видов зависимостей, а также разработаны рекомендации по преобразованию количественной модели в качественную в случае, если уже имеется соответствующая численная модель. В QSIM конкретизирован способ представления качественных состояний, а также введен тип отношений для задания переходов между качественными состояниями.

На примере емкости с водой рассмотрим качественное абстрагирование количественной информации. Предположим, емкость пуста, в нее непрерывно поступает вода из крана, и слив закрыт, поэтому нет оттока воды. Количественную модель этой системы можно представить в виде дифференциальных уравнений, затем провести расчеты по этой модели с помощью методов численного машинного моделирования. В результате должна быть получена таблица, в которой приведены точные значения уровня воды в последовательные моменты времени. Например, в этой таблице могло бы быть показано, что уровень воды достигнет края емкости на высоте 62,54 см через 159,3 секунды. Но для повседневного использования такой сложный ответ не нужен. Достаточно просто получить ответ в рамках здравого смысла: “В этих условиях уровень воды будет непрерывно повышаться и в конечном итоге достигнет края емкости. После этого вода начнет выливаться через край и вызовет подтопление окружающей территории”.

В таблице приведены некоторые примеры количественных утверждений и их качественных абстракций.

Абстрагирование числовых данных путем их замены символическими значениями и интервалами

Количественное утверждение	Качественное утверждение
$Level(3.2 s) = 2.6 cm$	$Level(t_1) = zero...top$
$Level(3.2 s) = 2.6 cm$	$Level(t_1) = pos$
$d/dt Level(3.2 s) = 0.12 m/s$	Уровень $Level(t_1)$ возрастает
$Amount = Level * (Level + 5.7)$	$M^+(Amount, Level)$

Время <i>Time</i>	Количество <i>Amount</i>
0.0	0.00
0.1	0.02
...	...
159.3	62.54

$Amount(start...end) = zero...top / inc$

Количественное утверждение, что в момент времени 3.2 секунды уровень воды *Level* достигает значения 2.6 см, формально записывается следующим образом:

$$Level(3.2\ s) = 2.6\ cm.$$

Качественная абстракция, согласно которой уровень *Level* в момент времени t_1 находится между дном (уровень *zero*) и краем емкости с водой (уровень *top*), может быть условно представлена таким образом:

$$Level(t_1) = zero \dots top.$$

Здесь точные данные о времени 3.2 секунды были заменены символическим обозначением момента времени t_1 . Поэтому данное утверждение не задает точное время, а сообщает, что есть такой момент времени, обозначенный как t_1 , в который уровень *Level* имеет указанное качественное значение. А что касается самого качественного значения, то с его помощью все множество чисел от 0 до 62.54 было свернуто в символический интервал *zero...top*. В процессе дальнейшего абстрагирования может быть проигнорировано существование края емкости с водой как важного компонента и сформулировано утверждение, что уровень *Level* в момент времени t_1 является положительным, которое записывается следующим образом:

$$Level(t_1) = pos.$$

Абстрагирование производных по времени путем их замены обозначениями направлений изменения

Рассмотрим следующее количественное утверждение о производной уровня *Level* по времени:

$$d/dt\ Level(3.2\ s) = 0.12\ m/s.$$

Качественная абстракция этого утверждения состоит в том, что уровень *Level* в момент времени t_1 повышается.

Абстрагирование функций путем замены монотонными отношениями.

Рассмотрим следующее количественное утверждение:

$$Amount = Level * (Level + 5.7).$$

Вместо него может использоваться следующая качественная абстракция; если уровень $Level \geq 0$, то количество воды *Amount* представляет собой монотонно возрастающую функцию от *Level*, что формально записывается следующим образом: $M^+(Amount, Level)$. Это означает, что при повышении значения *Level* увеличивается также значение *Amount* и наоборот. Аналогично, могут применяться монотонно убывающие функции, обозначаемые M^- .

Абстрагирование возрастающих временных последовательностей

Вся таблица, содержащая значения количества воды *Amount* в последовательные моменты времени от 0 до 159,3 секунды, может быть абстрагирована путем замены ее одним качественным утверждением: “Значение количества воды *Amount* в интервале времени между *start* и *end* находится между *zero* и *full*, при этом уровень возрастает” (табл.). Такое утверждение может быть формально записано следующим образом:

$$Amount(start \dots end) = zero \dots full / inc.$$

Качественное состояние системы представляет собой список качественных состояний переменных. Переменные в качественной модели могут принимать качественные значения из конкретных областей определения. Качественное состояние переменной имеет форму:

Domain: QMag / Dir,

где *QMag* – качественная величина, которая может представлять собой либо отдельное качественное значение, либо интервал между двумя смежными качественными значениями, который обозначается как *Land₁...Land₂*, а *Dir* – направление изменения, возможными значениями которого являются *inc, std, dec*. Ниже приведены два примера качественных состояний переменной *Level* с областью определения {*zero, top, inf*}:

level: zero / inc;

level: zero...top / std.

Рассмотрим основные виды качественных ограничений, которые будут использоваться ниже при описании модели:

• **Ограничение *Derive* (*X, Y*).** С качественной точки зрения *Y* – это производная от *X* по времени. Проверка этого ограничения является очень простой – направление изменения переменной *X* должно соответствовать знаку переменной *Y*.

• **Ограничение *M⁺* (*X, Y*).** Переменная *Y* представляет собой монотонно возрастающую функцию от *X*. Здесь *X* и *Y* имеют форму *Dx: QmagX / DirX* и *Dy: QmagY / DirY*. При этом, во-первых, направления изменений должны быть согласованы: *DirX = DirY*, во-вторых, должны согласовываться заданные соответствующие значения.

• **Ограничение *M⁻* (*X, Y*).** Переменная *Y* представляет собой монотонно убывающую функцию от *X*. Здесь *X* и *Y* также имеют форму *Dx: QmagX / DirX* и *Dy: QmagY / DirY*. При этом, во-первых, направления изменений должны быть согласованы следующим образом:

DirX = inc, DirY = dec,

DirX = std, DirY = std,

DirX = dec, DirY = inc,

во-вторых, должны быть согласованы соответствующие качественные значения.

• **Ограничение *Sum* (*X, Y, Z*).** Это ограничение соответствует выражению $X + Y = Z$, в котором все переменные (*X, Y, Z*) представляют собой качественные состояния переменных в форме *Domain: Qmag / Dir*. Этому ограничению суммирования должны соответствовать и направления изменений, и качественные величины. Во-первых, проверяется согласованность направлений изменений. Например, выражение

inc + std = inc

является истинным, а следующее выражение – ложным:

inc + std = std.

Во-вторых, качественные величины переменных *X, Y* и *Z* должны быть согласованы с операцией суммирования.

Качественная модель развития торговых предприятий

Рассмотрим динамику развития торговых предприятий (в дальнейшем просто – предприятия) в зависимости от средней наценки на товары. Выберем следующие переменные: количество возникающих предприятий, количество ликвидированных предприятий (обанкротившихся и закрытых), общее количество предприятий, средняя наценка на товары (в дальнейшем просто –

наценка), средняя прибыль предприятий от продажи товаров (в дальнейшем просто – прибыль).

Допустим, что количество возникающих предприятий постоянно на каждом шаге моделирования. Чистый прирост количества предприятий выражается как разность между возникающими и ликвидированными предприятиями. Моделируемая нами ситуация соответствует тому промежутку времени, когда чистый прирост количества предприятий не может быть отрицательной величиной, то есть возникающих предприятий не меньше, чем ликвидированных.

Предположим, что изначально имеется одно функционирующее предприятие.

Чтобы формализовать качественные рассуждения, определим качественную модель динамики числа предприятий. Перечислим переменные:

- *Profit* – средняя прибыль предприятий (общая прибыль предприятий разделенная на их количество);
- *Markup* – средняя наценка на товары;
- *Amount* – (общее) количество предприятий;
- *OpenAmount* – количество возникающих предприятий (в силу допущений, постоянно и равно значению *open_amount*);
- *CloseAmount* – количество ликвидированных предприятий;
- *Delta* – прирост числа предприятий ($Delta = OpenAmount - CloseAmount$).

Для каждой переменной определяются ее различные значения, называемые *отметками*.

Для средней прибыли *Profit* важное значение имеет минимально допустимое значение прибыли min_p (минимальная прибыль, при которой предприятие может работать без убытка), поэтому было решено вместо отметки *zero* включить в состав отметок это значение. В то же время, прибыль ограничена сверху (в силу допущения). Таким образом, для прибыли (*Profit*) задано следующее упорядоченное множество отметок:

$$min_p \leq Profit \leq max_p.$$

Здесь min_p есть минимальная прибыль предприятий, при которых сохраняется их рентабельность. В качественной модели невозможно провести различия между точными числовыми значениями, находящимися в пределах от min_p до max_p , поэтому весь интервал следует разбить на три качественных значения (три “кванта”) – min_p , $min_p \dots max_p$, max_p . Кванты представляют собой либо точки числовой прямой, либо открытые интервалы. Таким образом, весь исходный интервал представляет собой конечное множество квантов. Квантование интервалов позволяет преобразовывать числовые интервальные переменные в нечисловые (качественные).

Аналогично поступим и с областями определения остальных интервальных переменных.

Для средней наценки (*Markup*) выделим следующие отметки: минимальное значение (min_m) и максимальное значение (max_m):

$$min_m \leq Markup \leq max_m.$$

Так как в рамках модели нет смысла рассматривать количество предприятий (*Amount*) меньше одного, то введем отметку *one*, которая соответствует числу предприятий равному одному:

$$one \leq Amount \leq max_a.$$

Аналогично:

$$zero \leq CloseAmount \leq open_amount.$$

В силу допущений, переменная *Delta* может принимать только два изолированных значения – *zero* (нулевое значение) и *pos* (положительное значение). Значение *zero* характеризует ситуацию, когда количество открытых и закрытых предприятий одинаково, а значение *pos* – когда открытых предприятий больше, чем закрытых.

Опишем на естественном языке поведение моделируемой системы. Первоначально конкуренция на рынке низкая, наценка и прибыль максимальны, число возникающих предприятий больше числа ликвидированных, следовательно, количество предприятий возрастает. Это приводит к росту конкуренции и, как следствие, снижению средней наценки и прибыли. Таким образом, в какой-то момент времени количество возникающих предприятий станет равным количеству ликвидированных. После того, как это произойдет, система перейдет в состояние равновесия и количество предприятий станет постоянным. График изменения количества предприятий во времени выглядит примерно так, как показано на рис. 1.

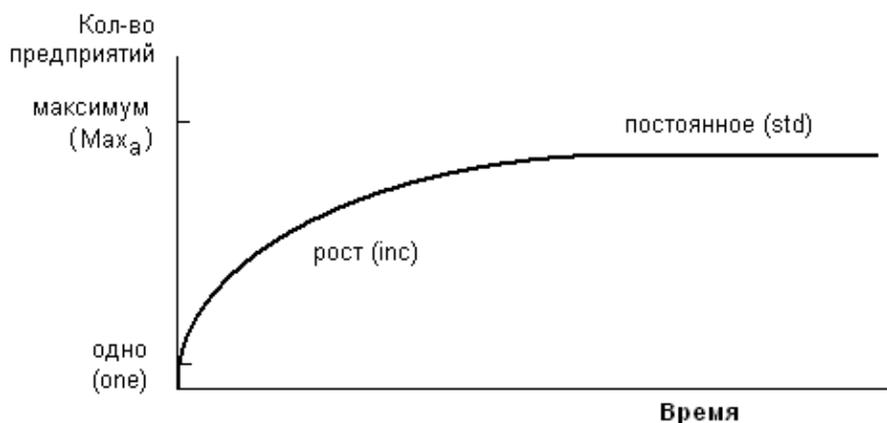


Рис. 1. График изменения количества предприятий во времени

Для представления того факта, что первоначально количество предприятий равно одному и возрастает, воспользуемся следующим обозначением:

$$Amount = one / inc.$$

После этого наступает промежуток времени, когда количество предприятий находится в пределах от одного (*one*) до максимального значения (*max_a*) и продолжает возрастать. Таким образом, справедлива следующая запись:

$$Amount = one \dots max_a / inc.$$

Очередное качественное изменение происходит после того, как количество предприятий перестает расти и становится постоянным, как показано ниже.

$$Amount = one \dots max_a / std$$

Это результирующее состояние моделируемой системы.

Теперь определим зависимости между переменными в модели. Эти зависимости называются *ограничениями*, поскольку налагают определенные пределы на значения переменных.

В разрабатываемой модели применяются ограничения, типичные для качественных рассуждений. Одно из таких ограничений определяет зависимость между переменными *Amount* и *Markup* – чем больше число предприятий, тем ниже уровень наценки. Это ограничение записывается следующим образом:

$$M^-(Amount, Markup).$$

Обозначение $M^-(X, Y)$ указывает, что Y – монотонно убывающая функция от X : после каждого увеличения X уменьшается Y , и наоборот. Для такой связи $M^-(Amount, Markup)$ укажем следующие соответствующие значения: (one, max_m) – если предприятие одно, то средняя наценка максимальна (конкуренция отсутствует); (max_a, min_m) – при минимальной средней наценке, соответствующей уровню рентабельности, число предприятий максимально; также справедливо $(one...max_a, min_m...max_m)$.

Ограничения, определяющие монотонно возрастающую (убывающую) функцию, являются очень удобными и часто позволяют намного упростить описание модели. Применяя запись $M^-(Amount, Markup)$, утверждается, что средняя наценка снижается при каждом увеличении количества предприятий и увеличивается после уменьшения этого количества. Следует отметить, что данное ограничение остается справедливым для любой группы товаров. Если вместо этого определить точное количественное функциональное отношение:

$$Markup = f(Amount),$$

то оно зависело бы от стоимости товара, как показано на рис. 2 (группа товаров малой стоимости, как правило, имеет большую наценку, поэтому потенциал снижения наценки достаточно велик, в отличие от группы товаров высокой стоимости). Но с качественной точки зрения отношение между наценкой и количеством предприятий является монотонно убывающим, независимо от вида товара. Поэтому, чтобы определить качественную модель, нет необходимости подробно изучать форму зависимости $Markup = f(Amount)$. Благодаря этому задача моделирования часто значительно упрощается, но упрощенная, качественная модель все еще остается приемлемой для достоверного выявления некоторых важных свойств моделируемой системы.

Группа товаров малой стоимости (жев. резинка, леденцы)



Группа товаров средней стоимости (хлеб, молоко, масло)



Группа товаров большой стоимости (орехи, алкоголь, икра рыбы)



Рис. 2. Точное отношение между средней наценкой и количеством предприятий торговли зависит от стоимостной группы товаров. Но средняя наценка всегда является монотонно убывающей функцией от количества предприятий

Например, если количество предприятий будет только увеличиваться, то наступит такой момент времени, когда будет достигнут уровень рентабельности предприятий, и предприятия начнут массово закрываться. Подобное качественное поведение является характерным для всех предприятий торговли (независимо от того, какой группой товаров они торгуют).

Также может оказаться сложным точное описание зависимости между средней наценкой $Markup$ и прибылью $Profit$. Но с качественной точки зрения оно является монотонно возрастающим. Зададим для связи $M^+(Markup, Profit)$ следующие соответствующие значения: (min_m, min_p) – если наценка минимальна, то получаемая прибыль будет минимальной; (max_m, max_p) – при максимальной наценке получаемая прибыль будет максимальной; также верно соответствие $(min_m \dots max_m, min_p \dots max_p)$.

Укажем также соответствие $M^-(Profit, CloseAmount)$ между переменными $Profit$ и $CloseAmount$: $(max_p, zero)$ – при максимальной прибыли количество ликвидированных предприятий равно нулю; $(min_p, open_amount)$ – при минимальной прибыли количество ликвидированных предприятий равно количеству возникающих предприятий; качественному значению $min_p \dots max_p$ переменной $Profit$ соответствует сразу два значения переменной $CloseAmount$ – $open_amount$ и $zero \dots open_amount$.

Приведем полный перечень ограничений, применяемых в разрабатываемой модели:

$M^- (Amount, Markup)$,
 $M^+ (Markup, Profit)$,
 $M^- (Profit, CloseAmount)$,
 $Sum(CloseAmount, Delta, OpenAmount)$,
 $Deriv(Amount, Delta)$,
 $OpenAmount = constant = open_amount / std.$

Здесь имена переменных начинаются с прописных букв, а имена констант – со строчных.

Проиллюстрируем данные ограничения с помощью графа (рис. 3). Узлы графа соответствуют переменным модели, а соединения между узлами обозначают ограничения.

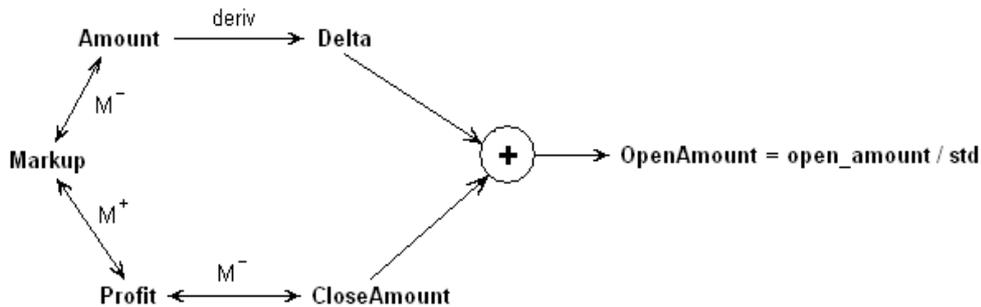


Рис. 3. Графическое представление модели

Приступим к проведению машинного моделирования по методу качественных рассуждений с использованием модели, приведенной на рис. 3. Для этого будем применять следующую систему обозначений. Запись $Amount = one$ означает, что качественное значение переменной $Amount$ равно одному, а запись $Amount = one / inc$ означает, что качественное значение переменной $Amount$ первоначально было равно одному, а теперь возрастает. Начнем моделирование со следующего начального условия:

$Amount = one.$

С учетом наличия ограничения $M^- (Amount, Markup)$, связывающего переменные $Amount$ и $Markup$ (см. рис. 3), с помощью логического вывода получим следующее:

$Markup = max_m.$

К этому ограничению применяется ограничение $M^+ (Markup, Profit)$, что позволяет логически вывести следующее:

$Profit = max_p.$

Далее из ограничения $M^- (Profit, CloseAmount)$ между $Profit$ и $CloseAmount$ получаем $CloseAmount = zero.$

После этого ограничение $Sum(CloseAmount, Delta, OpenAmount)$ или $CloseAmount + Delta = OpenAmount$ конкретизируется таким образом:

$zero + Delta = open_amount.$

Это позволяет получить выражение $Delta = pos.$

Теперь рассмотрим ограничение $Deriv(Amount, Delta)$ между переменными $Amount$ и $Delta$, которое указывает, что значение $Delta$ равно производной по времени от $Amount$. Поскольку $Delta = pos$, с помощью логического вывода

определяем, что значение *Amount* должно быть возрастающим, как показано ниже:

$$Amount = one / inc.$$

Применяя к этому значению ограничения M^- и M^+ , получим:

$$Markup = max_m / dec,$$

$$Profit = max_p / dec,$$

$$CloseAmount = zero / inc.$$

Затем ограничение $Sum(CloseAmount, Delta, OpenAmount)$, то есть $CloseAmount + Delta = OpenAmount$, конкретизируется, как показано ниже:

$$zero / inc + Delta = open_amount / std.$$

Для того чтобы удовлетворялось это ограничение, переменная *Delta* должна иметь следующее значение:

$$Delta = pos / dec.$$

Таким образом, полное описание состояние модели имеет вид:

$$Amount = one / inc,$$

$$Markup = max_m / dec,$$

$$Profit = max_p / dec,$$

$$CloseAmount = zero / inc,$$

$$Delta = pos / dec.$$

Теперь рассмотрим возможные переходы в следующее качественное состояние системы. Предполагается, что кривые изменения значений всех переменных во времени являются гладкими; это означает, что изменение значений происходит непрерывно, и производные этих значений по времени также являются непрерывными. Следовательно, переменная, которая является отрицательной, не может стать положительной, не приняв перед этим нулевое значение. Поэтому отрицательная величина может в следующий момент времени либо остаться отрицательной, либо стать равной нулю. Аналогичным образом, возрастающая переменная может либо продолжать возрастать, либо оставаться постоянной. Но она не может внезапно стать уменьшающейся, поскольку вначале эта переменная должна в течение некоторого времени оставаться постоянной. Иными словами, если направление изменения значения переменной обозначается как “*inc*” (возрастающая), то эта переменная может либо оставаться в состоянии “*inc*”, либо перейти в состояние “*std*” (неизменная), но не сразу в состояние “*dec*” (уменьшающаяся). Еще одно ограничение, которое распространяется на возможные переходы между состояниями, состоит в том, что изменяющаяся переменная не может обозначаться больше чем одним экземпляром одного и того же значения отметки. Поэтому переход из состояния “*zero / inc*” в состояние “*zero / inc*” невозможен.

С учетом вышесказанного следующее качественное состояние переменной *Amount* может быть представлено таким образом:

$$Amount = one..max_a / inc.$$

Это значение наряду с ограничениями модели на рис. 3 определяет качественные состояния других переменных. Поэтому очередное качественное состояние системы принимает следующий вид:

$$Markup = min_m..max_m / dec,$$

$$Profit = min_p..max_p / dec,$$

$$CloseAmount = zero..open_amount / inc,$$

$$Delta = pos / dec.$$

Рассмотрим следующие возможные качественные состояния переменной *Amount*.

1. $Amount = one..max_a / inc.$
2. $Amount = one..max_a / std.$
3. $Amount = max_a / std.$
4. $Amount = max_a / inc.$

В первом случае качественное значение переменной *Amount* остается таким же, как и в предыдущем состоянии, поэтому остается в силе предыдущее описание качественного состояния, и нет необходимости вводить новой качественное состояние. Стоит отметить, что одно и тоже качественное состояние может сохраняться в течение всего рассматриваемого интервала времени.

Остальные три возможных перехода соответствуют трем альтернативным вариантам поведения системы, которые описаны ниже.

1. Переменная *Amount* перестает увеличиваться и принимает постоянное значение до того, как соответствующие ей средняя наценка и прибыль достигнут своих минимальных значений. Ограничения, показанные на рис. 3, позволяют сделать вывод, что другие переменные также принимают постоянные значения, и с тех пор не происходят какие-либо изменения. Поэтому в данном случае конечное состояние процесса машинного моделирования может быть представлено следующим образом:

$$\begin{aligned}Amount &= one..max_a / std, \\Markup &= min_m..max_m / std, \\Profit &= min_p..max_p / std, \\CloseAmount &= open_amount / std, \\Delta &= zero / std.\end{aligned}$$

Строго говоря, это устойчивое состояние достигается только после прохождения бесконечно большого промежутка времени, но это соображение в данном качественном описании не имеет значения, поскольку в нем не учитываются продолжительности интервалов времени.

2. Переменная *Amount* принимает постоянное значение точно в тот момент времени, когда соответствующие ей средняя наценка и прибыль достигают своих минимальных значений. Несмотря на то, что теоретически такая ситуация возможна, в действительности она является весьма маловероятной. В таком случае все другие переменные также принимают постоянные значения, и снова наступает конечное состояние процесса машинного моделирования:

$$\begin{aligned}Amount &= max_a / std, \\Markup &= min_m / std, \\Profit &= min_p / std, \\CloseAmount &= open_amount / std, \\Delta &= zero / std.\end{aligned}$$

3. Наценка и прибыль достигают своих минимальных значений и с этого момента продолжают убывать. После этого предприятия начинают работать в убыток, количество банкротств предприятий резко возрастает, а модель, приведенная на рис. 3, перестает действовать. В такой ситуации происходит резкий переход в новую рабочую область. Для этой новой рабочей области требуется новая модель. Представленные ограничения для данного состояния

динамической системы становятся противоречивыми. Для описания подобных резких переходов необходим особый подход. Такая задача выходит за рамки данной статьи. Поэтому выход из рабочей области модели, приведенной на рис. 3, будем рассматривать как переход еще в одно конечное состояние.

Безусловно, в реальности с конкретными физическими параметрами и постоянным числом открывающихся предприятий может наблюдаться только один из этих трех вариантов развития событий. Рассматриваемая качественная модель является довольно грубой абстракцией действительности, поскольку из процессов, описывающих динамику развития предприятий, исключена вся числовая информация. Качественное моделирование позволяет выдвинуть разумные предположения о том, какие варианты развития событий являются возможными.

Модель качественного состояния динамической системы на основе матричного представления ограничений

Предлагается состояние динамической системы представлять с помощью специфических матрицеподобных структур – *C*- и *D*-систем. Подробное описание способов формализации основных видов данных и знаний в виде упомянутых матрицеподобных структур можно найти в [4], их краткое описание приведено в настоящем сборнике [5]. В этой статье демонстрируется переход от рассмотренных ранее ограничений:

$$\begin{aligned} M^- (Amount, Markup), \\ M^+ (Markup, Profit), \\ M^- (Profit, CloseAmount), \\ Sum(CloseAmount, Delta, OpenAmount), \\ Deriv(Amount, Delta), \\ OpenAmount = constant = open_amount / std, \end{aligned}$$

к их матричному представлению.

Для каждой описанной ранее *i*-ой переменной введем по два атрибута матриц ограничений: первый X_i соответствует значению переменной, второй Y_i – направлению изменения значения. Итак, приведем упомянутые соответствия:

переменная *Amount* – атрибуты X_A и Y_A ;
 переменная *Markup* – атрибуты X_M и Y_M ;
 переменная *Profit* – атрибуты X_P и Y_P ;
 переменная *CloseAmount* – атрибуты X_C и Y_C ;
 переменная *Delta* – атрибуты X_D и Y_D ;
 переменная *OpenAmount* – атрибуты X_O и Y_O .

Явно выпишем домены атрибутов:

$$\begin{aligned} X_A &= \{one, (one, max_a), max_a\}; \\ X_M &= \{min_m, (min_m, max_m), max_m\}; \\ X_P &= \{min_p, (min_p, max_p), max_p\}; \\ X_C &= \{zero, (zero, open_amount), open_amount\}; \\ X_D &= \{pos, zero\}; \\ X_O &= \{open_amount\}; \\ Y_A, Y_M, Y_P, Y_C, Y_D, Y_O &= \{inc, std, dec\}. \end{aligned}$$

При вводе новых переменных, большинство из представленных ранее ограничений распадается на два отношения, записанных с помощью матриц.

Так ограничение M^- (*Amount, Markup*) распадается на:

$$M_1^- [X_A, X_M] = \begin{bmatrix} \{one\} & \{max_m\} \\ \{(one, max_a)\} & \{(min_m, max_m)\} \\ \{max_a\} & \{min_m\} \end{bmatrix};$$

$$M_2^- [Y_A, Y_M] = \begin{bmatrix} \{inc\} & \{dec\} \\ \{std\} & \{std\} \\ \{dec\} & \{inc\} \end{bmatrix}.$$

Ограничение M^+ (*Markup, Profit*) записывается с помощью двух матриц:

$$M_1^+ [X_M, X_P] = \begin{bmatrix} \{min_m\} & \{min_p\} \\ \{(min_m, max_m)\} & \{(min_p, max_p)\} \\ \{max_m\} & \{max_p\} \end{bmatrix};$$

$$M_2^+ [Y_M, Y_P] = \begin{bmatrix} \{inc\} & \{inc\} \\ \{std\} & \{std\} \\ \{dec\} & \{dec\} \end{bmatrix}.$$

По аналогии, формируем матричное представление ограничения M^- (*Profit, CloseAmount*):

$$M_1^- [X_P, X_C] = \begin{bmatrix} \{max_p\} & \{zero\} \\ \{(min_p, max_p)\} & \{(zero, open_amount), open_amount\} \\ \{min_p\} & \{open_amount\} \end{bmatrix};$$

$$M_2^- [Y_P, Y_C] = \begin{bmatrix} \{inc\} & \{dec\} \\ \{std\} & \{std\} \\ \{dec\} & \{inc\} \end{bmatrix}.$$

Ограничение $Sum(CloseAmount, Delta, OpenAmount)$ или $CloseAmount + Delta = OpenAmount$ преобразуется так:

$$QSum_1 [X_C, X_D] = \begin{bmatrix} \{zero, (zero, open_amount)\} & \{pos\} \\ \{open_amount\} & \{zero\} \end{bmatrix};$$

$$QSum_2[Y_C, Y_D, Y_O] = \begin{bmatrix} \{std\} & \{std\} & \{std\} \\ \{inc\} & * & \{inc\} \\ \{inc\} & \{dec\} & * \\ * & \{inc\} & \{inc\} \\ * & \{dec\} & \{dec\} \\ \{dec\} & \{inc\} & * \\ \{dec\} & * & \{dec\} \end{bmatrix} \cdot$$

Здесь компонента “*” описывает множество, равное домену соответствующего атрибута.

Ограничение $Deriv(Amount, Delta)$ переписывается в виде:

$$Deriv[Y_A, X_D] = \begin{bmatrix} \{inc\} & \{pos\} \\ \{std\} & \{zero\} \\ \{dec\} & \{neg\} \end{bmatrix}.$$

Ограничение $OpenAmount = constant = open_amount / std$ записывается с помощью двух матриц:

$$OpenAmount[X_o] = [\{open_amount\}];$$

$$OpenAmount[Y_o] = [\{std\}].$$

В качестве “ядра” описания текущего состояния моделируемой динамической системы выступают атрибуты X_A и Y_A , далее имеющееся описание текущего состояния можно пополнить на основе анализа представленных выше матриц ограничений, то есть строится замыкание текущего состояния. После того, как состояние построено, происходит переход в другое состояние или завершение процесса моделирования. Предлагается задачу замыкания текущего состояния рассматривать как задачу удовлетворения ограничений [6]. Решение данной задачи предлагается строить на основе базовых методов распространения нечисловых ограничений, разработанных ранее одним из авторов статьи [7-9]: описание текущего состояния следует считать полным, когда система ограничений, выраженных в виде C - и D -структур, становится совместной. Однако, разработка конкретных методов пополнения состояния выходит за рамки настоящей статьи.

Заключение

В настоящей статье предлагается качественное моделирование сложных динамических систем проводить на основе модели QDE. Описана технология построения модели динамической системы на примере развития торговых предприятий.

В дальнейших исследованиях значительное внимание планируется уделить разработке методов, реализующих функцию замыкания текущего состояния и функцию переходов, поскольку в литературе, посвященной интеллектуальным динамическим системам, подобные методы практически не представлены. Алгоритмы, реализующие данные функции, неизбежно обладают

высокой вычислительной сложностью, что затрудняет, а иногда и делает невозможным, применение обобщенных схем вычислений, где не учитываются особенности представления знаний в памяти компьютера и не уделяется должного внимания вопросам ускорения вычислительных процедур.

Литература

1. Братко, И. Алгоритмы искусственного интеллекта на языке PROLOG / И. Братко // пер. с англ., 3-е изд. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. - 640 с.
2. Осипов, Г.С. Динамика в системах, основанных на знаниях / Г.С. Осипов // Известия Академии Наук. Теория и системы управления. – 1998. – №5. – С.24-28.
3. Осипов, Г.С. Методы искусственного интеллекта / Г.С. Осипов. – М.: Физматлит, 2011. – 296 с.
4. Кулик, Б.А. Алгебраический подход к интеллектуальной обработке данных и знаний / Б.А. Кулик, А.А. Зуенко, А.Я. Фридман. – С-Пб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 235 с.
5. Зуенко, А.А., Фридман, О.В. Формирование учебных планов вузов как задача удовлетворения ограничений / А.А. Зуенко, О.В. Фридман // Труды Кольского научного центра. Информационные технологии. -6/2016(40). –Вып.7. –Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2016. –С.80-93.
6. Montanari, U. Networks of constraints: Fundamental properties and applications to picture processing / U. Montanari // Information Sciences. – 1974. – 7(2). – P.95-132.
7. 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.
8. 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 конференция по искусственному интеллекту с международным участием. – Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014. -Т.1. – С.32-40.
9. 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 конференция по искусственному интеллекту с международным участием. – Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014. - С41-49.

Сведения об авторах

Зуенко Александр Анатольевич – к.т.н, старший научный сотрудник,

e-mail: zuenko@iimm.ru

Alexander A. Zouenko – Ph.D. (Tech. Sci.), senior researcher

Македонов Роман Александрович – младший научный сотрудник,

e-mail: makedonov@iimm.ru

Roman A. Makedonov – junior researcher

УДК 004.682

П.А. Ломов

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА СОСТАВНЫХ ОНТОЛОГИЧЕСКИХ ПАТТЕРНОВ СОДЕРЖАНИЯ*

Аннотация

Онтологические паттерны являются формализацией проверенных решений, которые могут быть повторно использованы при разработке онтологий. В данной работе рассматривается технология автоматизации синтеза составного онтологического паттерна содержания в соответствии с запросами разработчика онтологии. Наряду с этим приводится реализация данной технологии в виде программной библиотеки, позволяющей подобрать подходящие для синтеза паттерны и осуществить их комбинирование.

Ключевые слова:

онтология, онтологические паттерны, онтологический инжиниринг.

P.A. Lomov

AUTOMATION OF SYTHESIS OF COMPOSITE CONTENT ONTOLOGY DESIGN PATTERN

Abstract

Using of Ontology Design Patterns (ODPs) become useful for development and reengineering ontologies. ODPs represent encodings of best practices supporting ontology construction by facilitating reuse of proven solution principles. In this paper the automate selection of a CDP combination and sub-sequent synthesis of new composite CDP is considered.

Keywords:

ontology, ontology design patterns, ontology engineering.

Введение

Несмотря на то, что на данный момент существует множество программных средств [1-4] и технологий онтологического инжиниринга [5-8], разработка онтологий остается сложной задачей. В связи с этим повторное использование (reuse) эффективных практик решения классов задач онтологического моделирования является многообещающим подходом. Одной из его реализаций является использование онтологических паттернов проектирования (Ontology Design Patterns, ODP). Основные преимущества и недостатки применения паттернов при разработке и последующем сопровождении онтологий были рассмотрены автором ранее в работе [9].

В соответствии с [10] ODP представляют эффективные решения типовых проблем онтологического моделирования. В рамках ODP для каждого такого решения, помимо его описания, дается обобщенное определение проблемной ситуации, в которой необходимо его применять, а также представляются последствия использования данного решения. Это позволяет разработчикам не

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

тратить время на поиск и тестирование разных вариантов решения проблемы моделирования, а выбрать, исходя из поставленной перед ними задачи, и реализовать вариант, предлагаемый тем или иным ODP. Таким образом, применение ODP позволяет сократить затраты труда и времени, а также гарантировать качество полученной в итоге онтологии за счет применения проверенных решений в процессе ее разработки.

Существует несколько типов ODP, каждый из которых ориентирован на решение различных видов задач онтологического моделирования. В данной статье основное внимание будет сосредоточено на проблемах использования онтологических паттернов содержания (Content ontology Design Patterns, CDP), которые представляют возможные варианты представления знаний предметной области в виде наборов классов онтологии, связанных отношениями, то есть фрагментов онтологий. Для каждого CDP задается обобщенное определение ситуации (General Use Case, GUC), в которой необходимо его применять. Например, участие в событии, исполнении роли, наличие частей у объекта и другие. Исходя из GUC, для паттернов содержания также задаются наборы квалификационных вопросов (Competency questions). Каждый из таких вопросов может быть преобразован в запрос к онтологии, ответ на который, гарантировано будет получен в случае реализации соответствующего паттерна.

Общая схема применения ODP и в частности паттернов содержания представлена в технологии экстремального проектирования онтологий (eXtreme Design methodology, XD). Она подразумевает поиск разработчиком необходимого паттерна содержания в специализированном каталоге по ключевым словам и квалификационным вопросам, импортирование соответствующего ему онтологического фрагмента в разрабатываемую онтологию, последующая его конкретизация путем определения наследников его элементов и тестирование полученного фрагмента онтологии. Разумеется, разработчик может не обнаружить паттерна, полностью отвечающего требованиям конкретной задачи. В таком случае ему может потребоваться комбинация нескольких из них. Например, определение действия, порядок и состав этапов которого зависит от его участников требует комбинирования паттернов содержания «Участие» (Participation), «Часть» (PartOf), «Последовательность» (Sequence) и «Ситуация» (Situation).

При этом заметим, что использование комбинации нескольких паттернов в ряде случаев не сводится к простому объединению соответствующих им фрагментов онтологий, а требует их перестройки и связывания их отношениями особым образом. Это предъявляет к разработчику дополнительные требования наличия специализированных знаний и навыков онтологического инжиниринга. Тем самым снижается польза от использования технологии паттернов. Представление же в каталоге всего множества комбинаций нецелесообразно в виду их большого числа.

Для решения данной проблемы в работе рассматриваются специфические вопросы комбинирования паттернов содержания и предлагается технология генерации составного паттерна по требованиям пользователя. Ее применение позволит автоматизировать подбор комбинаций паттернов и компоновку соответствующих им онтологических фрагментов с образованием в итоге фрагмента онтологии составного паттерна содержания, позволяющего обеспечить должное представление знаний предметной области.

Онтологические паттерны содержания как точки зрения на понятия онтологии

В общем процедура синтеза составного паттерна содержания - X состоит из следующих шагов:

1. Пользователь выбирает начальный паттерн. Соответствующий ему фрагмент онтологии становится основой для формирования фрагмента для синтезируемого паттерна X;

2. Среди понятий, представленных классами в онтологическом фрагменте паттерна X, пользователь выбирает то, описание которого он хотел бы расширить другими паттернами;

3. Исходя из выбранного понятия и паттерна, к которому оно относится, формируется и представляется пользователю набор предлагаемых паттернов (Set of offered patterns, SOP);

4. Пользователь выбирает желаемый паттерн из предложенных для добавления в синтезируемый паттерн X;

5. По желанию пользователя осуществляется повтор шагов 2-4 или завершение процедуры переходом к шагу 6;

6. Пользователь осуществляет необходимую правку полученного паттерна X.

Заметим, что первый шаг процедуры требует того, чтобы пользователь был знаком с паттернами содержания для выбора из них подходящего для решения поставленной задачи моделирования. В случае затруднений с таким выбором по умолчанию предлагается паттерн «Виды сущностей» (Type of entities). Он имеет простую структуру и определяет с помощью классов своего фрагмента онтологии основные типы сущностей предметной области, такие как «Качество» (Quality), «Объект» (Object), «Событие» (Event), «Абстрактный объект» (Abstract). Особенностью его использования при синтезе является возможность для пользователя добавлять отдельные классы этого паттерна. Например, пользователь может добавить в синтезируемый паттерн X только класс «Объект» данного паттерна и далее расширять этот класс другими паттернами.

При формировании набора предлагаемых паттернов на каждой итерации учитываются следующие отношения [11, 12] между паттернами:

- Отношение «**специализирует**» (specialization) – Паттерн P2 специализирует другой паттерн P1, когда по крайней мере один из классов или одно из свойств в P2 является подклассом или подсвойством некоторого класса или свойства P1. При этом в остальном P1 и P2 идентичны.

- Отношение «**имеет часть**» (has-components) проявляется в следующих случаях:

- Паттерн P2 расширяет (extends) паттерн P1, т.е. когда P2 содержит P1 целиком и добавляет новые классы или свойства;

- Паттерн P3 интегрирует паттерны (integrates) P2 и P1, т.е. когда P3 включает P1 и P2;

- Паттерн P3 объединяет (merges) паттерны P2 и P1, т.е. когда P3 включает P1 и P2 и задает хотя бы одно отношение между двумя классами из P1 и P2.

- Отношение «**соотносится**» (related) между паттернами P1 и P2 устанавливается в случае, если они имеют некоторые общие классы или

наследуют некоторые классы друг друга. При этом в остальном P1 и P2 различны.

Учет приведенных отношений производится при формировании набора предлагаемых паттернов для некоторого паттерна X – SOP(X) по следующим правилам:

- правило детализации описания – Если паттерн A специализирует паттерн X, то A включается в SOP(X);
- правило детализации описания части – Если паттерн B часть паттерна X, а паттерн A специализирует паттерн B, то паттерн A включается в SOP(X);
- правило расширения описания – Если паттерн A соотнесён с паттерном X через выбранное пользователем понятие, то он включается во множество SOP(X);
- правило описания целого – Если паттерн A содержит паттерн X в качестве части, то A он включается в SOP(X).

При добавлении нового паттерна в синтезируемый пользователю представляются на выбор различные варианты добавления в виде:

$$AO_i = \{action_n(\{EConcept_j\}, \{AConcept_k\})\},$$

где $\{EConcept_j\}$ – подмножество понятий синтезируемого паттерна и $\{AConcept_k\}$ подмножество понятий добавляемого паттерна, над которыми будут произведено действие - action.

Действия зависят от конкретных паттернов и могут включать переименование понятия синтезируемого паттерна с учетом добавляемого, определения добавляемого понятия как супер/подкласса для существующего или его замещения и другие. Например, при расширении понятия «Событие» (Event) посредством паттерна «Коллекция» (Collection) с целью представления его в виде некоторого множества, будет предложено сменить имя у понятия «Событие» на «КоллекцияСобытие» (EventCollection).

Особенности использования некоторых паттернов при синтезе

Проведения синтеза с использованием некоторых общих паттернов содержания имеет некоторые особенности. Одним из таких паттернов является «Ситуация» (Situation)[12]. Так как он используется в качестве основы (как часть и/или предок) для некоторых других общих паттернов содержания (далее будем называть их «Ситуационные паттерны»), то приведенные далее приемы применимы и к ним. Ситуационные паттерны применяются в случае необходимости представления n-арного отношения ($n > 2$) между сущностями предметной области. Например, представление статуса объекта, участвующего в некотором событии или наличие у пациента диагноза с определенной вероятностью. В этом случае отношения будут тернарными. Ввиду того, что на сегодняшний день распространенным средством описания онтологий является язык веб-онтологий (Ontology Web Language, OWL)[13], который позволяет задавать только бинарные отношения, представление отношений большей арности производится с помощью определения «реифицированного отношения» (reified relation). Данное «отношение» является специальным классом «Ситуация» (Situation), который имеет бинарные отношения «задан-для» (isSettingFor) со всеми участниками n-арного отношения (компонентами ситуации) (рис. 1).

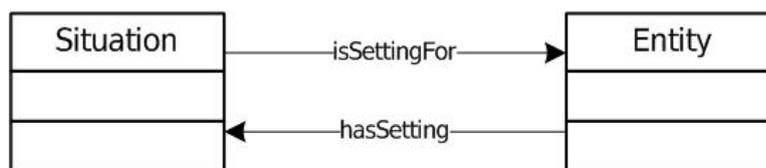


Рис. 1. Диаграмма классов CDP «Ситуация» (Situation)

Заметим, что обычно при использовании данного паттерна отношение «задан-для» заменяется более конкретным отношением-наследником, указывающим на роль соответствующего понятия в данной ситуации. Таким образом, все компоненты ситуации – участники n-арного отношения, связаны между собой через отношения с понятием ситуации.

При выполнении синтеза с использованием ситуационных паттернов возможны следующие случаи:

1. Ситуационный паттерн применяется к понятию синтезируемого паттерна и при этом в последнем нет других ситуационных паттернов, добавленных ранее;

2. Ситуационный паттерн применяется к понятию синтезируемого паттерна, которое уже является компонентом ситуации, заданной другим ситуационным паттерном;

3. Ситуационный паттерн применяется к понятию синтезируемого паттерна, которое не является компонентом ситуации, заданной другим ситуационным паттерном. При этом среди паттернов, добавленных на предыдущих шагах, есть ситуационные.

В первом случае пользователю предлагаются на выбор несколько вариантов добавления, определяющих какие из понятий следует включить в ситуацию, определяемую добавляемым паттерном.

Во втором случае варианты добавления будут включать выполнение:

- **поглощения** (absorption) ситуации, заданной в добавляемом ситуационном паттерне. В этом случае ее компоненты будут включены в существующую в синтезируемом паттерне;

- **включения** (inclusion) ситуации, заданной в добавляемом ситуационном паттерне, в виде компонента в существующую в синтезируемом паттерне.

Поглощение следует выполнять, когда при будущем использовании онтологии, включающей синтезируемый паттерн, не предполагается выделять отдельно контекст ситуации (набор ее компонентов и отношений между ними) добавляемого ситуационного паттерна. Это позволит уменьшить в онтологии количество классов-ситуаций, которые являются в большей степени искусственными в том смысле, что часто не соответствуют понятиям предметной области.

Включение ситуации в виде компонента существующей следует выполнять, когда ее контекст является значимым. К таким случаям относится использование при синтезе паттерна «Последовательность» (Sequence) или его производных. С помощью этого паттерна можно задать порядок следования некоторых сущностей за счет определения между ними отношений «следует»

(follows), «следует-непосредственно» (directlyFollows), «предшествует» (precedes), «предшествует-непосредственно» (directlyPrecedes) (рис. 2).

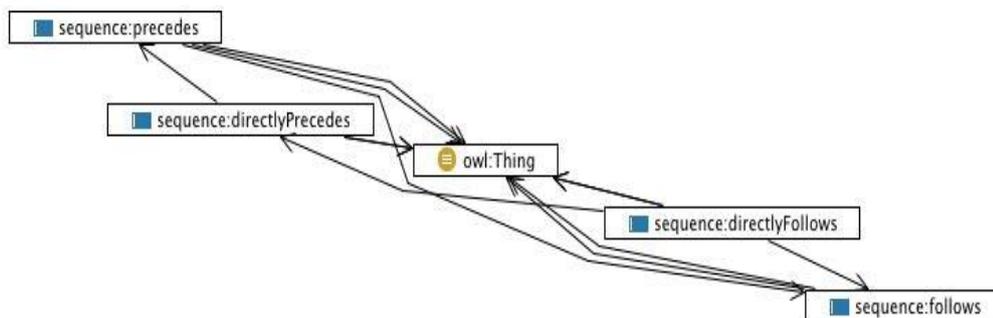


Рис. 2. Диаграмма классов CDP «Последовательность» (Sequence)

При добавление данного паттерна в существующую ситуацию производится его приведение к ситуационному паттерну (рис. 3).

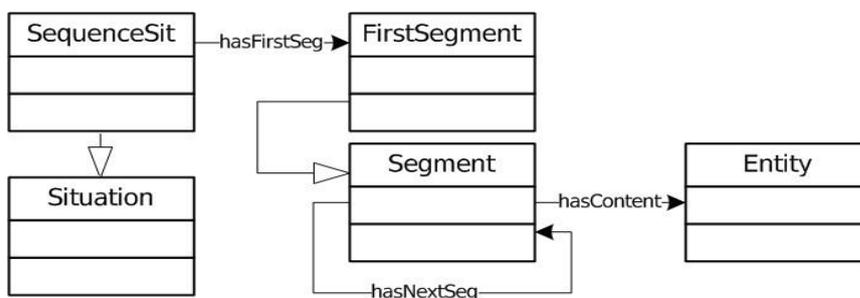


Рис. 3. Диаграмма классов CDP «Последовательность» (Sequence), преобразованного в ситуационный паттерн

Это предполагает представление заданной в нем последовательности в виде класса-ситуации «СитуацияПоследовательность» (SequenceSit), включающей единственный компонент – первый элемент (FirstSegment), который в свою очередь ссылается через отношение «имеет-следующий-сегмент» (hasNextSeg) на следующий и на упорядочиваемую сущность (Entity).

Полученный класс-ситуация «СитуацияПоследовательность» (SequenceSit) становится при добавлении компонентом существующей. Таким образом, удастся сохранить заданный порядок на элементах.

Рекомендуется также выполнять включение при добавлении ситуационных паттернов, задающих сложные свойства [14]. Такие свойства обычно представляют атрибуты объектов предметной области с дополнительной характеристикой (вероятностью, точностью и др.) или включают несколько аспектов (например, компания имеет ежемесячную прибыль 1 000 000 руб., которая снижается). Данные свойства также представляются в виде подклассов класса «Ситуация», имеющих специальное наименование в терминах предметной области (например, «ТрендИзмененияДохода»). Эти подклассы будут потеряны в случае выполнения поглощения таких ситуаций, так как в этом

случае их компоненты станут компонентами существующей ситуации, а они сами станут не нужны и будут отброшены. Это может отрицательно сказаться на полноте представления понятийной системы предметной области в онтологии.

В третьем случае пользователю будет предложены варианты добавления двух видов. Первые будут предполагать добавление ситуации с включением в нее различных комбинаций понятий, не являющихся компонентами других ситуаций в синтезируемом паттерне. Вторые будут представлять возможные включения в существующие или поглощения ими добавляемой ситуации.

Программная реализация технологии

Реализация рассмотренных принципов подбора и компоновки паттернов были реализованы в виде библиотеки на языке программирования Java.

В процессе разработки для рассматриваемых общих паттернов содержания из каталога [14] в соответствии с их структурой и способами модификации при синтезе были определены следующие типы:

- **Паттерны-перечисления** (Enumerated CDP) – паттерны, представляющие различные множества объектов предметной области. К данному типу относятся паттерны: «Сумка» (Bag), «Коллекция» (Collection), «Список» (List), «Набор» (Set);

- **Паттерны-ситуации** (SyntSitbased CDP) – паттерны, которые являются разновидностями паттерна Ситуация. К данному типу относятся паттерны: «Ситуация» (Situation), «Роль участника» (ParticipantRole), «N-арное участие» (NaryParticipation);

- **Позиционные паттерны** (PositionCDP) – паттерны, имеющие общую структуру – совокупность классов, связанных между собой отношениями. К данному типу относятся паттерны: «Объект-роль» (ObjectRole), «Соучастие» (Coparticipation), «Участие» (Participation).

Среди позиционных были выделены следующие подтипы:

- **Паттерны-отношения** (SinglePropertyCDP) – паттерны, представляющие только единичное отношение между понятиями предметной области. К данному типу относятся паттерны: «Компонент» (Componency), «Последовательность» (Sequence), «Часть» (PartOf);

- **Паттерны-концепты** (SinglePositionCDP) – паттерны, включающие единичное понятие: К данному типу относятся паттерны: «Временной интервал» (TimeInterval), «Область» (Region), «Виды сущностей» (TypeOfEntities).

Для каждого из подтипов был реализован абстрактный Java-класс, включающий методы комбинирования с паттернами других типов (рис. 4).

В качестве примера рассмотрим генерацию с использование разработанной библиотеки составного паттерна для представления действия, состав участников которого определяет его вероятную продолжительность. Подчеркнем, что в данном случае недостаточно просто создать в онтологии классы, представляющие действие, участника и продолжительность и соединить их отношениями. Необходимо определить между ними тернарное отношение, тем самым объединить их в единый контекст. В дальнейшем это позволит представлять в онтологии, например, факты о разной продолжительности выполнения одного и того же действия различными исполнителями.

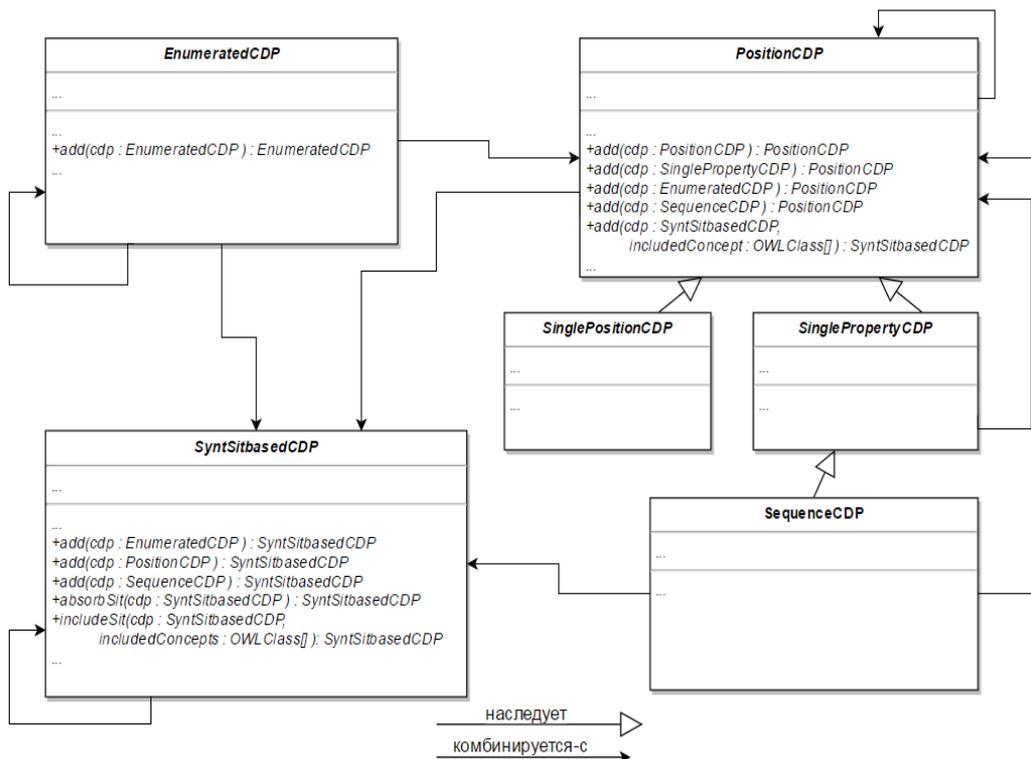


Рис. 4. Схема комбинирования паттернов при синтезе (варианты возможного комбинирования показаны стрелками)

Существует несколько способов получения данного паттерна. Далее будет рассмотрен один из возможных. В качестве исходного на первом шаге используем паттерн «Виды сущностей» (Type of entities). Из данного паттерна выберем для добавления его класс «Событие» (Event), в виду того, что действие (Action), которое мы хотим представить, будет рассматриваться как его подкласс. Таким образом, добавление паттерна «Виды сущностей» (Type of entities) подразумевает включение в синтезируемый класса «Событие» (Event) и создание его подкласса - «ПодСобытие» (SubEvent). Данный класс при добавлении паттерна генерируется автоматически, его имя может изменено на последнем шаге процедуры (рис. 5, а).

На следующем шаге для расширения понятия «ПодСобытие» (SubEvent), принадлежащее позиционному паттерну «Виды сущностей» (Type of entities), выбирается ситуационный паттерн «N-арное участие» (Nary-Participation), так как он определяет необходимые атрибуты события (участники и продолжительность). Для его добавления в синтезируемому паттерну применяется метод разработанной библиотеки:

PositionCDP::add(Nary-Participation, SubEvent) : SyntSitbasedCDP

В результате его применения в синтезируемый паттерн будет добавлена ситуация, заданная добавляемым паттерном «N-арное участие», а класс «ПодСобытие» (SubEvent) будет включен в нее. Синтезируемый паттерн примет вид (рис. 5, b)

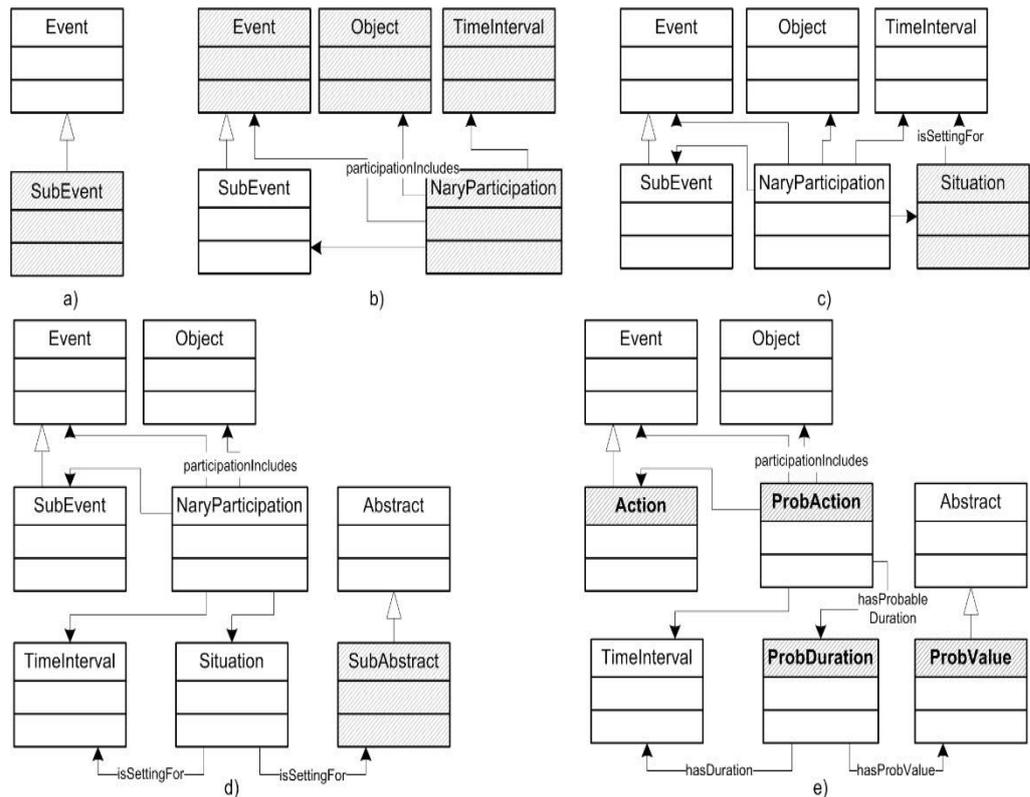


Рис. 5. Пример синтеза составного онтологического паттерна

Заметим, что в полученном на данном шаге паттерне уже имеется класс, который определяет временной интервал действия – «Временной интервал» (TimeInterval). Однако нам необходимо добавить дополнительную характеристику – его вероятность. Для этого надо сформировать еще одно тенарное отношение с помощью паттерна «Ситуация». Для этого выбираем понятие «Временной интервал» (TimeInterval) и расширяем его паттерном «Ситуация» (Situation). Для этого используем метод библиотеки:

SyntSitbasedCDP :: includeSit(Situation, {TimeInterval}) : SyntSitbasedCDP

В результате в синтезируемый паттерн будет добавлена ситуация с включением в нее понятия «Временной интервал» (TimeInterval). Синтезируемый паттерн примет следующий вид (рис. 5, с).

На следующем шаге нам необходимо дополнить добавленную ситуацию понятием, которое будет обозначать вероятность. Для этого необходимо расширить понятие «Ситуация» (Situation) с помощью паттерна «Виды сущностей» (Type of entities). Из последнего необходимо выбрать для включения понятие «Абстрактный объект» (Abstract), которое будет использоваться для представления вероятности. Для выполнения этих действий применяется следующий метод библиотеки:

SyntSitbasedCDP :: add(TypeOfEntities) : SyntSitbasedCDP

В данном случае, как и при прошлом использовании паттерна «Виды сущностей», для класса, представляющего выбранное понятие автоматически

создается подкласс – «ПодАбстрактный объект» (SubAbstract), который и добавляется в ситуацию (рис. 5, d).

Синтез паттерна завершается корректировкой наименований отношений и концептов (рис. 5, e). Полученный паттерн позволяет отвечать на квалификационные вопросы паттернов, использованных для его синтеза, а также на вопросы, определяемые заданной ситуацией. Например, «Какова вероятность данной длительности действия с этими исполнителями?». Таким образом, в результате был синтезирован паттерн, позволяющий представлять в онтологии более сложные описания знаний предметной области.

Заключение

В данной статье рассмотрена технология автоматизированного синтеза составных онтологических паттернов содержания для их последующего применения для решения задач представления знаний предметных областях. Представлена общая процедура синтеза, рассмотрены способы подбора и специфические случаи комбинирования распространенных онтологических паттернов содержания. Представлена реализация предложенной технологии в виде JAVA-библиотеки для применения в составе программного инструментального средства разработки онтологий на основе онтологических паттернов содержания.

Литература

1. Liebig, T. *OntoTrack: Combining Browsing and Editing with Reasoning and Explaining for OWL Lite Ontologies* The Semantic Web, / T. Liebig, S. McIlraith, D. Plexousakis, Harmelen F. *OntoTrack // Proceedings of ISWC 2004*, Springer Berlin Heidelberg, 2004. - P.244-258.
2. Motta, E. *A Novel Approach to Visualizing and Navigating Ontologies* / E. Motta, P. Mulholland, S. Peroni, d'A qui n, M., Manuel Gomez-Perez// *Proceedings of the 10th International Conference on The Semantic Web - Volume Part I*, Springer-Verlag, 2011. -P.470-486.
3. Tsarkov, D. *Chainsaw: a Metareasoner for Large Ontologies* / D. Tsarkov, Palmisano I. // *Proceedings of the 1st International Workshop on OWL Reasoner Evaluation (ORE-2012)*, Manchester, UK, July 1st. 2012. -P.20-29.
4. Bijan, P. *CropCircles: Topology Sensitive Visualization of OWL Class Hierarchies* / P. Bijan, T. Wang, J. Golbeck // *The Semantic Web - ISWC 2006*, 5th International Semantic Web Conference, ISWC 2006, Athens, GA, USA, November 5-9, 2006, *Proceedings*, 2006. - P.695-708.
5. Suárez-Figueroa, M. *The NeOn Methodology framework: A scenario-based methodology for ontology development* *Applied Ontology* /M. Suárez-Figueroa, N. Gómez-Pérez, M. Fernández-López // *Applied ontology* 10(2), 2015. -P.107-145. Guarino, N., Welty, C. *An overview of OntoClean* / Guarino N., Welty C. / In Staab S. and Studer R. (Eds) // *Hand-book on Ontologies*, Springer, Berlin, 2004. - P.151-172.
6. Malzahn, N. *Collaborative Ontology Development - Distributed Architecture and Visualization* /N. Malzahn, S. Weinbrenner // *Proceedings of the German*

- E-Science Conference, Max Planck Digital Library, 2007. – P.34-45.
7. Amal, Z., Roger, N., Building Domain Ontologies from Text for Educational Purposes / Z. Amal, N. Roger. // IEEE Transactions on Learning Technologies, vol.1, no. 5. January-March, 2008. - P.49-62. doi:10.1109/TLT.2008.12.
 8. Ломов, П.А., Применение паттернов онтологического проектирования для создания и использования онтологий в рамках интегрированного пространства знаний / П.А. Ломов // Онтология проектирования. -Т5, №2(16)/2015. – Самара: Новая техника, 2012. - С.233-245. ISSN 2223-9537.
 9. Gangemi, A. Ontology Design for Interaction in a Reasonable Enterprise / A. Gangemi, V. Presutti// Handbook of Ontologies for Business Interaction, 2007. – P.86-90.
 10. Gangemi, A., Ontology Design Patterns for Semantic Web Content // Proceedings of the Fourth International Semantic Web Conference, Galway, Ireland, Springer, 2005. –P.262-276.
 11. Ломов, П.А. Использование отношений между онтологическими паттернами содержания при работе с онтологиями / П.А. Ломов // Информационные системы и технологии, 2016. - №2 (94). -С.30-39. ISSN 2072-8964.
 12. Masolo, C., Borgo, S., Gangemi, A., Guarino, N., Oltramari, A., Shneider, L. WonderWeb. Final Report. Deliverable D18, 2003, 103 pp.
 13. OWL 2 Web Ontology Language. – Режим доступа: <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/>
 14. Defining N-ary Relations on the Semantic Web. – Режим доступа: <https://www.w3.org/TR/swbp-n-aryRelations/>
 15. Ontology design patterns portal.
– Режим доступа: <http://www.ontologydesignpatterns.org>

Сведения об авторе

Ломов Павел Андреевич – к.т.н, научный сотрудник,

e-mail: lomov@iimm.ru

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

УДК 004.057

В.В. Диковицкий, И.О. Датъев

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОТОКОЛА МАРШРУТИЗАЦИИ OLSR В СЕТЕВОМ СИМУЛЯТОРЕ NS-3

Аннотация

Многошаговые беспроводные сети являются перспективным направлением информационно-коммуникационных сетей. Основной проблемой исследования характеристик, предлагаемых в этой области решений является дороговизна натуральных экспериментов. Поэтому основным средством тестирования разработанных протоколов передачи данных и оборудования является имитационное моделирование. В статье приведены особенности программной реализации протокола маршрутизации OLSR в широко используемом в научных исследованиях сетевом симуляторе NS-3.

Ключевые слова:

многошаговые беспроводные сети, MANET, NS-3, протокол OLSR.

V.V. Dikovitsky, I.O. Datyev

FEATURES SOFTWARE IMPLEMENTATION OF ROUTING PROTOCOLS OLSR THE NETWORK SIMULATOR NS-3

Abstract

Multihop wireless networks are a promising area of information and communication networks. The high cost of full-scale experiments is the main problem of solutions evaluating offered in this area. Therefore, the main testing tool of developed communication protocols and equipment is a simulation. The article presents the features of OLSR routing protocol software implementation in NS-3 network simulator that is widely used in scientific research.

Keywords:

multihop wireless networks, MANET, NS-3, OLSR routing protocol.

Введение

Сети MANET в последнее время пользуются большой популярностью: многошаговые самоорганизующиеся беспроводные сети с распределенным управлением, в которых возможна передача данных между двумя узлами через промежуточные узлы. Узлы сети являются не только пользовательскими терминалами, но и являются ретрансляторами-маршрутизаторами, ретранслируя пакеты других абонентов и участвуя в нахождении маршрутов к ним, следовательно, эти сети способны к самоорганизации.

Такие сети отличаются следующими особенностями:

- 1) возможность передачи данных на большие расстояния без увеличения мощности передатчика;
- 2) устойчивость к изменениям в топологии сети;
- 3) возможность быстрой смены топологии в условиях неблагоприятной шумовой обстановки или вывода из строя одного из узлов;
- 4) высокая скорость развертывания.

Существующие проблемы многошаговых самоорганизующихся беспроводных сетей:

- 1) проблема безопасности передаваемых данных;
- 2) относительно низкая скорость передачи данных;
- 3) низкая помехоустойчивость сети;
- 4) проблемы протоколов маршрутизации.

Принято делить протоколы маршрутизации на проактивные (табличные), реактивные (зондовые) и их гибриды. Проблема заключается в том, что реально разработанные протоколы маршрутизации сетей MANET либо не реализованы физически в языке C, либо ориентированы на достижение оптимального использования сетевых ресурсов при условиях работы сети, когда топология меняется медленно или вообще не меняется [1].

Протокол OLSR

Одним из проактивных протоколов является OLSR, использующий обмен сообщениями приветствия и контроля для получения информации о топологии сети. Узлы используют эту информацию для определения следующего шага (hop) в пути маршрутизируемого пакета данных. Является одним из наиболее популярных протоколов. Протокол OLSR основан на понятии многоточечной ретрансляции MPR (MultiPoint Relay). Каждый узел сети m выбирает несколько узлов из числа своих соседей (т.е. из узлов, с которыми у него установлено соединение). В итоге в сети формируется множество узлов MPR(m). Множество формируется так, чтобы все узлы были связаны со всеми узлами, отстоящими от них на расстояние в 2 шага. Информация об MPR изменяется каждый раз, когда обнаруживается изменение в узлах, отстоящих от данного на 1 или 2 шага. Каждый узел сети хранит свою таблицу маршрутизации, которую формирует на основании информации о топологии сети. Она распространяется по всей сети посредством служебных пакетов выбора маршрута Topology Control (TC). В пересылке TC-пакетов участвуют только MPR-узлы, остальные узлы принимают и обрабатывают такие пакеты, но не пересылают их дальше. Для каждого MPR формируется список соседних узлов, выбравших его в качестве MPR, – список MPR Selectors (MPRS). Информация о MPRS передается в специальных HELLO-пакетах, которые передаются только между двумя соседними узлами. В сеть (в TC-пакетах) передается только информация о состоянии соединений между MPR и его MPRSs. Данный механизм позволяет существенно снизить число передач служебных пакетов по сравнению с лавинной рассылкой. В протоколе OLSR служебные сообщения содержат последовательные номера (аналог DSN в HWMP), которые увеличиваются в последующих сообщениях. Таким образом, получатель контрольного сообщения может при необходимости с легкостью определить, какая информация является актуальной, даже если сообщения пришли в обратном порядке. OLSR разработан как совершенно распределенный протокол, он не зависит от каких-либо корневых узлов. Кроме того, каждый узел периодически рассылает контрольные пакеты, поэтому протокол устойчив в случае потери части этих сообщений, что довольно часто случается с широковещательными пакетами в беспроводных сетях [2, 3].

Сетевой симулятор NS3

NS3 - является мощным сетевым симулятором для моделирования телекоммуникационных систем и распространяется под лицензией GNU GPLv2. Симулятор решает одну из главных проблем моделирования сетей - проблему стоимости оборудования. Сетевые симуляторы являются программными продуктами, позволяющими выполнять имитационное моделирование телекоммуникационных систем. Применение имитационного моделирования позволяет проводить эксперименты, не разворачивая реальную сеть, что является трудоемким, дорогостоящим и, как правило, протяженным во времени процессом. В NS3 разработаны модели беспроводных сетей различных типов, позволяющие проводить моделирование с движущимися объектами в трёхмерном пространстве. Кроме того, реализованы модели проводных и смешанных топологий различной сложности, в том числе, Mesh-сетей на основе стека протоколов 802.11s. Разработан Framework под названием FlowMonitor, предоставляющий различные, а главное гибкие методы сбора самых различных показаний с моделируемых сетевых узлов и каналов связи. Симулятор «по умолчанию» не имеет собственного графического интерфейса, однако используются такие средства как NetAnimator и PyViz, позволяющие выводить схему на экран для наблюдения за работой протокола. Таким образом, функциональность NS3 превосходит многие коммерческие симуляторы [4].

Реализация протокола маршрутизации OLSR в сетевом симуляторе NS3

Эксперименты [5] показывают, что характеристики протокола OLSR, связанные с доставкой пакетов данных ухудшаются с повышением степени мобильности узлов. В настоящее время есть различные направления решения данной проблемы: использование более надежных способов доставки широкоэмитерных пакетов, развитие «cross-layer» взаимодействия [6] в OLSR протоколе (OLSR-CL). Для подтверждения эффективности разрабатываемых решений предлагается использовать сетевой симулятор NS3, моделирующий различные протоколы и топологии с возможностью визуализации, в котором «по умолчанию» доступно достаточно большое число протоколов, OLSR в том числе. В NS3 протокол OLSR использует IPV4, их реализация основана на RFC 3626, а не на RFC 7181 [7]. В отличие от версии NS2, NS3 для OLSR не поддерживает обратную связь MAC-уровня, как описано в RFC 3626.

В дальнейшем планируется добавление дополнительных параметров в существующую реализацию протокола OLSR в сетевом симуляторе NS3, для повышения степени реалистичности симуляции протокола [8].

Реализация и работа API (англ. *application programming interface*, *интерфейс программирования приложений*) сетевого симулятора находится в файле ...examples/olsr-hna.cc. Пример готового протокола модели OLSR находится в папке src/olsr/example под заголовком point-to-point-olsr.cc

На рисунке представлена схема реализации компонентов протокола, на которой указано где и какие функции, используемые протоколом OLSR (simple-point-to-point-olsr.cc), находятся.

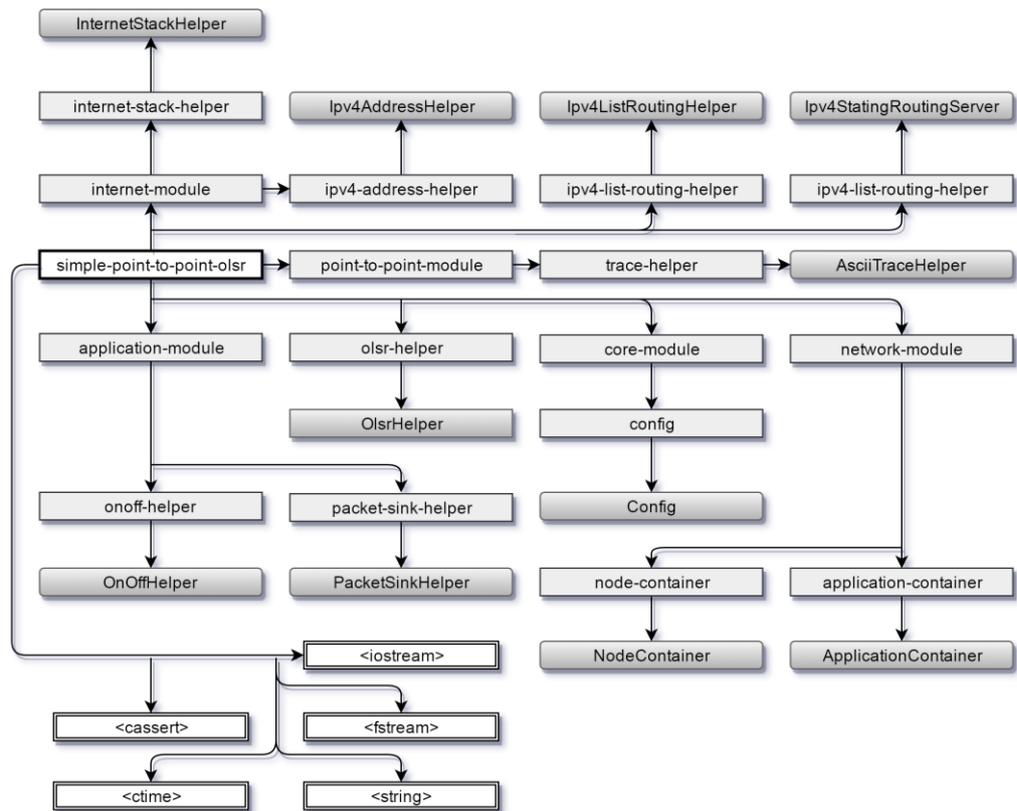


Рис. Схема реализации протокола OLSR в сетевом симуляторе NS3

Рассмотрим код протокола OLSR. В рассматриваемом нами файле simple-point-to-point-olsr.cc так же имеются краткие пояснения к исходному коду.

LogComponentEnable отвечает за вывод процесса исполнения протокола в КОНСОЛЬ.

Листинг 1.

```
#if 0
  LogComponentEnable ("SimpleGlobalRoutingExample",
LOG_LEVEL_INFO);
#endif
```

Настройка размера передаваемого пакета (**PacketSize**) и скорости передачи данных (**DataRate**) представлена в Листинге 2. Данные параметры оказывают существенное влияние на производительность сети в целом, поэтому, как правило, используются при моделировании в качестве входных.

Листинг 2.

```
Config::SetDefault ("ns3::OnOffApplication::PacketSize",
UIntegerValue (210));
Config::SetDefault ("ns3::OnOffApplication::DataRate",
StringValue ("448kb/s"));
```

Возможность ввода различных функций в терминале (**--run «название протокола» --«функция»**), здесь таковыми функциями являются **argc** и **argv**. (Более подробно функции рассмотрены в официальной документации [4]).

Листинг 3.

```
CommandLine cmd;  
cmd.Parse (argc, argv);
```

Листинг 4 демонстрирует подключение **NodeContainer**: функции, с помощью которой создаются и связываются друг с другом узлы. Количество узлов задано в качестве параметра функции **c.Create** и в рассматриваемом примере равно 6. Соединения узлов задаются путем установки несимметричных каналов между конкретными двумя узлами: **NodeContainer n** («узел №1»)(«узел №2») ... (**c.Get** («номер начального узла»), **c.Get** («номер конечного узла»)); если для какого-либо из узлов не будет указано соединение, то он просто не будет участвовать в моделировании сети.

Листинг 4.

```
NodeContainer c;  
c.Create (6);  
NodeContainer n02 = NodeContainer (c.Get (0), c.Get (2));  
NodeContainer n12 = NodeContainer (c.Get (1), c.Get (2));  
NodeContainer n32 = NodeContainer (c.Get (3), c.Get (2));  
NodeContainer n34 = NodeContainer (c.Get (3), c.Get (4));  
NodeContainer n54 = NodeContainer (c.Get (5), c.Get (4));
```

Подключение **OLSR**, **Stack** и **Ipv4** помощников маршрутизации. Через них можно вызывать различные функции и настройки протокола, более подробно описанные в документации к NS3 [4].

Листинг 5.

```
OlsrHelper olsr;  
Ipv4StaticRoutingHelper staticRouting;  
Ipv4ListRoutingHelper list;  
list.Add (staticRouting, 0);  
list.Add (olsr, 10);  
InternetStackHelper internet;  
internet.SetRoutingHelper (list);  
internet.SetRoutingHelper (list);  
internet.Install (c);
```

Подключение помощника **p2p** (peer-to-peer, однорагновая сеть) передачи данных. Создание каналов передачи данных между узлами, задача скорости передачи данных **p2p.SetDeviceAttribute ...** («скорость передачи данных»); а также задержки передачи данных **p2p.SetChannelAttribute ...** («задержка»); далее назначение данной характеристики узлам - **nd02 (n02)** и **nd12 (n12)**. Далее назначение другой скорости передачи данных и другой задержки для остальных узлов.

Листинг 6.

```
PointToPointHelper p2p;  
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("5Mbps"));
```

```

p2p.SetChannelAttribute ("Delay", StringValue ("2ms"));
NetDeviceContainer nd02 = p2p.Install (n02);
NetDeviceContainer nd12 = p2p.Install (n12);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("1500kbps"));
p2p.SetChannelAttribute ("Delay", StringValue ("10ms"));
NetDeviceContainer nd32 = p2p.Install (n32);
NetDeviceContainer nd34 = p2p.Install (n34);
NetDeviceContainer nd54 = p2p.Install (n54);

```

Подключение **Ipv4** адресного помощника, при помощи которого мы назначаем нашим узлам ip-адреса

Листинг 7.

```

Ipv4AddressHelper ipv4;
ipv4.SetBase ("10.1.1.0", "255.255.255.0");
Ipv4InterfaceContainer i02 = ipv4.Assign (nd02);
ipv4.SetBase ("10.1.2.0", "255.255.255.0");
Ipv4InterfaceContainer i12 = ipv4.Assign (nd12);
ipv4.SetBase ("10.1.3.0", "255.255.255.0");
Ipv4InterfaceContainer i32 = ipv4.Assign (nd32);
ipv4.SetBase ("10.1.4.0", "255.255.255.0");
Ipv4InterfaceContainer i34 = ipv4.Assign (nd34);
ipv4.SetBase ("10.1.5.0", "255.255.255.0");
Ipv4InterfaceContainer i54 = ipv4.Assign (nd54);

```

Подключение **OnOffHelper** - помощника, отвечающего непосредственно за передачу данных. Передача данных производится через **UDP** (англ. User Datagram Protocol - протокол пользовательских датаграмм). Здесь происходит создание приложения для отправки данных.

Кроме того, здесь же осуществляется подключение **PacketSinkHelper** - помощника, помогающего упростить процесс создания сети, используя **ApplicationContainer** - это приложение для приема данных. Параметр **DataRate**, представленный в примере выше это скорость передачи данных (**onoff.SetConstantRate (DataRate ("448kb/s"))**); **apps.Start (Seconds («время»))** и **apps.Stop (Seconds («время»))** – время между началом передачи (Start), и концом передачи данных (Stop). Если время начала – 1.1 секунда, а время остановки - 10 секунд, то время передачи будет составлять 8.9 секунд.

Листинг 8.

```

uint16_t port = 9;
OnOffHelper onoff ("ns3::UdpSocketFactory",
                  InetAddress (i34.GetAddress (1), port));
onoff.SetConstantRate (DataRate ("448kb/s"));
ApplicationContainer apps = onoff.Install (c.Get (0));
apps.Start (Seconds (1.0));
apps.Stop (Seconds (10.0));
PacketSinkHelper sink ("ns3::UdpSocketFactory",
                      InetAddress (Ipv4Address::GetAny (),
port));
apps = sink.Install (c.Get (3));
apps.Start (Seconds (1.0));
apps.Stop (Seconds (10.0));

```

В *Листинге 9* представлен процесс симуляции передачи данных между узлами, используя подключенные модули, представленные в *Листинге 8*.

Листинг 9.

```
onoff.SetAttribute ("Remote",  
                  AddressValue (InetSocketAddress (i12.GetAddress  
(0), port)));  
apps = onoff.Install (c.Get (3));  
apps.Start (Seconds (1.1));  
apps.Stop (Seconds (10.0));  
apps = sink.Install (c.Get (1));  
apps.Start (Seconds (1.1));  
apps.Stop (Seconds (10.0));
```

Подключение помощника, позволяющего создавать временные файлы, использующихся во время исполнения протокола.

Листинг 10.

```
AsciiTraceHelper ascii;  
p2p.EnableAsciiAll (ascii.CreateFileStream ("simple-point-to-point-  
olsr.tr"));  
p2p.EnablePcapAll ("simple-point-to-point-olsr");
```

Старт протокола.

Листинг 10.

```
Simulator::Run ();  
Simulator::Destroy ();
```

В представленном на листингах стандартном примере реализации кода OLSR топология является статичной, однако при моделировании реальных ситуаций зачастую возникает необходимость воссоздания условий перемещения.

Для реализации динамической топологии сети необходимо изменить структуру связи узлов — реализовать функции поиска других узлов передачи данных, если предыдущий оказался недоступен. Кроме того, необходимо создание различного рода сценариев: отключение одного из узлов, подключение новых узлов, т.к. в текущей реализации протокола топология является статичной.

Заключение

Сфера применения многошаговых беспроводных сетей достаточно широка. Такие сети, особенно класса MANET, полезны при поисково-спасательных операциях, во время военных действий, в местах большого скопления людей (например, для обслуживания участников конференций, выставок, форумов и т. д.), и там, где нет телекоммуникационной инфраструктуры (например, в экспедициях в удаленные регионы). Протоколы маршрутизации демонстрируют различные характеристики производительности в зависимости от условий функционирования сети. Именно поэтому, для выбора адекватных планируемыми условиям эксплуатации решений, целесообразно применять имитационное моделирование. Сетевой

симулятор NS3 постоянно поддерживается как разработчиками, так и обычными пользователями: создаются программные реализации новых протоколов, совершенствуются существующие. В дальнейшем, на основе выявленных в данной работе особенностей программной реализации протокола маршрутизации OLSR, планируется создание имитационных моделей, предназначенных для тестирования предложенных авторами разработок, в частности, метрики маршрутизации.

Литература

1. Павлов, А.А., Датьев, И.О. Протоколы маршрутизации в беспроводных сетях / Павлов А.А., Датьев И.О. // Труды Кольского научного центра. Информационные технологии. –Вып. 5. -5/2014(24). –Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2014. –С.64-75.
2. Optimized Link State Routing Protocol for Ad Hoc Networks // Т. Clausen и др. // Project Hipercom, INRIA, BP 105, 78153 Le Chesnay Cedex, France. – Режим доступа: <http://web.stanford.edu/class/cs344e/papers/olsr.pdf> (15.10.2016)
3. OLSR. Материал из Википедии - свободной энциклопедии. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/OLSR> (11.04.2016).
4. A Discrete-Event Network Simulator NS3. – Режим доступа: <https://www.nsnam.org/> (15.10.2016).
5. Сафонов, А.С., Хоров, Е.М., Красилов, А.Н. Анализ эффективности протоколов OLSR в канале 5МГц / Сафонов А.С., Хоров Е.М., Красилов А.Н. – Режим доступа: <http://itas2010.iitp.ru/pdf/1569319241.pdf>
6. Марандин, Д.А. Открытые проблемы по беспроводным сенсорным технологиям / Марандин Д.А. // Электросвязь. - №1, 2009. –С.1-2.
7. Optimized Link State Routing Protocol, RFC 3626. October 2003. – Режим доступа: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt> (15.10.2016).
8. Павлов, А.А., Датьев, И.О., Шишаев, М.Г. Моделирование беспроводных многошаговых самоорганизующихся мобильных сетей / Павлов А.А., Датьев И.О., Шишаев М.Г. // Труды Кольского научного центра. Информационные технологии. –Вып. 6. -3/2015(29). –Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2015. –С.137-150.

Сведения об авторах

Диковицкий Вадим Витальевич – техник,
e-mail: vadikovitsky@gmail.com
Vadim V. Dikovitsky – technician

Датьев 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

А.А. Павлов¹, И.О. Датьев^{1,2}

¹Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

² ФГБОУ ВО «Мурманский арктический государственный университет»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ МНОГОШАГОВЫХ СЕТЕЙ

Аннотация

В статье представлены разработанные модели, предназначенные для проведения исследований, в которых рассматривалось влияние различных параметров на качество передачи данных в беспроводных многошаговых сетях. На основе результатов проведенных имитационных экспериментов сделаны выводы о необходимости учета определенных параметров при разработке метрик и протоколов маршрутизации.

Ключевые слова:

беспроводные многошаговые сети, имитационное моделирование, протоколы маршрутизации, NS-3.

A.A. Pavlov, I.O. Datyev

RESEARCH OF INFLUENCE THE DIFFERENT PARAMETERS ON CHARACTERISTICS DATA COMMUNICATION OF WIRELESS MULTIHOP NETWORKS

Abstract

The article presents the simulation models developed for research the various factors influence on multihop wireless networks data transmission. Based on the results of simulation experiments the authors have been made conclusions about the necessity of taking into account certain factors during the development of the metrics and routing protocols.

Keywords:

multihop wireless networks, simulation, routing protocols, NS-3.

Введение

В настоящее время беспроводные многошаговые сети являются объектом исследования ученых всего мира и актуальным средством решения задач передачи информации в регионах с неразвитой информационно-коммуникационной инфраструктурой (что, например, характерно для Арктических районов). Наиболее известными видами беспроводных многошаговых сетей являются следующие: MANET [1] – децентрализованные самоорганизующиеся сети, состоящие из мобильных устройств; MESH [2] – это распределенная, одноранговая, ячеистая сеть; LLN [11] – класс сети, в которой на узлы сети наложены некоторые ограничения (память, вычислительная мощность, заряд батареи); VANET [12] – автомобильные беспроводные самоорганизующиеся сети предназначены для повышения эффективности и безопасности дорожного движения; FANET [3] – т.н. «летающие» беспроводные самоорганизующиеся сети, узлами которых, как правило, являются беспилотные летательные аппараты.

Примерами конкретных ситуаций развертывания многошаговых беспроводных сетей могут служить: различного рода экспедиции (разведывательные, экспериментальные, исследовательские), военные и спасательные операции с применением различной техники (роботы, дроны), организация связи на закрытых горных выработках.

На данный момент сети типа MANET обладают рядом общепринятых недостатков, которые мешают их широкому применению:

- проведение реального тестирования поведения сети большого размера, вследствие ее нераспространённости;
- ограниченность ресурса источника питания мобильных узлов;
- сложность маршрутизации данных, вследствие постоянного изменения топологии;
- сложность связи устройств, посредством существующих стандартов Wi-Fi.

Группы ученых всего мира занимаются решением вышеперечисленных проблем. Но существует проблема, которой на сегодняшний день не уделяется достаточное внимание: влияние различных параметров (размер пакета, мощность сигнала, скорость сигнала и других), представленных в данной статье, на качество передачи данных в беспроводных многошаговых сетях. Целью данной работы являлось исследование влияния выбранных параметров на качество передаваемых данных посредством разработки и применения имитационных моделей.

Протоколы маршрутизации данных

В беспроводных сетях используются протоколы маршрутизации, которые по принципу работы можно разделить на [4]:

1. Проактивные или табличные (англ. proactive, table-driven). Периодически рассылают по сети служебные сообщения с информацией обо всех изменениях в ее топологии. Каждый узел строит таблицу маршрутизации, откуда при необходимости передачи сообщения какому-либо узлу считывается маршрут к этому адресату.

2. Реактивные или работающие по запросу (англ. reactive, on-demand). Составляют маршруты до конкретных узлов лишь при возникновении необходимости в передаче им информации. Для этого узел-отправитель широковещательно рассылает по сети сообщение-запрос, которое должно дойти до узла-адресата.

3. Гибридные (англ. hybrid). Данные протоколы комбинируют механизмы проактивных и реактивных протоколов. Как правило, они разбивают сеть на множество подсетей, внутри которых функционирует проактивный протокол, а взаимодействие между ними осуществляется реактивными методами.

DSDV [13] - основан на идее классического алгоритма маршрутизации Беллмана-Форда с некоторыми улучшениями. *DSDV* проактивный, дистанционно векторный алгоритм. Каждый узел поддерживает таблицу маршрутизации, в котором перечислены все доступные направления, количество маршрутизаторов («прыжков») до конечного пункта и номер версии. Узлы периодически передают свои таблицы маршрутизации ближайшим соседям.

Узел также передает свою таблицу маршрутизации, если в ней произошло изменение с момента последнего отправленного обновления. Основная задача алгоритма в том, чтобы исключить возможность создания циклических маршрутов. Для минимизации объема трафика, протокол предусматривает обмен полными таблицами маршрутизации только при серьезных изменениях в топологии сети. В большинстве случаев отправляются более мелкие дополнительные обновления.

AODV [14] - Протокол *AODV* (Ad hoc On-Demand Distance Vector) использует критерий формирования и поддержки маршрута по требованию аналогично протоколу *DSR*, а также механизм пошаговой маршрутизации и периодической рассылки широковещательных посылок-запросов как у *DSDV*. Узел-источник перед отправкой информационного пакета узлу-получателю проверяет свои таблицы маршрутизации на наличие установленного маршрута до адресата и при его отсутствии рассылает всем узлам в зоне вещания пакет для установления маршрута (route request – RREQ). При этом *AODV* минимизирует число необходимых передач путем формирования маршрута на основе опроса, в отличие от поддержания полного списка маршрутов, как в алгоритме *DSDV*. Однако в *AODV* в начале коммутации требуется больше времени на установку маршрута, чем во многих других протоколах.

OLSR [15] - Протокол *OLSR* (Optimized Link-State Routing) обеспечивает уменьшение общей загрузки сети путём минимизации количества ретрансляций в сети за счёт механизма формирования набора многоточечных узлов-ретрансляторов, охватывающих как минимум 2 узла принадлежащих маршруту. Соединения между ними определяются с помощью периодической рассылки HELLO-пакетов, содержащих информацию об всех соседних узлах, а также состояние их связей. Маршрут представляет собой последовательность хопов до места назначения через многоточечные ретрансляции в сети, при этом источник имеет информацию только о следующем шаге пересылки сообщения.

Модели для тестирования влияния параметров на качество связи в сетях класса MANET

Моделирование проводилось в среде NS-3 [5]. В качестве базового протокола был выбран протокол *OLSR*. Цель работы заключается в выявлении тех параметров, которые могут оказывать значительное влияние на качество беспроводной связи по технологии MANET.

Эксперименты проводились в одинаковых условиях с изменением следующих параметров: размер пакета, мощность сигнала, скорость узлов, количество корреспондирующих пар.

Выбранные параметры редко встречаются в научных работах в качестве величин, оказывающих существенное влияние на качество передачи данных в многошаговых беспроводных сетях. В основном работы ученых направлены на создание универсальных и эффективных протоколов маршрутизации [5-10].

Полученную информацию можно применить при создании или улучшении существующих протоколов и метрик маршрутизации. В качестве результирующих характеристик, на которые влияют исходные параметры, были выбраны: средняя задержка и коэффициент потерь пакетов.

Параметры модели

Модель	Случайная, линия, матрица
Мощность сигнала	5-30 dB
Количество узлов	15-40
Скорость узлов	2 – 15 m\с
Размер пакетов	64, 256, 512, 1024, 2000
Битрейт	5000-2000000 bps
Стандарт Wi-Fi	802.11b, 802.11n
Размеры территорий	1500x1500 m
Количество передающих пар узлов	1-7
Модуляция	DsssRate1 1mbps
Модель распространения сигнала	FriisPropagationLossModel
Модель задержки сигнала	ConstantSpeedPropagationDelayModel, RandomSpeedPropagationDelayModel

Модель, использующая случайное перемещение узлов

Для тестирования влияния различных параметров на качество связи авторами была разработана имитационная модель, реализующая случайное движение узлов сети. Все узлы сети ad-hoc использовали одинаковый протокол динамической маршрутизации и располагались случайным образом на площадке 1,5 км². Кроме этого, каждый узел перемещался в произвольном направлении. Обязательным условием было использование одинаковых координат и векторов перемещения для разных экспериментов при моделировании рассматриваемой сети и одних пар узлов.

Таблица 2

Изменение размера пакетов

Размер пакета (bytes)	Средняя задержка (ms)	Коеф-т потерь (%)
64	1247.8	22.2336
256	675.3	5.69019000
1024	732.299	43.956
2000	889.186	62.3656

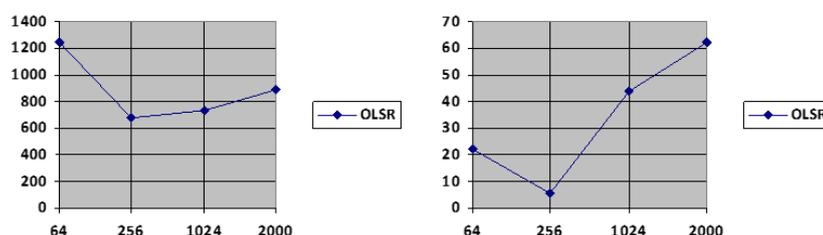


Рис. 1. Графики зависимости средней задержки (слева) и количества потерянных данных (справа) от размера пакета

На основе результатов эксперимента можно сделать вывод, что наилучшие характеристики производительности достигаются при средних значениях размеров пакетов. При малом размере передаваемых пакетов возрастает как само количество пакетов, так и объемы служебного трафика. Частая смена маршрута происходит за счет того, что узлы находятся в движении (скорость узлов 27 км/ч). Поэтому большое число пакетов приходится отсылать разными маршрутами, что создает большую нагрузку на сеть. При большой величине пакета требуется большее время на его передачу и прием, что влечет снижение производительности сети в условиях постоянного перемещения узлов. Поэтому, для различных скоростей перемещения узлов необходимо учитывать, и, по возможности, устанавливать размер пакета в наибольшей степени соответствующий другим параметрам сети.

Таблица 3

Изменение скорости узлов

Скорость узлов (m/s)	Средняя задержка (ms)	Коэф-т потерь (%)
1,8	1123.08	19.0672
2.7	921.419	13.1687
7,5	675.3	5,69019000
15	746.06	42.524

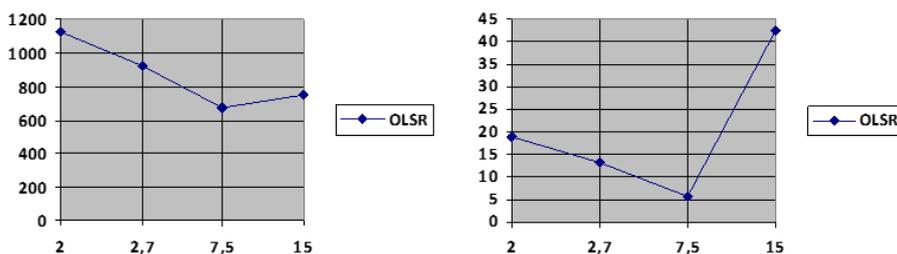


Рис. 2. Графики зависимости средней задержки (слева) и количества потерянных данных (справа) от скорости движения узлов

Во время экспериментов при низких или слишком высоких скоростях перемещения узлов протокол OLSR показывает наихудшие результаты. Плохие результаты OLSR конкретно в этой серии экспериментов при низких скоростях перемещения узлов объясняются нарушением связности сети, вследствие небольшого количества узлов, размещенных на территории достаточно большой площади (1,5 x 1,5 км) и малой мощностью передатчиков этих узлов. По результатам экспериментов, наилучший показатель обеспечивается на скорости 7.5 м/с (27км/ч).

Таблица 4

Влияние мощности сигнала передатчика на задержку и потери данных

Мощность сигнала (dB)	Средняя задержка (ms)	Кэф-т потерь (%)
5	2531.06	90.2606
6	2282.08	66.941
10	675.3	5,69019000
20	146.566	0

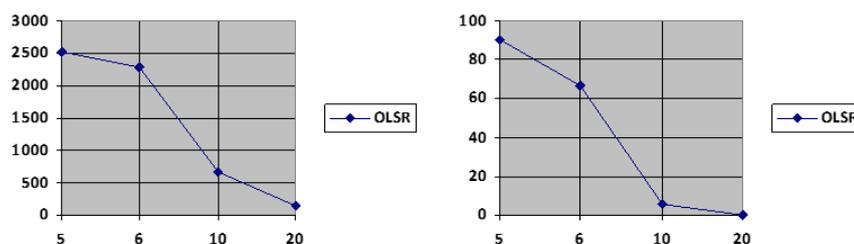


Рис. 3. Графики зависимости средней задержки (слева) и количества потерянных данных (справа) от мощности сигнала

Мощность сигнала передатчика оказывает одно из самых больших влияний на результаты моделирования из всех проведенных экспериментов. За счет усиления сигнала значительно сокращается количество шагов, которые должны пройти данные до адресата. В среднем от 6-9 шагов до 1-2. Это сильно разгружает устройства и позволяет быстрее и качественнее передавать данные. При увеличении значения мощности до 20 dB такая сеть может быть использована для передачи данных без каких-либо серьезных задержек или помех.

Таблица 5

Изменение количества пар передающих узлов

Количество пар	Средняя задержка (ms)	Кэф-т потерь (%)
1	633.467	11.206
2	683.1	8.39419
3	710.031	21.97925

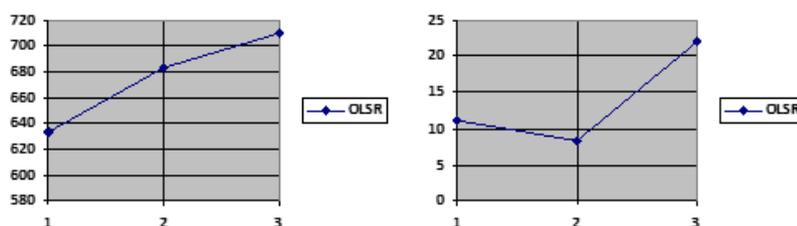


Рис. 4. Графики зависимости средней задержки (слева) и количества потерянных данных (справа) от количества передающих пар узлов

Увеличение количества передающих пар так же оказывает существенное влияние на значения выходных параметров. В большей степени это обусловлено ограничениями физического, канального уровней, в частности, методов доступа к среде передачи.

Модель «Матрица»

Для дальнейших исследований разработана модель, реализующая топологию «матрица». В этой модели узлы сети размещаются подобно элементам матрицы на расстоянии 200 метров друг от друга (как по горизонтали, так и по вертикали). При такой топологии, каждый узел имеет не более восьми связей на пересечении секторов. Данная топология позволяет получать большое количество различных маршрутов между корреспондирующими парами. Источник информации размещается на правой нижней вершине полученной «матрицы», а приемник – в верхней левой. Данный подход позволяет получить максимальное число маршрутов между корреспондирующей парой, а также наибольшее количество транзитных узлов в рассматриваемой топологии.

Таблица 6

Влияние мощности сигнала на задержку и потери данных

Мощность сигнала (dBm)		Средняя задержка (ms)	Потери (%)		Средняя задержка (ms)	Потери (%)		Средняя задержка (ms)	Потери (%)
6	Olsr	0,430404	0	Aodv	0,442038	0,03052	Dsdv	3,54894	0
7,5	Olsr	0,433148	0	Aodv	0,481576	0,03434	Dsdv	4,71028	0
20	Olsr	0,430313	0	Aodv	0,430192	0	Dsdv	2,10556	0

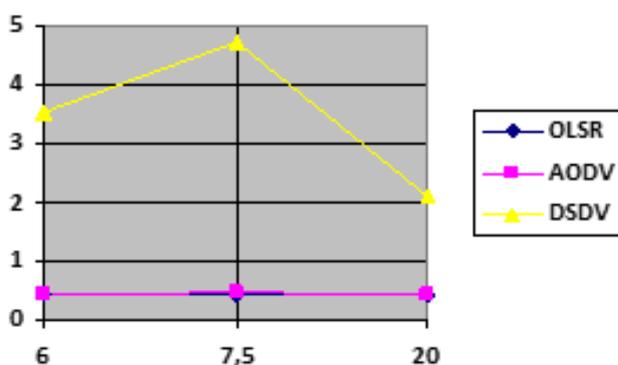


Рис. 5. График зависимости средней задержки от мощности сигнала

В данном примере при изменении мощности сигнала разница в изменении выходных показателей будет являться несущественной. Но можно заметить, что результаты всё же улучшаются с увеличением мощности. Наилучший результат демонстрирует протокол DSDV.

Таблица 7

Влияние размера пакета на задержку и потери данных

Размер пакета (bytes)		Средняя задержка (ms)	Потери (%)		Средняя задержка (ms)	Потери (%)		Средняя задержка (ms)	Потери (%)
128	Olsr	2,90626	0,003825	Aodv	3,61412	0,0362	Dsdv	16,1644	0,003815
1256	Olsr	0,430404	0	Aodv	0,442038	0,0305	Dsdv	3,54894	0
512	Olsr	0,616321	0	Aodv	0,621865	0,0229	Dsdv	2,3879	0

Изменение значения размера пакета оказывало наибольшее влияние на результат моделирования в топологии матрица. Как можно заметить, наилучшие показатели достигаются при значениях 256 и 512 байт. Среди тестируемых протоколов OLSR показывает наилучший результат, что обусловлено статичностью узлов (которая избавляет от необходимости постоянного поддержания таблиц маршрутизации).

Модель «Линия»

Модель «линия» была разработана авторами для оценки эффективности функционирования протоколов динамической маршрутизации при больших длинах маршрутов. Все узлы размещены в одну линию на расстоянии 200 метров друг от друга. Данные передаются между двумя крайними узлами линии (узлами, находящимися на максимальном расстоянии друг от друга).

Таблица 8

Влияние размера пакета на задержку и потери данных

Размер пакета (bytes)		Средняя задержка (ms)	Потери (%)		Средняя задержка (ms)	Потери (%)		Средняя задержка (ms)	Потери (%)
64	Olsr	1082,29	87,7594	Aodv	2018,29	84,7235	Dsdv	430,209	92,5979
128	Olsr	789,501	83,933	Aodv	1654,23	80,2428	Dsdv	1393,04	83,2633
256	Olsr	1240,13	72,7729	Aodv	1907,11	51,1269	Dsdv	1486,6	70,5954
512	Olsr	1304,01	58,373	Aodv	1261,8	54,4967	Dsdv	429,2	86,8823

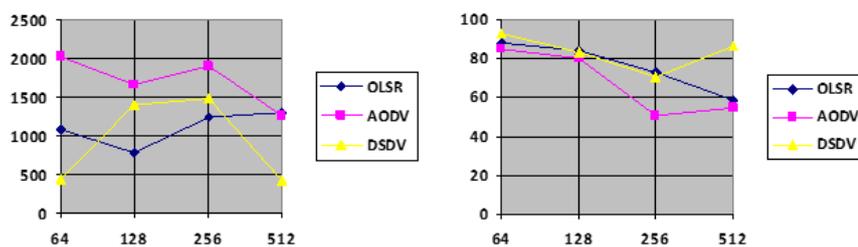


Рис. 6. Графики зависимости средней задержки (слева) и количества потерянных данных (справа) от размера пакета

Можно заметить, что на примере топологии «линия» в экспериментах протокол OLSR показывает наибольшую эффективность с размером пакета 512 байт, в то время как остальные протоколы лучше всего «справляются» с пакетами размером 256 байт.

Так как в прошлом эксперименте (случайное перемещение узлов) лучшие показатели протокола OLSR были получены при значении 256 байт, то можно сделать вывод, что результат будет меняться в зависимости от топологии и мобильности узлов.

Таблица 9

Влияние мощности сигнала на задержку и потери данных

Мощность сигнала (dBm)		Средняя задержка (ms)	Потери (%)		Средняя задержка (ms)	Потери (%)		Средняя задержка (ms)	Потери (%)
6	Olsr	1240,13	72,7729	Aodv	1907,11	51,1269	Dsdv	1486,6	70,5954
7,5	Olsr	1741,23	78,6958	Aodv	NaN	100	Dsdv	1654,43	99,9727
10	Olsr	942,713	65,1891	Aodv	1003,84	76,7008	Dsdv	1003,7	58,0506
20	Olsr	360,461	57,7839	Aodv	95,2154	37,7209	Dsdv	185,138	36,3991

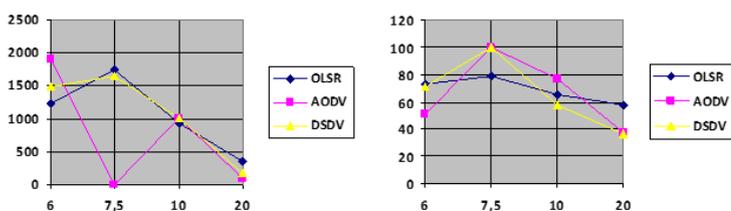


Рис. 7. Графики зависимости средней задержки (слева) и количества потерянных данных (справа) от мощности сигнала

Изменяя мощность передачи сигнала можно заметить, что протоколы демонстрируют совершенно разные результаты. С увеличением мощности сигнала показатели начинают улучшаться, но как можно заметить, не так сильно, как в предыдущем аналогичном эксперименте. А это значит, что для данной топологии мощность сигнала является не такой существенной. Из этого снова можно сделать вывод, что различные параметры по-разному влияют на качество передачи данных при различных условиях.

Таблица 10

Влияние количества узлов в линии на задержку и потери данных

Кол-во узлов		Средняя задержка (ms)	Потери (%)		Средняя задержка (ms)	Потери (%)		Средняя задержка (ms)	Потери (%)
5	Olsr	414,587	41,8358	Aodv	536,411	32,4864	Dsdv	375,215	38,4367
10	Olsr	859,343	65,751	Aodv	1274,99	50,9075	Dsdv	836,049	74,3294
15	Olsr	1240,13	72,7729	Aodv	1907,11	51,1269	Dsdv	1486,6	70,5954
20	Olsr	1252,93	77,5939	Aodv	2173,99	53,9485	Dsdv	1582,97	68,8103
25	Olsr	442,216	87,047	Aodv	2426,56	71,2113	Dsdv	466,861	87,5167
30	Olsr	455,434	87,3043	Aodv	2267,68	66,3813	Dsdv	1991,29	75,9891

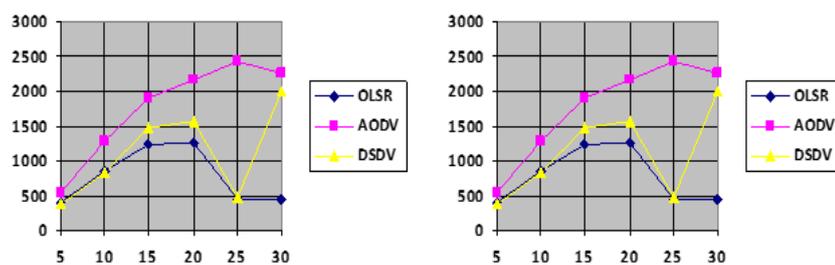


Рис. 8. Графики зависимости средней задержки (слева) и количества потерянных данных (справа) от количества узлов

При увеличении количества узлов в линии все протоколы начинают терять большое количество пакетов, но в двух последних экспериментах у протокола OLSR задержка сокращается. Это связано с тем, что изначально протокол долго устанавливает соединения до адресата и пакеты не успевают «добраться» за отведенное время, вследствие чего помечаются как полностью потерянные.

Заключение

В данной работе были созданы модели для тестирования различных параметров и проведены исследования, показывающие влияние «второстепенных» параметров на качество передачи данных в сетях MANET.

В результате экспериментов было установлено, что такие параметры как размер пакета, мощность сигнала, скорость узлов имеют не меньшее влияние на качество передачи данных, чем количество узлов или выбранный протокол маршрутизации. Немаловажным остается и то, что результаты могут меняться в зависимости от комбинаций значений различных факторов, например, расположение и количество узлов. Стоит отметить, что факторы могут влиять и друг на друга. Например, значения, полученные в ряде экспериментов с изменением размера пакета данных, могут отличаться если провести те же эксперименты, но с другим показателем мощности сигнала или скорости узлов.

Все это значит, что при разработке протоколов или метрик маршрутизации не стоит пренебрегать этими параметрами и учитывать их влияние в планируемых условиях функционирования сети.

Литература

1. Bhushan, S., Saroliya, A., Singh, V. Implementation and Evaluation of Wireless Mesh Networks on MANET Routing Protocols // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. -2013. -№ 6. -P.2477-2484.
2. Mesh Networks. - Режим доступа: <http://www.meshnetworks.com/>
3. Md. Hasan Tareque, Md. Shohrab Hossain. On the Routing in Flying Ad hoc Networks // Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems. - 2015. - №5. -P.1-9.
4. Павлов, А.А., Датъев, И.О. Протоколы маршрутизации в беспроводных сетях / А.А. Павлов, И.О. Датъев // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. –Вып.5. - 5/2014(24). -Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2014. - С.64-75.

5. Manoj Tolani, Rajan Mishra. Effect of Packet Size on Various MANET Routing Protocols / Manoj Tolani, Rajan Mishra // International Journal of Applied Information Systems (IJAIS). - 2012 - C.10-13.
6. Deepika, Pankaj Kumar Verma, Vijay Kumar Impact of Packet Size and Number of Nodes on DSR and AODV Routing Protocols in MANET / Deepika, Pankaj Kumar Verma, Vijay Kumar // International Journal of Computing and Technology. - 2014 - P.66-72.
7. Imad, I. Saada, Majdi, Z. Rashad, Mohamed A. Abu ElSoud. The Effect of Changing the Speed and the Number of Nodes on Packet Delivery Ratio in MANET / Imad I. Saada, Majdi Z. Rashad, Mohamed A. Abu ElSoud // International Journal of Computer Science. - 2013 - C.200-202.
8. Impact of Node Mobility on MANET Routing Protocols Models / ABhavyesh Divecha and others // Journal of Digital Information Management. -2007. –C.19-24.
9. Yasser, Kamal Hassan, Mohamed, Hashim Abd El-Aziz, Ahmed, Safwat Abd El-Radi / Performance Evaluation of Mobility Speed over MANET Routing Protocols // Yasser Kamal Hassan, Mohamed Hashim Abd El-Aziz, Ahmed Safwat Abd El-Radi // International Journal of Network Security. – 2010. - P.128–138.
10. Gnanamanoharan, E., Bensraj, R. Impact of Variable Bit Rate and Packet Size on the Performance Evaluation of Neighbor Aware AODV and DSDV Routing Protocols for MANET's / E. Gnanamanoharan, R. Bensraj // International Journal of Computer Applications. – 2014. - P.43–47.
11. Routing Over Low power and Lossy networks. – Режим доступа: <https://datatracker.ietf.org/wg/roll/charter/>
12. Vehicular ad hoc networks (VANETS): status, results, and challenges / Sherali Zeadally and others // Telecommunication Systems. – 2010. - P.217–241.
13. Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers / Charles E. Perkins and others // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. - 1994. -P. 234-244.
14. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. – Режим доступа: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>
15. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). – Режим доступа: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>

Сведения об авторах

Павлов Алексей Андреевич - инженер-исследователь, аспирант,
e-mail: pavlov@iimm.ru
Aleksey A. Pavlov - research engineer, postgraduate

Датъев Игорь Олегович – к.т.н., научный сотрудник,
e-mail: datyev@iimm.ru
Igor O. Datyev - Ph.D., researcher associate

УДК 519.688:549

Д.Г. Степенщиков, А.В. Чернявский

Геологический институт Кольского НЦ РАН

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МИНЕРАЛОВ ПО СПЕКТРАМ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

Аннотация

В статье рассматривается программное приложение для работы с данными по рамановской спектроскопии, позволяющее проводить первичную диагностику минералов с привлечением открытой базы данных RRUFF. Программа была апробирована в Геологическом институте КНЦ РАН и позволила повысить эффективность работы при анализе экспериментальных рамановских спектров минералов.

Ключевые слова:

программный комплекс, рамановская спектроскопия, спектр комбинационного рассеяния, диагностика минералов.

D.G. Stepenshchikov, A.V. Chernyavsky

AN APPLICATION SOFTWARE FOR RAMAN DIAGNOSTICS OF MINERALS

Abstract

In this paper an application software for primary Raman diagnostics of minerals involving open database RRUFF is discussed. The program was approved at the Geological Institute KSC RAS and has improved analysis of the experimental Raman spectra of minerals.

Key words:

application software, Raman spectroscopy, mineral diagnostics.

Введение

Открытие новых минеральных видов – важнейшая задача минералогии. Диагностика минералов, как правило, осуществляется с помощью рентгенофазового и локального рентгеноспектрального анализов. Однако при работе с минеральными фазами микронных размеров рентгенофазовый анализ невозможен, а рентгеноспектральный локальный метод позволяет получить только оценочные данные химического состава. Однозначная диагностика таких минеральных индивидов требует сведения об их кристаллической структуре. Именно для решения этой проблемы применяется метод рамановской спектроскопии (спектроскопия комбинационного рассеяния света).

Рамановская спектроскопия со времен открытия явления в конце 1920-х годов тесно вошла в арсенал физиков и химиков. Уникальность рамановского спектра (КР спектр) для каждого минерального вида позволяет получить надежную информацию для индивидов микронных размеров и разного агрегатного состояния. Такой подход в диагностической минералогии очень продуктивен, в частности, для тонкозернистых агрегатов рудных минералов. Применение рамановской спектроскопии привело к открытию новых минеральных видов, обнаруженных в виде тонких минеральных включений – кокчетавита и камдыкулита (полиморфные модификации микролина и альбита,

соответственно). Не отрицая значения, прежде всего, локального рентгено-спектрального анализа, следует подчеркнуть и высокую степень экспрессности получения КР спектров.

Диагностика минералов существенно облегчается благодаря наличию в Интернете электронных баз рамановских спектров. Наиболее обширной является база данных интернет-проекта RRUFF [1]. Также имеются и литературные справочные источники, например [2-4].

Работа с рамановскими спектрами (документация, сравнение экспериментальных данных со справочными и т.п.) на современном уровне требует наличия соответствующих программных средств. К их числу можно отнести как встроенный апплет уже упомянутого интернет-проекта RRUFF, так и отдельно распространяемые приложения, например, Spekwin32. Однако на уровне конечного потребителя неизбежно возникают индивидуальные пожелания к интерфейсу и набору необходимых операций используемого программного продукта, поэтому для сотрудников Геологического института Кольского НЦ РАН был разработан собственный программный комплекс, решающий необходимые задачи и обеспечивающий эффективный процесс применения рамановской спектроскопии.

Структура комплекса и описание основных функций

Программный комплекс представляет собой приложение, реализованное в открытой среде разработки программного обеспечения на языке Object Pascal для компилятора Free Pascal (FPC) Lazarus версии 1.1.4. Данная IDE обладает, двумя преимуществами: во-первых, она свободно распространяема, а во-вторых, позволяет легко создавать удобный интерфейс для конечного пользователя. Общий вид интерфейса приложения показан на рис. 1.

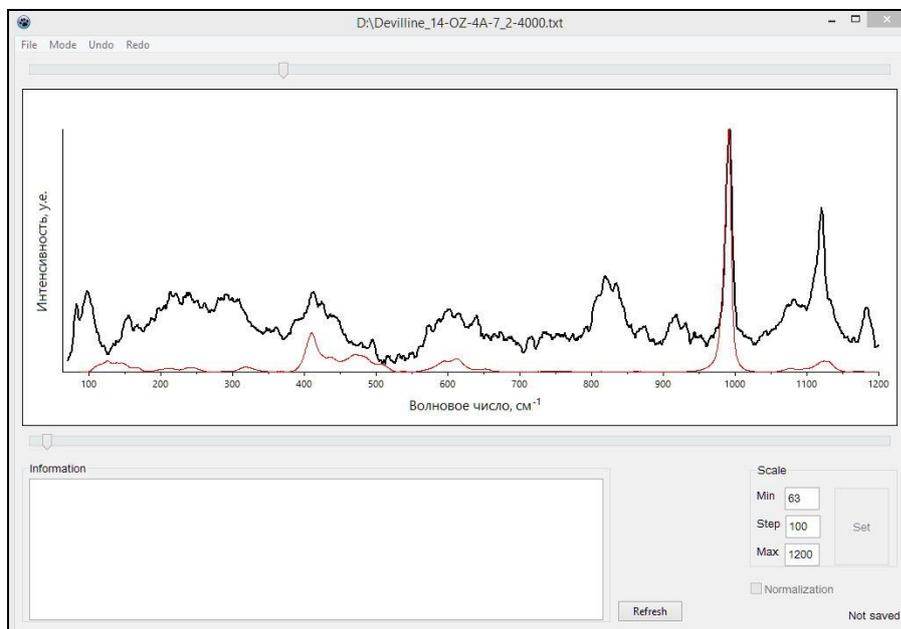


Рис. 1. Интерфейс приложения

Задача комплекса – работа с массивом данных, представляющих собой текстовые файлы с записанными в них параметрами экспериментальных спектров, а именно, отображение этих спектров, обработка и сравнение между собой с привлечением данных по химическому составу. Рассмотрим эти функции подробно.

1. Графическое отображение данных

Основное требование заключалось в соблюдении геометрических параметров области графика – аналогичное отображению в проекте RRUFF, так как графические данные соответствующей базы уже использовались заказчиком, и его собственные экспериментальные результаты не должны были отличаться по формату. Для анализа мелких деталей спектра, а также выделения его диапазонов, масштабирование графика было реализовано дублирующими друг друга способами: заданием крайних значений диапазона и двумя взаимосвязанными ползунками.

2. Обработка данных

Экспериментальные спектры обладают рядом недостатков, в частности, зашумлением посторонними сигналами малой амплитуды и искажением вследствие люминесценции образца. Для соответствующей обработки были реализованы процедуры сглаживания и приведения к базовой линии. Сглаживание графика осуществляется по методу скользящего среднего с возможностью выбора периода сглаживания, а приведение к базовой линии – с помощью сплайнов третьего порядка. Приложение позволяет также удалять ненужные участки спектра, содержащие, например, недиагностические пики.

Основная процедура обработки – выявление диагностических пиков спектра реализована в ручном и автоматическом режиме. Автоматический режим существенно ускоряет работу, требуя введения всего двух параметров: высоты пика h , и его глубины d . Первый параметр позволяет учитывать только те пики (локальные максимумы), чья высота не ниже h , а второй параметр отбрасывает пики, у которых хотя бы одна разница высот между его вершиной и соседними локальными минимумами меньше d (рис. 2). Ручной режим предназначен для корректировки получаемых результатов.

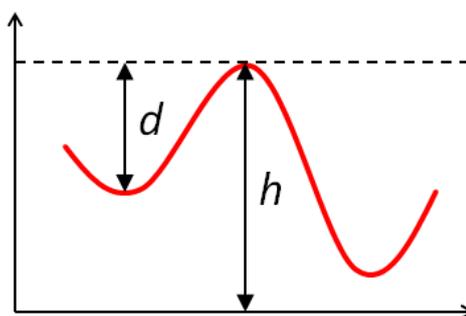


Рис. 2. Высота h и глубина d , используемые при автоматическом определении пика

3. Анализ данных

Главная задача приложения – диагностика минералов, заключающаяся в сравнении экспериментального спектра со спектрами из базы данных с возможностью привлечения информации по химическому составу минерала. В результате анализа выдается некоторый список эталонных записей из базы данных, совпадающих с анализируемым спектром с учетом выставленных настроек. Настройки диагностики включают в себя параметр сглаживания спектров, высоту и глубину автоматически выявляемых пиков, а также параметры чувствительности s и различия r – допустимые расстояния по осям Ox и Oy , при которых пики анализируемого и эталонного спектра принимаются за совпадающие (рис. 3). Учет данных по химическому составу осуществляется фильтрацией: в диагностику включаются только те эталонные записи, в которых присутствуют все выбранные химические элементы.

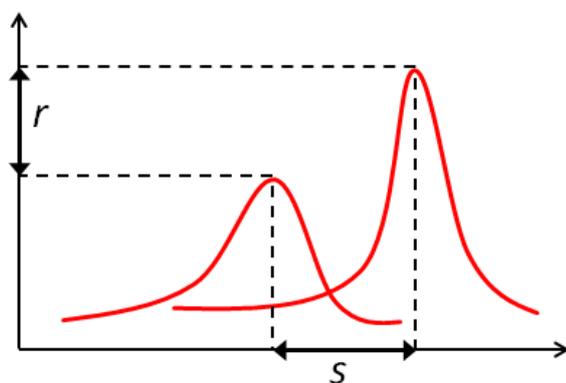


Рис. 3. Параметры чувствительности s и различия r , используемые при сравнении пиков

Каждая эталонная запись в полученном итоговом списке сопровождается числом p , показывающим процент совпадения. Оно рассчитывается по формуле:

$$p = \frac{2c}{a_1 + a_2} \cdot 100\%,$$

где a_1 и a_2 – полное число пиков, c – число общих пиков анализируемого и эталонного спектров. Например, если в первом и втором спектре число пиков равно 4 и 6 соответственно, и спектры совпадают по трем пикам, получим $p = 60\%$. Настройки диагностики позволяют отсекаать эталонные записи, процент совпадения которых ниже заданного порогового значения.

Общий алгоритм работы диагностики следующий: анализируемый спектр, согласно настройкам, сглаживается, и на нем выставляются пики. Из списка базы данных последовательно выбираются эталонные записи, и с ними прodelывается та же процедура. Записи при этом должны соответствовать установленной фильтрации на химический состав, т.е. содержать все, отмеченные в фильтре химические элементы. Затем производится подсчет (согласно тем же настройкам) совпадающих пиков у анализируемого и

эталонного спектров и вычисляется параметр p . Если он не меньше установленного порогового значения, то эталонная запись добавляется в результирующий список, который в конце упорядочивается по убыванию.

Также предусмотрена процедура сохранения изображения графика спектра и данных по выявлению диагностических пиков.

Апробация программного комплекса

Полученное приложение было использовано сотрудниками Геологического института Кольского НЦ РАН, в частности, для исследования сульфидов и сульфосолей, сульфатов и теллуридов из месторождений и рудопроявлений Кольского региона. Диагностика минералов по рамановским спектрам осуществлялась путем их сравнения с имеющимися эталонными спектрами базы RRUFF. В результате был установлен ряд минералов, новых для Кольского региона и России [5].

На рис. 4 показан пример диагностики минерала, определяемого по максимальному проценту соответствия рамановских спектров (57%) как девиллин. Соответствующие экспериментальный (черное) и эталонный (серое) спектры показаны на рис. 1.

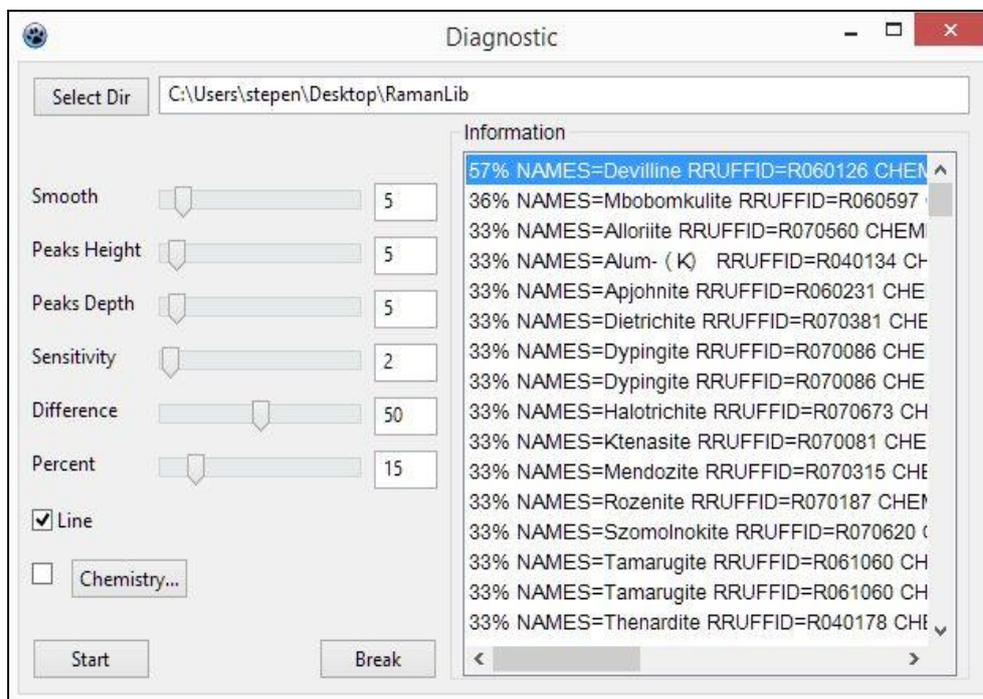


Рис. 4. Окно диагностики с примером результата

Заключение

Программный комплекс для диагностики минералов по комбинационным спектрам рассеяния с привлечением данных открытой базы интернет-проекта RRUFF был разработан и успешно апробирован сотрудниками Геологического института Кольского НЦ РАН.

В результате применения данного программного комплекса удалось диагностировать минеральные виды, находящиеся до этого в статусе минеральных фаз. Многие из минеральных фаз оказались уже известными минеральными видами, а некоторые были впервые установлены в Кольском регионе (менегинит, козалит) [5].

Отличительной особенностью комплекса является комбинированный подход для диагностики минеральных видов: диагностика минералов заключается в сравнении экспериментальных спектров со спектрами из баз данных и спектрами минералов, полученных из эталонных коллекций с привлечением информации по химическому составу минералов.

В дальнейшем возможна доработка комплекса с учетом пожеланий пользователя (например, разложение спектра на гауссовы кривые, определённый формат вывода данных и т. п.). При соответствующей модификации, комплекс может использоваться для работы и со спектрами другой природы, например, данными по инфракрасной спектроскопии.

Литература

1. Estrada, C.F. Changing the science of mineralogy: The use of Raman spectroscopy in mineral identification and the RRUFF project / C.F. Estrada // Outcrop. Newsletter of the Rocky Mountain Association of Geologists. – 2007. – V.55. – P.1-8.
2. Решетняк, Н.Б. Метод неразрушающей диагностики самоцветов (Лазерная спектроскопия комбинационного рассеяния света) / Н.Б. Решетняк, В.В. Буканов. – М.: МГП "Геоинформмарк", 1991. – 90 с.
3. Орлов, Р.Ю. Атлас спектров комбинационного рассеяния природных минералов. Силикаты / Р.Ю. Орлов, М.Е. Успенская, М.Ф. Вигасина. – М.: Изд-во Московского университета, 2003. – 99 с.
4. Орлов, Р.Ю. Спектры комбинационного рассеяния минералов (справочник) / Р.Ю. Орлов, М.Ф. Вигасина, М.Е. Успенская. – М.: ГЕОС, 2007. – 142 с.
5. Новые данные о минералах. Первые находки в России и в Кольском регионе / А.В. Волошин и др. // Труды XII Всероссийской Ферсмановской научной сессии (с международным участием), г. Апатиты. 6-7 апреля 2015 г. – Апатиты: Изд-во К & М, 2015. – С.161-167.

Сведения об авторах

Степенщиков Дмитрий Геннадьевич – к.г.-м.н., н.с.,

e-mail: stepen@geoksc.apatity.ru

Dmitry G. Stepenshchikov – Ph.D. (Tech.Sci.), researcher

Чернявский Алексей Викторович – м.н.с.,

e-mail: chernyavsky@geoksc.apatity.ru

Alexey V. Chernyavsky – junior researcher

УДК 004.5, 004.946

В.В. Диковицкий, А.А. Менькова

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВИЗУАЛИЗАЦИИ СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЙ ЗА СЧЁТ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА КОНВЕРГЕНЦИИ

Аннотация

В статье описаны методики создания и представления стереоизображений. Рассмотрен метод представления трехмерного изображения, при котором пользователю будет доступна возможность изменения объекта фокусировки (точки пересечения зрительных осей) путем автоматизированного изменения угла конвергенции. Представлены результаты экспериментальной проверки работы метода.

Ключевые слова:

виртуальная реальность, стереопара, бинокулярное зрение, конвергенция, зрительные оси.

V.V. Dikovitskiy, A.A. Menkova

IMPROVING QUALITY OF VISUALIZATION OF STEREO IMAGES BY CHANGING THE CONVERGENCE ANGLE

Abstract

The article describes methods of creating and presenting stereoscopic images, the method of representing three-dimensional image, in which the user will be available to the possibility of changing the focus of the object (the point of intersection of the visual axis) by automated change the convergence angle, experimental results of the method.

Keywords:

virtual reality, stereo pair, binocular vision, convergence, visual axis.

Введение

В настоящее время все более широкое применение находят технологии виртуальной, расширенной реальности, дистанционного присутствия. Данные технологии используются, например, в авиационных тренажерах, в медицинских хирургических системах, в обучении, производстве и других областях. В России ежегодно в результате несчастных случаев на производстве гибнут тысячи людей, сотни тысяч получают производственные травмы. По данным Росстата за 2015 год численность пострадавших с утратой трудоспособности на 1 рабочий день и более и со смертельным исходом составила 28240 человек [1]. Одним из способов предупреждения несчастных случаев является внедрение на производство средств автоматизации, в частности, устройств удаленного присутствия. Отличительной характеристикой таких устройств являются высокое качество передаваемого видеоряда вкпе с высокой скоростью передачи. Однако, в большинстве опасных для жизни производственных ситуаций немаловажным условием является возможность передачи глубины

изображения. В работе рассматриваются методики создания стереоизображений, возможность их использования в устройствах удаленного присутствия.

Имитация человеческого зрения

Восприятие пространства является необходимой способностью человека. Без этой способности безопасное взаимодействие с окружающим миром станет затруднительным. Человек воспринимает величину и форму предметов, их объемность, глубину пространства. Оценка величины предмета напрямую зависит от расстояния до него [8]. Если это расстояние оценить трудно, то велика вероятность ошибки. Оценить расстояние до предмета и глубину пространства можно как с помощью монокулярного зрения (один глаз), так и с помощью бинокулярного (два глаза). Аккомодация хрусталика глаза играет большую роль при оценке с помощью монокулярного зрения. Согласно книге Д. Хьюбелла «Глаз, мозг, зрение» аккомодация – это сокращение цилиарной мышцы внутри глаза. Оно вызывает округление хрусталика при рассматривании близких предметов. За счет этого рассматриваемый предмет становится четче. Для того, чтобы воспринимать глубину пространства с помощью бинокулярного зрения, существует следующий механизм. Изображение рассматриваемого предмета с точки зрения каждого глаза попадает на сетчатку соответствующего глаза в так называемых корреспондирующих точках. Для того, чтобы изображения попали именно в эти точки, существует конвергенция и дивергенция. Конвергенция – это сведение зрительных осей, глазные яблоки поворачиваются навстречу друг другу (рис. 1). Дивергенция является обратным процессом, зрительные оси разводятся в стороны [2].

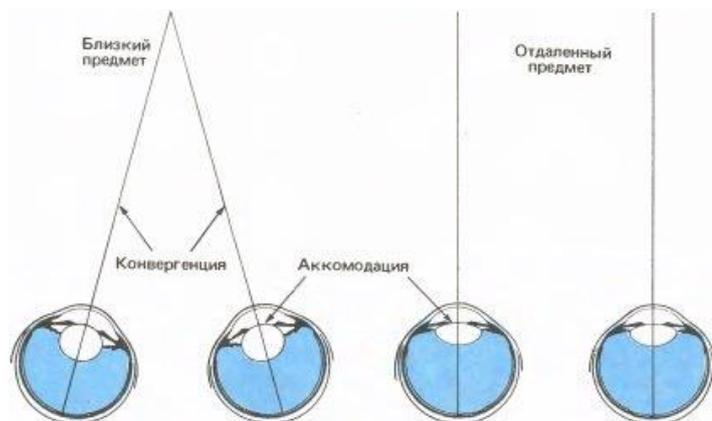


Рис. 1. Конвергенция, дивергенция и аккомодация

Методы создания объемных изображений

Большинство методов создания объемных изображений основаны на принципе отдельного просмотра – каждому глазу демонстрируется свое изображение. Подобная пара изображений называется стереопарой, а ее создание – стереосъемкой. Чтобы получить стереопару нужно снять объект с разных точек. Существуют методы, в которых используется многоакурная

съемка. Задача всех методов стереосъемки - получить пару или серию изображений, на которых наблюдается параллакс. Параллакс – это смещение рассматриваемого объекта, вызванное изменением точки наблюдения. Количество фотографий зависит от того, как в дальнейшем будет проводиться обработка изображений и какой из методов используется для демонстрации стереоизображения. Чаще всего используется две точки съемки, по положению имитирующие расположение глаз человека. Расстояние между точками съемки левого и правого кадра называется базисом стереосъемки или просто стереобазисом. Величина стереобазиса напрямую зависит от расстояния до нужного объекта сцены. Если это расстояние находится в диапазоне от трех до пяти метров, то можно за величину стереобазиса взять расстояние между человеческими глазами, а именно 65-70 мм. Если же необходимо показать объем более дальнего объекта, то, соответственно, необходимо увеличить базис съемки. Примерно базис съемки можно рассчитать по данной формуле:

$$B=0.03*D, \tag{1}$$

где B – базис стереосъемки;

D – расстояние до ближайшего объекта сцены.

Коэффициент 0,03 продиктован углом схождения зрительных осей 1-2°, благодаря которому обеспечиваются наиболее оптимальные условия для наблюдения стереоэффекта [3].

Существует два способа, которыми можно выполнить стереосъемку: направленный и параллельный. При направленном методе съемки камеры расположены под определенным углом друг к другу, направлены на главный объект сцены, таким образом, моделируют конвергенцию глаз человека. Это позволяет получить готовую стереопару практически без дополнительной обработки изображений. Но существует ряд проблем в применении данного метода. Во-первых, технически сложной задачей является точная установка камер. Во-вторых, объекты на заднем плане будут сильно смещены относительно друг друга, что помешает нормальному восприятию этих объектов и вызовет дискомфорт. В-третьих, самая нежелательная проблема, которая может возникнуть, это искажения объектов. Например, квадрат в перспективе изображается в виде трапеции. При съемке направленным методом на снимке с одной камеры большей стороной этой видимой трапеции окажется одна сторона, тогда как на другом снимке ею окажется противоположная сторона фигуры. Также неизбежно возникновение вертикального параллакса. Все перечисленное может вызвать неприятные ощущения при просмотре.

При использовании параллельного метода камеры, очевидно, располагаются параллельно друг другу. Техническая реализация данного метода не является сложной задачей. Но параллельный метод также обладает рядом недостатков. Во-первых, при просмотре стереопары следует выполнить компенсационный сдвиг изображений так, чтобы главный объект сцены не двоился. Данный объект будет казаться удаленным на расстоянии носителя. Тогда объекты, которые находились на сцене позади и впереди него, на изображении будут казаться углубленными в изображение и выступающими соответственно относительно главного объекта. Но смещение изображений займет дополнительное время. Также, после выполнения сдвига, часть изображения по горизонтали теряется, объемной будет только та часть, которая попала в зону пересечения изображений стереопары. Если не сдвигать

изображения, тогда все объекты будут казаться выступающими относительно дальнего фона картинке, который не будет двоиться. Чаще всего большинство людей выбирают параллельный метод без компенсационного сдвига.

Методы представления стереоизображений

Методы параллельного и перекрестного взгляда. Данные методы позволяют наблюдать стереоэффект без использования дополнительных приспособлений, а с помощью дивергенции и конвергенции зрительных осей (рис. 2, 3). При использовании параллельного метода следует фокусироваться на точке дальше изображения, при использовании перекрестного – на точке перед изображением.



Рис. 2. Метод параллельного взгляда, фокусировка дальше изображения



Рис. 3. Метод перекрестного взгляда, фокусировка перед изображением

Оба метода имеют существенный недостаток - при просмотре быстро утомляются глаза.

Метод зеркального разделения изображений. В данном методе одно из изображений стереопары зеркально отражается по горизонтали, а между изображениями на уровне глаз устанавливается зеркало, повернутое отражающей стороной к перевернутому изображению. Взгляд при этом обращается к зеркалу (рис. 4). Недостаток метода заключается в том, что человеку необходимо находиться максимально близко к экрану, либо использовать зеркало большего размера.

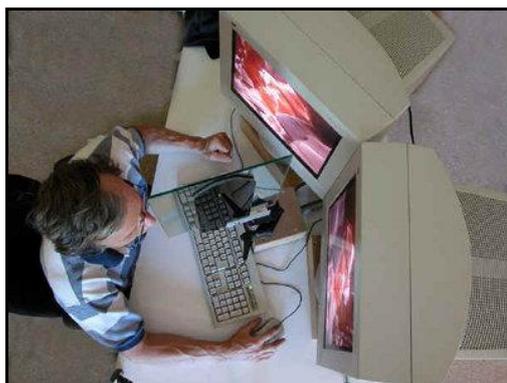


Рис. 4. Метод зеркального разделения изображений

Анаглифный метод создания и демонстрации стереоизображений - это метод, при применении которого имеющиеся изображения стереопары кодируют двумя противоположными цветами, например, красным и голубым. Одно изображение пропускают через красный фильтр, тем самым удаляют голубой цвет, второе изображение пропускают через голубой фильтр, удаляя красный цвет. Из полученных изображений получают стереопару, которую можно просматривать через очки с фильтрами используемых дополнительных цветов (рис. 5).



Рис. 5. Анаглифный метод

Самым большим преимуществом анаглифного метода является его простота и низкая стоимость. Создание анаглифных очков не является технически сложной задачей, также существует множество программ, в том числе и бесплатных, используя которые, можно составить из двух изображений единую стереопару. Также нет необходимости использовать какое-либо специфическое оборудование для воспроизведения, подойдет любой экран и даже бумага. У данного метода имеются довольно значительные недостатки: теряются некоторые цвета, изображение кажется немного блеклым, некоторые другие цвета становятся наоборот подчеркнутыми и неестественными. Это приводит к тому, что у зрителя быстро устают глаза.

Затворный метод или метод временного разделения ракурсов. Этот метод основан на попеременном затемнении с высокой частотой левого и правого стекол очков. Одновременно на экран выводят правое и левое изображение соответственно. В итоге каждый глаз видит предназначенное ему изображение. За счет эффекта инерции зрения создается иллюзия трехмерного изображения. Стекла очков жидкокристаллические и темнеют при подаче напряжения. Основными недостатками метода являются быстрая утомляемость глаз, раздвоение объектов, передвигающихся с высокой скоростью (необходимость увеличения частоты кадров), ослабление светового потока (необходимость повышения яркости). В основе технологий XpanD и nVidia 3D Vision лежит метод временного разделения ракурсов.

Поляризационный метод. При использовании метода поляризации два изображения накладываются друг на друга на один экран через поляризационные фильтры в проекторах. Эти фильтры расположены под углом 90 градусов друг к другу. При этом необходимо использование специального посеребрённого экрана, который позволяет избежать деполяризации и компенсировать потерю яркости. Для наблюдения стереоэффекта в данном случае потребуются очки, в которые также встроены ортогональные поляризационные фильтры. Каждый фильтр пропускает часть световых волн, чья поляризация соответствует поляризации фильтра. Недостатком данного метода является то, зритель должен держать голову на одном уровне, не допускается наклон головы, иначе эффект теряется.

Стереочки с многополосными фильтрами. Данная технология основана на использовании дополнительных цветных фильтров в обтюраторе кинопроектора. Помимо стандартных фильтров красного, зеленого и синего цветов используют светофильтры тех же цветов, но имеющих другой спектральный диапазон пропускания. Очки, также оснащены светофильтрами, пропускающими спектральные полосы основных цветов, причём фильтры для разных глаз имеют разные полосы пропускания для красного, зелёного и синего цветов, создавая при этом одинаковое зрительное ощущение от цветного изображения за обоими стёклами. Для данной технологии не требуется особый экран, как при использовании поляризационного метода [4].

Виртуальный шлем, очки виртуальной реальности – это устройство, состоящее из пластикового корпуса, линз, экрана, разделенного на две части и гироскопа. Объемное изображение создается за счет демонстрации двух ракурсов – по одному на каждый глаз.

Повышение качества визуализации стереоизображений за счёт изменения угла конвергенции

Представленные методы не допускают просмотр видеоряда в реальном времени с возможностью фокусировки на нескольких планах снимаемой сцены. Далее рассмотрен метод представления трехмерного изображения, при котором пользователю будет доступна возможность изменения объекта фокусировки (точки пересечения зрительных осей) путем автоматизированного изменения угла конвергенции. Результатом применения метода является представление трехмерного изображения с возможностью изменения объекта фокусировки.

Существует два способа достижения поставленной цели. Первый из них заключается в изменении угла конвергенции за счет изменения положения в пространстве снимающего устройства – сведение-разведение видеокамер, транслирующих видеоряд, в зависимости от расстояния до объекта фокусировки. Второй способ заключается в программном смещении заранее снятых параллельно стереопар в транслирующем устройстве, например, в очках виртуальной реальности (рис. 6).

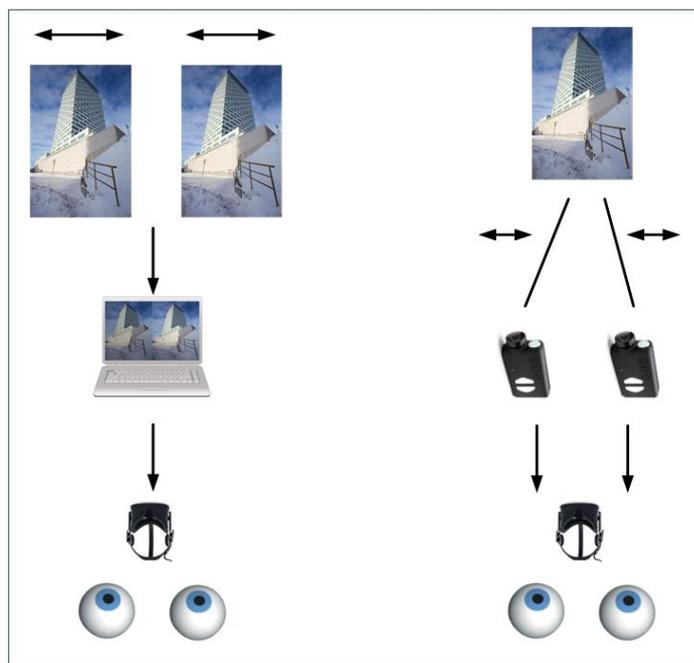


Рис. 6. Способы экспериментальной проверки технологии искусственной конвергенции-дивергенции

Для проверки работоспособности и сравнении двух подходов был проведен эксперимент, в ходе которого были отсняты параллельным методом сферические стереофотографии как в помещении, так и вне оно. Лабораторный стенд для проведения эксперимента состоит из следующих устройств: очки виртуальной реальности Oculus Rift для просмотра стереопар, две широкоугольные камеры Mobius ActionCam для трансляции видеоряда в реальном времени, фотоаппарат для съемки стереофотографий.

Качественным показателем работы метода является наличие эффекта присутствия при смене объекта фокусировки. Количественным показателем работы метода служит время комфортного просмотра стереопанорам и видеоряда при изменении объекта фокусировки.

Для проведения эксперимента была выбрана группа из 5 человек, находящихся в возрастной категории 23-48 лет.

Были выбраны следующие расстояния для расположения объектов, на которых осуществлялось сведение зрительных осей камер, либо смещение изображений:

- близкий объект – 0-1 м;
- среднеудаленный объект – 1-5 м;
- дальний объект – 5 и более метров.

Результаты проведения эксперимента указаны в табл. 1. Результаты указаны в формате «время комфортного просмотра в очках виртуальной реальности в минутах/оценка расстояния (возможно или нет)».

Таблица 1

Результаты экспериментальной проверки конвергенции и дивергенции зрительных осей камер

	Близкий	Среднеудаленный	Дальний
Участник 1	3/да	4/да	5,5/нет
Участник 2	4/да	4,5/да	6/нет
Участник 3	3,5/да	3/да	4/да
Участник 4	5/да	5/да	5/нет
Участник 5	4/да	4,5/да	4/да

В среднем время комфортного пребывания в очках виртуальной реальности составило 13 минут.

Таблица 2

Результаты экспериментальной проверки смещения параллельно снятых ракурсов стереопары относительно друг друга

	Близкий	Среднеудаленный	Дальний
Участник 1	7/да	5/да	5,5/нет
Участник 2	6/да	7/да	6,5/нет
Участник 3	7,5/да	6/да	4/да
Участник 4	5/да	5,5/да	7/нет
Участник 5	8/да	7/да	5,5/да

В среднем время комфортного пребывания в очках виртуальной реальности составило 18,5 минут.

Применение данного метода позволит реализовать комфортное восприятие человеком стереовидеоряда для различно удаленных от камер объектов. Достоинством технологии является возможность индивидуальной настройки угла конвергенции при просмотре стереовидеоряда. Однако следует отметить необходимость автоматизации учета фактического направления

зрительных осей человека, например, путем измерения расстояния до снимаемого объекта. В дальнейшем планируется реализация программными и аппаратными средствами возможности изменения положения зрительных осей в зависимости от измеренного расстояния до объекта.

Заключение

В данной работе описаны особенности работы человеческого зрения. Проведен анализ существующих методов создания и представления стереоизображений. Описан метод представления трехмерного изображения, позволяющий изменять объект фокусировки за счет конвергенции зрительных осей. Экспериментальная проверка описываемого метода показала возможность увеличения времени комфортного пребывания в очках виртуальной реальности, а также возможность адаптивного представления видеоряда для создания объекта присутствия для объектов различной удаленности.

Литература

1. Федеральная служба государственной статистики. Условия труда.
- Режим доступа: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat/main/rosstat/ru/statistics/wages/working_conditions/
2. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 239 с. ISBN 5-03-001254-0.
3. CPU3D.com Расчет параметров стереосъемки.
- Режим доступа: <http://cpu3d.com/movies/racchet-parametrov-stereosemki/>
4. Стереарт. Способы просмотра стереоизображений.
- Режим доступа: <http://www.stereoart.ru/pg.php?page=paperIp0014.html>
5. Беклемишев Н.Д. Оценка среднего параллакса стереоизображений / Н.Д. Беклемишев // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2016. -№ 88. - 12 с.
6. Форсайт, Д.А., Понс, Ж. Компьютерное зрение. Современный подход: Пер. с англ. /Д.А. Форсайт, Ж. Понс. –М.:Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.
7. Воронин, В.В. Разработка и исследование алгоритма вычисления карты глубины стереоизображения / В.В. Воронин // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. – С.58-66.
8. Механизмы сознания и существования. Зрительная система человека.
- Режим доступа: <http://cyber-ek.ru/reading/ps-seeing.html>

Сведения об авторах

Диковицкий Владимир Витальевич - младший научный сотрудник,
e-mail: dikovitsky@gmail.com
Vladimir V. Dikovitsky - junior researcher

Менькова Анастасия Александровна – инженер-исследователь,
e-mail: AMenkova@iimm.ru
Anastasia A. Menkova – research engineer

А.В. Клименко¹, В.Н. Горбачев²

¹ Санкт-Петербургский Горный университет

² Высшая школа печати и медиатехнологий Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург

СЛЕПОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ВОДЯНОГО ЗНАКА В ИЗОБРАЖЕНИЯХ С ПАЛИТРОЙ БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ ЦВЕТА

Аннотация

В статье предлагается стеганографическая схема со слепым детектированием для сокрытия бинарного образца в цветных изображениях с палитрой. В алгоритме встраивания используются коды Лехмера для кодирования перестановкой строк палитры, в которых обычно требуется наличие палитры исходного контейнера. Найденные преобразования между изображением с палитрой и RGB-изображением позволяют извлечь встроенные данные без исходного контейнера.

Ключевые слова:

изображение с палитрой, стеганография, коды Лехмера, цифровой водяной знак, защита информации.

A.V. Klimenko, V.N. Gorbachev

THE BLIND DETECTION FOR PALETTE IMAGE WATERMARKING WITHOUT CHANGING THE COLOR

Abstract

To hide a binary pattern in the palette image a steganographic scheme with blind detection is considered. The embedding algorithm uses the Lehmer code by palette color permutations for which the cover image palette is generally required. The found transformation between the palette and RGB images allows to extract the hidden data without any cover work.

Keywords:

palette image, steganography, Lehmer code, digital watermark, information protection.

Введение

Изображения с палитрой или индексированные изображения широко распространены в сети Интернет, и различные стеганографические приложения для защиты данных изображений имеют широкое применение. Графические форматы при сохранении исходного цифрового изображения генерируют палитру и массив данных, который может быть использован для сокрытия информации. Изменение набора данных или палитры в виде LSB-встраивания часто приводит к возникновению видимых артефактов. Возможные решения используют сортировку палитры, четность и адаптивное встраивание [1, 2] и другие.

Многочисленные техники встраивания основаны на том факте, что переупорядочивание цветов палитры и реиндексация набора данных не вызывают заметное изменение видимости изображения. Стеганографическая программа GIF-Shuffle применяет такой подход для GIF-изображений [3]. GIF-Shuffle кодирует сообщения при помощи перестановки строк палитры и

использует алгоритм, который генерирует перестановки в соответствии с заданным целым. Таким же способом в приложении SteganoGifPaletteOrder используются перестановки цветов в палитрах файлов формата GIF [4]. Наряду с цветными изображениями, такая техника, известная как GIF-it-Up позволяет встраивать скрытую информацию в полутоновое GIF-изображение [5]. Кодирование перестановками, также известное как коды Лехмера [6], предполагает выбор исходного упорядочения. Например, программа GIF-Shuffle сортирует палитру RGB-цветов GIF-файла, используя «естественный» порядок, то есть каждому цвету присваивается значение, рассчитываемое по формуле $6536R + 256G + B$, и затем осуществляется сортировка по значениям. Это значит, что для восстановления скрытой информации требуется этот «естественный» порядок или, другими словами, требуется оригинал. С этой точки зрения стеганографическая система, использующая код, полученный при помощи перестановки, будет принадлежать классу систем с неслепым детектированием. Это не является существенным ограничением для системы. Такой «естественный» порядок может быть реализован в виде секретного ключа. Ключ распределяется среди легитимных пользователей при помощи многочисленных классических криптографических протоколов и при помощи квантового протокола, такого как BB84 [7].

В данной статье предлагается схема со слепым детектированием. Выбор обусловлен тем, что исходное изображение, так называемый cover work, может быть сгенерировано из стегоизображения с палитрой, если оно будет преобразовано в его RGB-представление. Это возможно благодаря специальному преобразованию между изображением с палитрой и RGB-изображением. Главная цель нашей статьи – предложить данную схему и обсудить встраивание бинарного образца с использованием кода Лехмера.

Для того чтобы повысить уровень секретности, приложения GIF-Shuffle и SteganoGifPaletteOrder используют кодирование. Возможным алгоритмом кодирования может быть ICE (Information Concealment Engine – устройство сокрытия информации) с 64-битным ключом [8]. Действительно, чтобы скрыть бинарные изображения, шифр Вернама может быть подходящим. Когда ключ внедряется при помощи случайной матрицы, может быть построено приложение типа одноразового блокнота. Это совершенное кодирование, если оно правильно хранится [9]. На практике использование приложений типа одноразового блокнота ограничено, так как для них требуется хранение и распределение объемного случайного ключа, что является очень затратным. Однако их современные разработки, основанные на оптическом распределении частиц случайной структуры, могут быть эффективны [10].

Статья организована следующим образом: вначале коротко обсуждается код Лехмера, затем предложены преобразования изображений с палитрой, в конце описана стеганографическая система со слепым детектированием.

Коды Лехмера

Код Лехмера пересчитывает перестановки при помощи целого числа, представленного в факториальной системе счисления.

Положительное число m может быть представлено в факториальной системе счисления как

$$m = \sum_{k=1}^n a_k (k-1)! \quad , \quad (1)$$

где разряды факториала $a_k = [m/(k-1)!] \bmod(k)$ принимают значения из набора $0, 1, 2, \dots, k-1$, и функция целая часть $[x]$ вычисляет наибольшее целое, меньшее либо равное x . Выражение (1) может быть представлено в виде факториала n -разрядного регистра, который хранит любое целое число из диапазона $[0, n!-1]$. Например, шесть факториальных разрядов от a_6 до a_1 числа 251 записываются как

$$251 = (2, 0, 2, 0, 1, 0)_1 = 2 \cdot 5! + 0 \cdot 4! + 2 \cdot 3! + 0 \cdot 2! + 1 \cdot 1! + 0 \cdot 0! \quad (2)$$

Коды Лехмера являются одним из способов кодирования перестановок с использованием инверсии. Пара, составленная из элемента x_k и его соседа справа x_j , $k < j$, образует инверсию, если $x_k > x_j$. Пусть t_k является числом всех инверсий x_k , тогда вектор $t = (t_n, t_2, \dots, t_1)$ может однозначно описать все перестановки для n входов. Так как имеется $n-k$ элементов справа от элемента x_k , он образует не больше чем $n-k$ инверсий и t_k может принимать значения $0, 1, 2, \dots, n-k$, где 0 означает отсутствие инверсии и $\max t_k = n-k$. Например, пусть перестановка из $n=6$ элементов будет $P(012345) = 204153$, где 012345 является единичной перестановкой. Тогда $\max t = (5, 4, 3, 2, 1, 0)$, где 0 обозначает тот факт, что элемент 5 – последний, и у него нет элементов, расположенных справа от него. Для этого случая

$$P(012345) = 2 \ 0 \ 4 \ 1 \ 5 \ 3, \quad (3)$$

$$t = (2, 0, 2, 0, 1, 0),$$

где первый элемент 2 из t означает, что первый элемент перестановки 2 образует инверсии с 0 и 1.

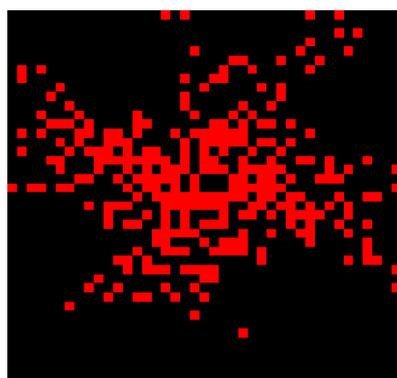
Приведенные примеры из (2) и (3) показывают, что существует взаимно однозначное соответствие между перестановкой, представленной ее инверсиями, и целым числом m , представленным его факториальными цифрами

$$251 = (2, 0, 2, 0, 1, 0)_1 \leftrightarrow 204153.$$

Другой пример — перестановка с $\max t = (n-1, \dots, 2, 1, 0)$, что соответствует полной инверсии входов $P_{inv}(012..n-1 = n-1..210)$

$$n!-1 = (n-1, \dots, 2, 1, 0)! \leftrightarrow n-1..210. \quad (4)$$

Коды Лехмера позволяют закодировать любое цифровое изображение, используя перестановку. Например, предположим, что бинарное изображение – это набор бинарных разрядов целого числа m , которое может быть представлено в факториальной системе счисления. Рис. 1 иллюстрирует первые шаги. Бинарное изображение из двух цветов (красный и черный), размером 41×41 пикселей, преобразуется в целое число m , которое содержит 503 десятичных и 256 факториальных разрядов. Факториальные разряды упорядочиваются в матрицы размером 16×16 пикселей и показаны на рис. 1, г.



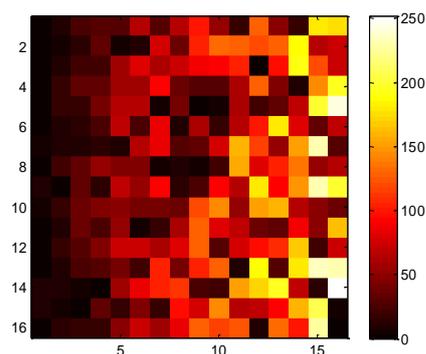
а)

```
m = 6564698395969575619217434227940305
2262927514418706831466750223276003872
1099600513329241782566259050945908508
4761196908058180120096364808627684263
4088484962456969448805852822358553400
1405291968405934503573972594829057605
8476812383597175408710472667191620399
1245407585476705668698314062405030956
4260610687404629442145262228325576745
6702827221058999922457074963411934271
9575008934491432084883380374181890845
291311310991291828339401672061777589
0576106684850954733407687284808993361
0177648795478168370151424.0
```

б)

```
m = (0, 0, 2, 2, 2, 0, 6, 2, 8, 5, 2, 2, 0, 9, 8, 1, 11,
6, 11, 16, 18, 8, 10, 20, 2, 17, 11, 19, 8, 11, 5, 14,
24, 15, 21, 32, 16, 13, 10, 34, 35, 38, 36, 28, 27,
4, 1, 17, 30, 34, 23, 35, 43, 25, 14, 52, 15, 47, 27,
45, 28, 2, 33, 16, 31, 4, 59, 56, 65, 67, 8, 44, 69,
48, 52, 74, 43, 58, 18, 51, 63, 10, 79, 59, 65, 24,
64, 44, 54, 43, 7, 74, 23, 86, 45, 72, 30, 77, 61,
94, 6, 83, 83, 4, 92, 40, 18, 61, 105, 104, 17, 57,
64, 38, 74, 36, 41, 8, 31, 10, 14, 37, 62, 80, 42,
112, 97, 86, 100, 105, 89, 28, 3, 60, 35, 7, 25,
122, 126, 126, 105, 27, 77, 126, 55, 132, 93, 31,
4, 17, 78, 20, 93, 145, 81, 31, 126, 22, 143, 118,
19, 126, 103, 60, 60, 66, 159, 157, 64, 53, 70, 76,
8, 152, 66, 123, 128, 121, 2, 128, 20, 102, 115,
82, 179, 150, 38, 97, 188, 173, 68, 11, 49, 127,
97, 44, 32, 180, 54, 106, 91, 159, 32, 107, 30,
196, 92, 132, 17, 188, 189, 11, 67, 80, 152, 135,
148, 66, 87, 169, 180, 68, 159, 101, 179, 63, 122,
142, 197, 32, 229, 52, 230, 51, 51, 22, 234, 14,
206, 227, 174, 71, 73, 196, 243, 68, 28, 65, 199,
39, 163, 71, 232, 252, 4, 0)!
```

в)



г)

Рис. 1. Кодирование бинарного изображения при помощи факториальных разрядов целого числа: а) бинарное изображение размером 41×41 пикселей; б) 503 целых числа, относящихся к бинарному изображению; в) 256 факториальных разрядов целого числа m ; г) матрица размером 16×16 пикселей, представляющая факториальные разряды.

Затем, чтобы сгенерировать желаемую перестановку для заданного числа m , должна быть выбрана единичная перестановка. Этот факт является важным для процедур внедрения цвета для изображений с палитрой, основанных на цветовых перестановках. Для этого случая единичная перестановка является

заданной палитрой оригинала и это требуется для детектирования скрытых данных. В результате алгоритм детектирования будет использовать исходное изображение-оригинал и будет неслепым. Однако палитра оригинала может быть получена из стегоизображения благодаря отдельным свойствам преобразования цвета палитры.

Преобразование между изображением с палитрой и цветным изображением

Одно индексированное изображение может быть конвертировано в другое таким образом, что оба изображения будут иметь одинаковое RGB-представление, которое может быть преобразовано обратно только в одно из них.

С математической точки зрения изображение с палитрой или индексированное изображение может быть представлено в виде тензорного произведения $C_{pal} = I \otimes P$, где I является набором данных или массивом индексов, а P является палитрой, которая отображает цвета в RGB модели. Когда индекс $i \in I$ ссылается на палитру, из нее выбирается цвет, и осуществляется преобразование $C_{pal} \rightarrow C_{rgb}$, где C_{rgb} является RGB-представлением изображения с палитрой, которое мы видим на экране.

Стандартное преобразование между цветным изображением и изображением с палитрой является необратимым. Обычное представление содержит 24 бита для цветного пиксела и 8 бит на пиксел для индекса палитры. Большое число алгоритмов квантования цвета позволяет конвертировать 24-битное цветное изображение в изображение с палитрой с 8-битным цветом C_{pal} (8). При этом энтропия не сохраняется и это преобразование с потерями, однако полученное изображение с палитрой может выглядеть хорошо.

Пусть изображение C_{pal} (8) имеет свое RGB-представление при 8-битном цвете C_{rgb} . Используя некоторые алгоритмы квантования цвета, мы преобразуем это RGB-изображение обратно в палитровое. Предполагается, что эти алгоритмы являются детерминированными, поэтому очевидно, что выходом становится C_{ind} (8). Это значит, что существует взаимно однозначное соответствие между C_{pal} (8) и C_{ind} (8):

$$C_{rgb} \Leftrightarrow C_{ind}. \quad (5)$$

Но обратное преобразование может не соединить все пары изображений, и существуют изображения с палитрой, для которых (5) является необратимым.

Изображения с палитрой могут быть преобразованы из одного в другое с использованием различных подходов. Одновременное изменение индекса и цветов палитры может привести к преобразованию $C_{pal} \rightarrow S_{pal}$, где оба изображения с палитрой имеют одинаковое RGB-представление C_{rgb} . Пусть C_{pal} и C_{rgb} связаны соотношением (5). Тогда очевидно, что алгоритмы квантования преобразуют C_{rgb} в C_{pal} вместо S_{pal} . Это описывается следующим отображением:

$$C_{rgb} \Leftrightarrow C_{pal} \rightarrow S_{pal} \rightarrow C_{rgb}. \quad (6)$$

Рис. 2 иллюстрирует отображение, заданное выражением (6). Здесь цветное изображение RGB C_{rgb} и изображение с палитрой C_{pal} образованы одно из другого при помощи функций в Matlab $rgb2ind$ и $ind2rgb$ в соответствии с выражением (5). Два изображения с палитрой заданы их массивами индексов, полутоновыми образцами и палитрами. Изображение S_{pal} является негативом от C_{pal} . Негатив образуется при помощи замены индексов и цветов палитры или строк палитры с $i \rightarrow i' = 255 - i$. Являясь негативами друг друга, изображения, C_{pal} и S_{pal} имеют одинаковое RGB-представление, заданное при помощи C_{rgb} .

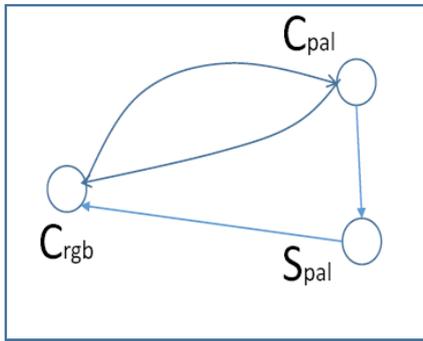
Стеганографическая схема со слепым детектированием

Два изображения с палитрой, которые имеют одинаковую RGB-видимость, могут быть представлены как контейнер и стегоконтейнер в стеганографической схеме, где скрытое сообщение может быть извлечено из стегоизображения.

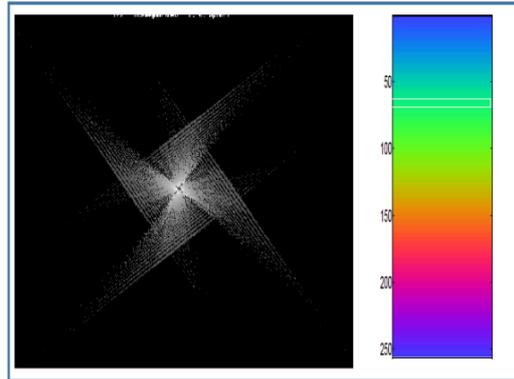
Два изображения с палитрой, представленные на рис. 2, имеют одинаковый вид и одно из них (S_{pal}) образуется из C_{pal} при инверсии их цветов и индексов. Используя этот подход, сообщение встраивается, и данная процедура может быть легко выполнена. Это следует из того, что кодирование Лехмера осуществляет перестановки таким образом, что инвертируются все n цветов, имеющие целое $m = n! - 1$ (4). Это целое содержит не меньше чем $N = \log_2(n!)$ бинарных разрядов и является сообщением M , введенным в палитру. Для палитры из $n = 256$ цветов $N \geq 1684$ и с точностью до 3 битов находим, что M является матрицей размером 41×41 из единиц, что может выглядеть как черный квадрат. Это означает, что кодирование сообщения в виде «черного квадрата» является полной инверсией цветов палитры.

Рис. 3 иллюстрирует введение бинарного изображения при помощи кода Лехмера. Бинарное изображение размером 41×41 пикселей, представленное на рис. 1, а, внедряется в контейнер C_{pal} (рис. 2, б). Стегоизображение S_{pal} , представленное на рис. 3, б, создается при помощи найденной перестановки цветов палитры и индексов C_{pal} . Часть перестановки приведена внизу на рис. 3, в.

После того, как сообщение встроено, полученное стегоизображение может быть сохранено в таких графических форматах, как GIF и PNG для дальнейшего использования в преобразованиях без какой-либо потери информации. Для того, чтобы извлечь сообщение из S_{pal} , оно должно быть загружено из GIF и PNG и в соответствии с (6), решение находится после выполнения следующих шагов:

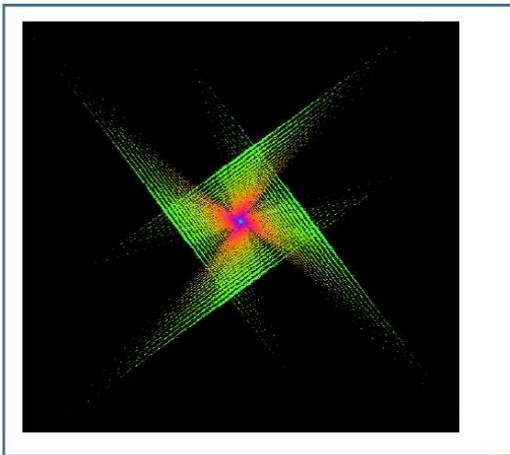


a)



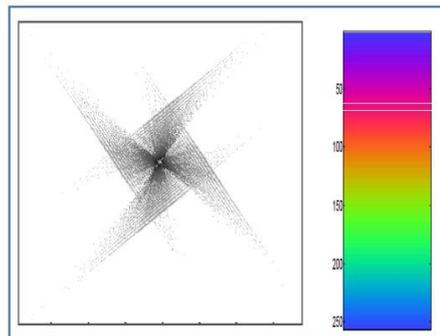
C_{pal}

б)



C_{rgb} S_{pal}

в)



г)

Рис. 2. Преобразования изображений: а) схема преобразования между цветным изображением и изображением с палитрой; б) и г) изображение с палитрой C_{pal} и его негатив S_{pal} , представленные их наборами данных, полутоновыми изображениями и палитрами; в) те изображения с палитрой, которые имеют одинаковое RGB-представление C_{rgb} .

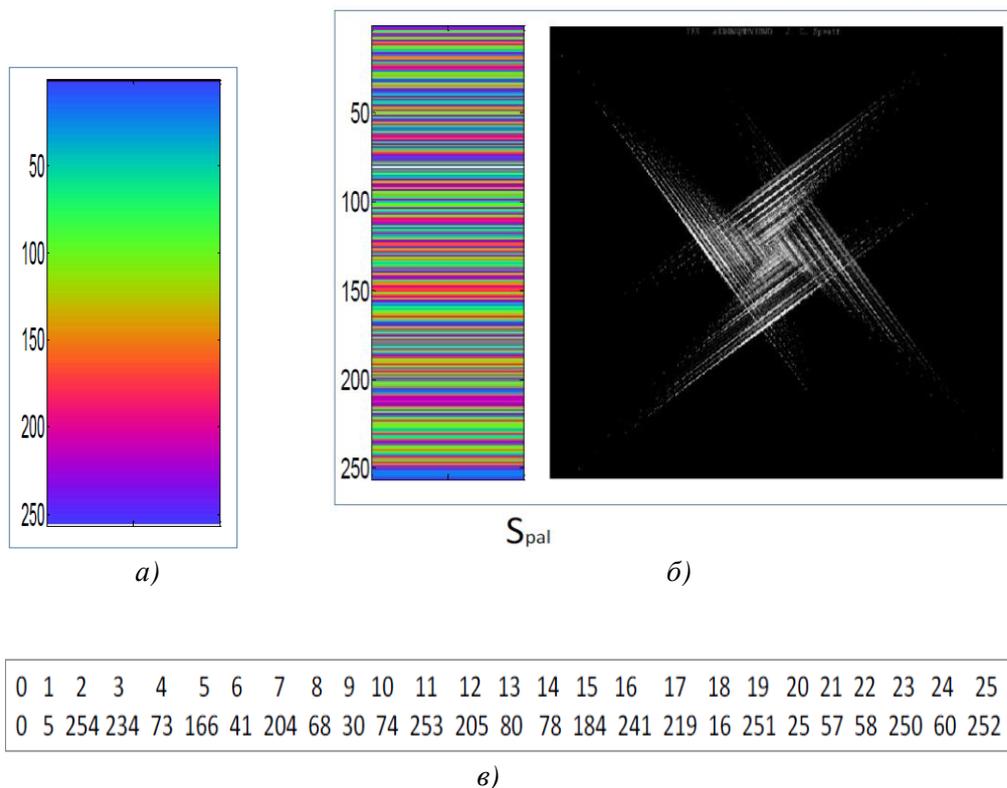


Рис. 3. Введение бинарного изображения при помощи кода Лехмера: а) палитра контейнера; б) палитра стегоизображения, полученная перестановкой цветов и индексов; в) часть перестановки. Бинарное изображение и контейнер показаны на рис. 2, б), и 1, а).

- палитра извлекается из S_{pal} и контейнер C_{pal} генерируется из C_{rgb} , которое является представлением цвета обоих изображений – стегоизображения и контейнера;
- палитра извлекается из C_{pal} , которое является единичной перестановкой цветов;
- скрытое изображение извлекается из палитр при помощи кодирования Лехмера.

Следует отметить, что представленная схема не является секретной с точки зрения принципа Керхгоффа, так как она не имеет секретного ключа. В качестве возможного решения может быть предложено генерирование случайной бинарной матрицы, имеющей размер, равный размеру бинарного сообщения, и сочетание этих матриц, например, при помощи сложения по модулю (modular addition). Когда матрица является случайной и никогда не используется заново, найденная система (также известная как одноразовый блокнот) является неразрушимой.

Заключение

Разработана стеганографическая система со слепым детектированием для встраивания бинарного изображения в цветное изображение с палитрой. Алгоритм встраивания основан на кодировании строк палитры с использованием кодов Лехмера. Приведены примеры встраивания и извлечения изображений с использованием данной системы. Предложенная система может быть использована для внедрения цифрового водяного знака в цветное изображение с целью защиты информации.

Литература

1. Fridrich, J., Secure steganographic methods for palette images / J. Fridrich, R. Dui // In 3rd Information Hiding Workshop, Lecture Note on Computer Science (1768), New York, Heidelberg, 1999, Springer-Verlag. – P.47-60.
2. Chang, C-C. Hiding data in colour palette images with hybrid strategies / C-C. Chang, C-C. Lin, Y-H. Chen // The Imaging Science Journal, Volume 57, Issue 1, 1 February 2009. -P.19-29.
3. Режим доступа: <http://www.darkside.com.au/gifshuffle>
4. Режим доступа: <http://users.skynet.be/glu/sgpo.htm>
5. Lian, Shiguo. Yan Zhang. Handbook of Research on Secure Multimedia Distribution / Shiguo Lian, Yan Zhang // IGI Global, 2011. – Режим доступа: <http://www.theargon.com/achilles/steganography/gif-it-up/>
6. Lehmer, D.H. Teaching combinatorial tricks to a computer / D.H. Lehmer // Proc. Sympos. Appl. Math. Combinatorial Analysis, Vol. 10, Amer. Math. Soc., Providence, R. I., 1960. – P.179-193.
7. Bennett, C.H. Quantum public key distribution system / C.H. Bennett, G. Brassard // IBM Tech. Discl. Bull. 28, 1985. – P.3153- 3163.
8. Режим доступа: <http://www.darkside.com.au/ice/index.html>
9. Shannon, C. Communication theory of secrecy systems / C. Shannon // Bell System Technical Journal. Volume 28, Issue 4, October 1949. – P.656–715.
10. Horstmeyer, R. Physical key-protected one-time pad / R. Horstmeyer, V. Judkewitz, I. Vellekoop, S. Assawaworrarit, C. Yang // [physics. optics], 26 Nov 2013. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1305.3886v2.pdf>

Сведения об авторах

Клименко Андрей Валерьевич - к.т.н, доцент СПГУ,

e-mail: wtc18@mail.ru

Andrei V. Klimenko - Ph.D. (Tech. Sci.), associate professor of SPMU

Горбачев Валерий Николаевич – к.т.н, доцент ВШПМ СПГУПТИД,

e-mail: valery.gorbachev@gmail.com

Valery N. Gorbachev - associate professor of High School of Print and Media SPUPTD

УДК 004.832

А.А. Зуенко, О.В. Фридман

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

ФОРМИРОВАНИЕ УЧЕБНЫХ ПЛАНОВ ВУЗОВ КАК ЗАДАЧА УДОВЛЕТВОРЕНИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ*

Аннотация

В работе представлено применение авторских методов распространения ограничений к задаче формирования учебных планов для ВУЗов. Описывается пример формирования фрагмента реального учебного плана на основе формализации отношений в виде *C*-систем. Использование авторских методов распространения ограничений позволяет ускорить традиционные алгоритмы удовлетворения качественных ограничений.

Ключевые слова:

задача удовлетворения ограничений, задача синтеза учебного плана, распространение ограничений, матричное представление нечисловых ограничений.

A.A. Zuenko, O.V. Fridman

SYNTHESIS OF UNIVERSITY CURRICULUM AS A CONSTRAINT SATISFACTION PROBLEM

Abstract

The article presents the application of constraint propagation techniques developed by one of the authors to the problem of synthesis of University curriculum. An example of synthesis of the real curriculum fragment, using the formalization of relations in the form of *C*-systems, is described. The author's constraint propagation techniques allow to accelerate the typical algorithms of constraint satisfaction.

Keywords:

constraint satisfaction problem, curriculum synthesis problem, constraints propagation, matrix representation of non-numeric constraints.

Введение

В настоящей работе представлены результаты исследований по применимости авторских методов распространения ограничений на основе матричного представления ограничений к задаче формирования учебного плана ВУЗа. В работе [1] проведен анализ программных продуктов для автоматизации формирования учебных планов вузов. В работе [2] описан модельный пример формирования фрагмента учебного плана с использованием формализации отношений в виде *D*-систем. Показано, что применение разработанных методов позволяет совместно обрабатывать качественные и количественные ограничения и, зачастую, решать задачу формирования учебного плана за полиномиальное время без организации ветвления. Данная работа продолжает эти исследования. Здесь описывается пример формирования фрагмента учебного плана для бакалавриата по направлению 230400.62 – «Информационные системы и

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 14-07-00205а, 15-07-02757-а, 16-07-00273а, 16-07-00377а, 16-07-00313а, 16-07-00562а).

технологии» факультета Информатики и прикладной математики КФ ПетрГУ на основе формализации отношений в виде C -систем.

Приведем краткое описание предлагаемых методов распространения ограничений и пример применения методов в задаче автоматизации формирования учебных планов для вузов.

Применение матрицеподобных структур в задачах удовлетворения ограничений

Задача удовлетворения ограничений определена множеством переменных x_1, x_2, \dots, x_n и множеством ограничений C_1, C_2, \dots, C_m [3-5]. Каждая переменная x_i имеет непустую область определения D_i (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*): $\{x_i=v_i, x_j=v_j, \dots\}$. Решением задачи CSP является полное присваивание, которое удовлетворяет всем ограничениям.

Как и в работе [6], здесь для представления данных и знаний используются два типа матрицеподобных структур: C -системы и D -системы. Близкий подход применяется также в [7] для решения задач распознавания образов и упрощения баз знаний. Особенностью настоящих исследований является то, что эти структуры предлагается рассматривать как ограничения над конечными доменами, а рассуждения на данных структурах реализовывать в форме процедур удовлетворения ограничений.

C -система записывается в виде матрицы, состоящей из компонент-множеств. Содержимое C -системы заключается в прямые скобки. Например,

$$T[XYZ]=\left[\begin{array}{ccc} A & * & C \\ G & E & * \end{array} \right] \text{ есть } C\text{-система.}$$

Слева от знака равно находится заголовок C -системы, содержащий имя C -системы и *схему*, в которой перечислены имена ее атрибутов (в данном случае X, Y, Z). Подобно тому, как атрибут таблицы в реляционной алгебре соотносится с определенным столбцом, атрибут соответствует столбцу C -системы. Будем считать, что доменами атрибутов X, Y, Z являются множества D_1, D_2, D_3 , соответственно. Справа от знака равенства находится тело C -системы. В отличие от реляционных таблиц, каждый кортеж C -системы состоит не из отдельных значений, а из компонент-множеств, являющихся подмножествами соответствующего домена.

Компоненты C -системы, стоящие в одном и том же столбце, например компоненты A и G , принадлежат булеану некоторого множества (в нашем случае булеану множества D_1), называемого доменом соответствующего атрибута.

При описании C - и D -систем используется два вида фиктивных компонент: полная компонента (обозначается «*») – это множество, равное области определения (домену) соответствующей переменной (атрибута); пустая компонента (обозначается « \emptyset ») – компонента, не содержащая ни одного значения.

Так запись $T[XYZ]=\begin{bmatrix} A & * & C \\ G & E & * \end{bmatrix}$ для нашего примера эквивалента записи $T[XYZ]=\begin{bmatrix} A & D_2 & C \\ G & E & D_3 \end{bmatrix}$. Эту C -систему можно преобразовать в обычное

многоместное отношение следующим образом: $(A \times D_2 \times C) \cup (G \times E \times D_3)$.

С помощью C -систем удобно моделировать дизъюнктивные нормальные формы (ДНФ) конечных предикатов. Продемонстрируем 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 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 отношения $R[XYZ]$ соответствуют переменным 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 многоместное отношение следующим образом:

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

С помощью D -систем моделируются конъюнктивные нормальные формы (КНФ) конечных предикатов. D -система записывается как матрица компонент-множеств, которые заключены в перевернутые скобки. D -системы позволяют легко вычислять дополнение C -систем: берется дополнение для каждой компоненты-множества.

С помощью C - и D -систем можно моделировать не только классические ограничения с конечными доменами, но и ограничения с недоопределенными параметрами, поскольку компоненты кортежей C - и D -систем содержат в качестве значений множества, а не отдельные элементы [8].

В работах [9-11] приводятся конкретные методы решения задач CSP, основанные на матричном представлении ограничений с конечными доменами. В силу требований к объему статьи, приведем здесь лишь утверждения, используемые в дальнейшем.

Рассмотрим утверждения, позволяющие реализовывать эквивалентные преобразования системы ограничений для случая, когда ограничения представлены в виде набора C -систем [12]. Ранее эти утверждения применены одним из авторов статьи для качественного моделирования статических аспектов функционирования технических систем [13].

Целью преобразований является приведение системы ограничений к более простому виду, где содержится меньшее количество C -систем, строк C -систем, столбцов (атрибутов) C -систем, значений в доменах атрибутов и т.п. Другими

словами, целью преобразований является упрощение исходной задачи CSP без потери ее решений.

Утверждение 1 (У1). Если все строки (кортежи) S -системы пусты, то есть содержат хотя бы по одной пустой компоненте каждая, то S -система пуста (соответствующая задача CSP несовместна).

Утверждение 2 (У2). Если все компоненты некоторого атрибута (столбца S -системы) являются полными, то данный атрибут можно удалить из S -системы (удаляются все компоненты, стоящие в соответствующем столбце), а пара “удаляемый атрибут – его домен” сохраняется в векторе частичного решения.

Утверждение 3 (У3). Если домен некоторого атрибута S -системы содержит значения, не встречающиеся в соответствующем столбце, то эти значения удаляются из данного домена.

Утверждение 4 (У4). Если строка S -системы содержит хотя бы одну пустую компоненту (строка пуста), то строка удаляется.

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

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

Теперь перейдем непосредственно к рассмотрению возможностей применения представленных методов удовлетворения ограничений.

Применение методов распространения ограничений в задаче формирования учебного плана вуза

В работе [14] описаны математическая постановка задачи синтеза учебных планов вузов, основные этапы его формирования, ограничения, налагаемые на учебный план др. Согласно [14] задача составления (синтеза) учебного плана сводится к следующему. Составить учебный план – это значит выбрать из всего объема дисциплин наиболее важные для данной специальности и расположить их по семестрам оптимальным образом.

Допустимым учебным планом называют учебный план, отвечающий перечню определенных требований. Данный перечень можно разбить на две группы; количественные ограничения и качественные ограничения. Список основных ограничений, которые используются большинством авторов, разрабатывавших учебные планы приведен в [15, 16]. Необходимая формализация перечисленных ограничений приведена в [14, 17].

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.

Введем необходимые обозначения. Пусть все содержание обучения представлено множеством дисциплин, изучаемых по данной специальности.

$$S_o = \{D_1, \dots, D_i, \dots, D_n\}, \quad (1)$$

где n – количество изучаемых дисциплин по специальности;
 S_o – содержание обучения;
 D_i – содержание i -й дисциплины.

$$D_i = \{M_1, \dots, M_j, \dots, M_l\}, \quad (2)$$

где M_j – j -й модуль дисциплины;
 l – количество модулей в дисциплине.

Если суммарный объем всех учебных модулей превышает допустимый объем учебного плана, то учебным планом будет являться некоторое подмножество множества S_o , суммарный объем модулей которого не превышает допустимый объем учебного плана.

Объем преподавания дисциплин оценивается в зачетных единиц трудоемкости (ЗЕТ). ЗЕТ равна 36 часам учебной нагрузки.

Помимо, чисто логических ограничений “модули преподаются одновременно/неодновременно”, “модуль i предшествует модулю j ”, дополнительно накладываются числовые ограничения типа “для определенной совокупности модулей (например, в одном семестре, в рамках дисциплины и т.п.) отводится не более чем предписанное количество зачетных единиц трудоемкости (ЗЕТ)”. Следовательно, требуется совместно обрабатывать количественные и качественные ограничения представленных типов. С точки зрения авторов, подобную обработку целесообразно производить в рамках технологии программирования в ограничениях.

Рассмотрим небольшой фрагмент задачи составления *учебного плана* для бакалавриата по направлению 230400.62 – «Информационные системы и технологии» факультета Информатики и прикладной математики КФ ПетрГУ.

Необходимо распределить по первым четырем семестрам обучения дисциплины математического цикла. Объем преподавания дисциплин оценивается в зачетных единицах трудоемкости (ЗЕТ). Весь объем преподавания дисциплин математического цикла делится на базовую и вариативную часть. Данный фрагмент является упрощенным, в частности, не рассматриваются ограничения на количество аудиторных часов в неделю, количество экзаменов и зачетов и т.п. Опишем перечень дисциплин математического цикла и ограничения, которые необходимо учесть при составлении учебного плана.

Обозначим для дисциплин *базовой части*:

$D_1 = \{M_{11}, M_{12}\}$ – дисциплина 1 – Математика, общее количество ЗЕТ – 14, содержит два модуля по 6 и 8 ЗЕТ;

$D_2 = \{M_{21}, M_{22}\}$ – дисциплина 2 – Математический анализ, общее количество ЗЕТ – 9, содержит два модуля по 6 и 3 ЗЕТ;

$D_3 = \{M_{31}\}$ – дисциплина 3 – Дискретная математика, общее количество ЗЕТ – 2, содержит один модуль.

$D_4 = \{M_{41}\}$ – дисциплина 4 – Теория вероятностей и математическая статистика, общее количество ЗЕТ – 3, содержит один модуль.

Для дисциплин *вариативной части*:

$D_5 = \{M_{51}\}$ – дисциплина 5 – Аналитическая геометрия, общее количество ЗЕТ – 7, содержит один модуль;

$D_6 = \{M_{61}\}$ – дисциплина 6 – Линейная алгебра, общее количество ЗЕТ – 3, содержит один модуль;

$D_7=\{M_{71}, M_{72}\}$ – дисциплина 7 – Дифференциальные уравнения, общее количество ЗЕТ – 5, содержит два модуля по 2 и 3 ЗЕТ;

$D_8=\{M_{81}, M_{82}\}$ – дисциплина 8 – Дифференциальные уравнения в частных производных, общее количество ЗЕТ – 5, содержит два модуля по 2 и 3 ЗЕТ;

Количественные ограничения:

1. На базовую часть дисциплин математического цикла отводится на более чем 30 зачетных единиц трудоемкости (ЗЕТ).

2. На вариативную часть отводится не более 26 ЗЕТ.

3. В течение одного семестра допустимо преподавание не более чем 20 ЗЕТ дисциплин математического цикла.

4. В каждом семестре должно преподаваться не менее двух и не более 5 дисциплин математического цикла.

5. Дисциплины вариативной части могут преподаваться одновременно с дисциплинами базовой части, но не более одной в семестр.

6. Объем преподавания одной дисциплины в семестр не может превышать 8 ЗЕТ.

Таким образом, введены обозначения и описаны количественные ограничения для приведенного перечня дисциплин.

К *качественным ограничениям* отнесем следующие:

1. Преподавание одной дисциплины ведется непрерывно (модули дисциплины преподаются в соседних семестрах, если невозможно уложиться в один семестр).

2. Дисциплина D_3 преподается в первом семестре, а D_4 не может преподаваться в первом семестре.

3. Дисциплина D_6 , преподается непосредственно перед дисциплиной D_5 .

4. Модули дисциплины D_7 должны преподаваться в одном семестре.

5. Модули дисциплины D_8 должны преподаваться в одном семестре.

6. Дисциплина D_7 не может преподаваться в первом семестре.

7. Дисциплина D_2 , преподается после дисциплины D_1 .

8. Дисциплина D_8 , преподается непосредственно после дисциплины D_7 .

Требуется так расставить модули по четырём первым учебным семестрам, чтобы ограничения удовлетворялись.

Введем атрибуты, соответствующие модулям дисциплин, с доменами $\{1, 2, 3, 4\}$, где: 1 – первый семестр, 2 – второй семестр, 3 – третий семестр, 4 – третий семестр. Обозначения приведены в табл. 1.

Формулировка задачи опирается на два типа бинарных отношений: “преподавать до/позже чем” и “преподавать одновременно/не одновременно”.

Рассмотрим, как формализовать в виде *C*-систем отношения, соответствующие введенным качественным ограничениям.

Таблица 1

Список обозначений

Дисциплина	Базовая часть						Вариативная часть					
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8				
Модуль	M_{11}	M_{12}	M_{21}	M_{22}	M_{31}	M_{41}	M_{51}	M_{61}	M_{71}	M_{72}	M_{81}	M_{82}
Атрибут	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
Объем(ЗЕТ)	6	8	6	3	2	3	7	3	2	3	2	3

Представим *ограничение 7*: преподавание одной дисциплины ведется непрерывно (модули дисциплины преподаются в соседних семестрах, если невозможно уложится в один семестр).

$$C_7^1[X_1X_2] = \begin{bmatrix} \{1\} & \{1,2\} \\ \{2\} & \{2,3\} \\ \{3\} & \{3,4\} \\ \{4\} & \{4\} \end{bmatrix}, \quad C_7^2[X_3X_4] = \begin{bmatrix} \{1\} & \{1,2\} \\ \{2\} & \{2,3\} \\ \{3\} & \{3,4\} \\ \{4\} & \{4\} \end{bmatrix},$$

$$C_7^3[X_9X_{10}] = \begin{bmatrix} \{1\} & \{1,2\} \\ \{2\} & \{2,3\} \\ \{3\} & \{3,4\} \\ \{4\} & \{4\} \end{bmatrix}, \quad C_7^4[X_{11}X_{12}] = \begin{bmatrix} \{1\} & \{1,2\} \\ \{2\} & \{2,3\} \\ \{3\} & \{3,4\} \\ \{4\} & \{4\} \end{bmatrix}.$$

C-системы, формализующие это ограничение однотипны, но каждая описывает отношение между различными переменными, соответствующими разным модулям соответствующих дисциплин (см. табл. 1).

Ограничение 8: дисциплина D_3 преподается в первом семестре, а D_4 не может преподаваться в первом семестре.

$$C_8^1[X_5] = [\{1\}], \quad C_8^2[X_6] = [\{2,3,4\}].$$

Ограничение 9: дисциплина D_6 , преподается непосредственно перед дисциплиной D_5 .

$$C_9[X_8X_7] = \begin{bmatrix} \{1\} & \{2\} \\ \{2\} & \{3\} \\ \{3\} & \{4\} \end{bmatrix}.$$

Ограничение 10: модули дисциплины D_7 должны преподаваться в одном семестре.

$$C_{10}[X_9X_{10}] = \begin{bmatrix} \{1\} & \{1\} \\ \{2\} & \{2\} \\ \{3\} & \{3\} \\ \{4\} & \{4\} \end{bmatrix}.$$

Ограничение 11: модули D_8 должны преподаваться в одном семестре.

$$C_{11}[X_{11}X_{12}] = \begin{bmatrix} \{1\} & \{1\} \\ \{2\} & \{2\} \\ \{3\} & \{3\} \\ \{4\} & \{4\} \end{bmatrix}.$$

Ограничение 12: D_7 не может преподаваться в первом семестре.

$$C_{12}[X_9] = [\{2,3,4\}].$$

Ограничение 13: дисциплина D_2 , преподается после дисциплины D_1 .

$$C_{13}[X_2 X_3] = \begin{bmatrix} \{1\} & \{2,3,4\} \\ \{2\} & \{3,4\} \\ \{3\} & \{4\} \end{bmatrix}.$$

При формализации этого ограничения достаточно описать отношение между последним (вторым) модулем дисциплины D_1 и первым модулем дисциплины D_2 (табл. 1).

Ограничение 14: дисциплина D_8 , преподается непосредственно после дисциплины D_7 .

$$C_{14}[X_{10} X_{11}] = \begin{bmatrix} \{1\} & \{2\} \\ \{2\} & \{3\} \\ \{3\} & \{4\} \end{bmatrix}.$$

Ограничения C_{10} , C_{11} являются более жестким по сравнению с ограничениями C_7^3 и C_7^4 , поэтому более слабые ограничения при дальнейшем выводе не рассматриваются.

Для отображения последовательности распространения ограничений на рис. 1 приведен упрощенный вариант сети ограничений (домены переменных не отображаются). Сеть ограничений является двудольным графом: одна из долей графа – это множество переменных и текущие области определения этих переменных (домены переменных), другая доля – сами ограничения. Ребро связывает две вершины (переменную и ограничение) тогда и только тогда, когда эта переменная формирует схему данного отношения.

Стратегия вызова ограничений состоит в следующем: сначала активируются унарные ограничения. Затем вызываются бинарные ограничения в том порядке, который диктуется изменением доменов переменных в ходе предыдущих шагов вывода. Количественные ограничения рассматриваются по мере изменения доменов переменных и на рис. 1 не отображаются.

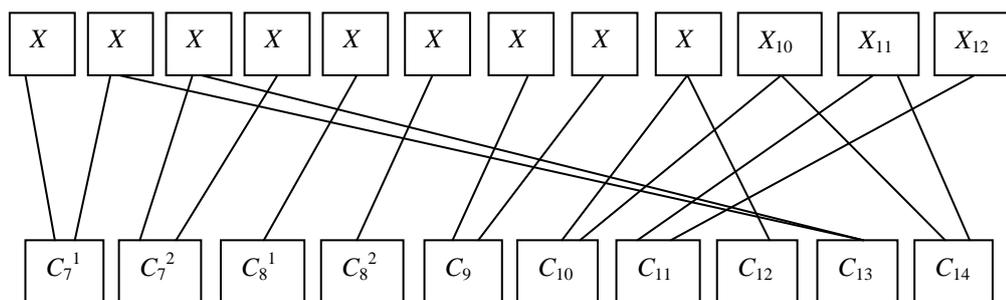


Рис. 1. Упрощенный вариант сети ограничений

Изначально, каждая переменная определена на домене $\{1, 2, 3, 4\}$. Сначала активируется унарное ограничение C_8^1 . Согласно **У3** домен переменной X_5 усекается до единственного значения $\{1\}$. Единственная компонента атрибута X_5 становится полной и по **У2** единственный атрибут удаляется из C -системы (сама

C -система исключается из рассмотрения), а в векторе текущего состояния переменная X_5 принимает значение «1».

Текущее состояние CSP:

$$X_5 - \{1\}.$$

Далее активируется ограничение C_8^2 . По аналогии с предыдущим шагом вывода получаем для $X_6 - \{2, 3, 4\}$.

Текущее состояние CSP:

$$X_5 - \{1\}, X_6 - \{2, 3, 4\}.$$

Активируя унарное ограничение C_{12} , сужаем домен переменной X_9 до множества $\{2, 3, 4\}$ и получаем **текущее состояние CSP:**

$$X_5 - \{1\}, X_6 - \{2, 3, 4\}, X_9 - \{2, 3, 4\}.$$

На данном этапе все унарные ограничения удовлетворены. Унарные ограничения C_8^1, C_8^2, C_{12} исключаются из дальнейшего рассмотрения по **У2**.

Поскольку домен переменной (атрибута) X_9 был усечен, то далее активируется бинарное ограничение C_{10} , содержащее в своей схеме переменную X_9 . Применяя **У5**, «настраиваем» C -систему C_{10} на новый домен переменной X_9 . Первая компонента первой строки данной C -системы становится пустой. Поэтому из C_{10} по **У4** удаляется первая строка:

$$\begin{array}{cc} X_9 & X_{10} \\ \{2,3,4\} & \{1,2,3,4\} \\ 2 \left[\begin{array}{cc} \{2\} & \{2\} \end{array} \right] \\ 3 \left[\begin{array}{cc} \{3\} & \{3\} \end{array} \right] \\ 4 \left[\begin{array}{cc} \{4\} & \{4\} \end{array} \right] \end{array}.$$

Анализируя второй столбец получившейся C -системы можно сузить домен переменной X_{10} до множества $\{2, 3, 4\}$, используя **У3**. Для удобства объяснения здесь и далее в верхних двух строках C -системы записываются имена атрибутов и множества допустимых значений этих атрибутов (домены атрибутов), а строки C -системы пронумерованы.

Текущее состояние CSP:

$$X_5 - \{1\}, X_6 - \{2, 3, 4\}, X_9 - \{2, 3, 4\}, X_{10} - \{2, 3, 4\}.$$

Далее активируем ограничение C_{14} , так как на предыдущем шаге изменился домен переменной X_{10} . При «настройке» C -системы C_{14} на новый домен переменной X_{10} с учетом **У5** и **У4**, удаляется первая строка:

$$\begin{array}{cc} X_{10} & X_{11} \\ \{2,3,4\} & \{2,3,4\} \\ 2 \left[\begin{array}{cc} \{2\} & \{3\} \end{array} \right] \\ 3 \left[\begin{array}{cc} \{3\} & \{4\} \end{array} \right] \end{array}.$$

Анализ первого столбца C -системы C_{14} позволяет по **У3** сократить домен переменной X_{10} до множества $\{2, 3\}$. Рассматривая второй столбец, заключаем по **У3**, что доменом переменной X_{11} становится множество $\{3, 4\}$.

Имеем **текущее состояние CSP:**

$$X_5 - \{1\}, X_6 - \{2, 3, 4\}, X_9 - \{2, 3, 4\}, X_{10} - \{2, 3\}, X_{11} - \{3, 4\}.$$

Следующий шаг состоит в том, что происходит повторный вызов ограничения C_{10} . Данное ограничение “настраивается” на домен переменной X_{10} (из ограничения удаляется четвертая строка, поскольку вторая компонента четвертой строки становится пустой при исключении “лишних” значений из компонент):

$$\begin{array}{cc} X_9 & X_{10} \\ \{2,3,4\} & \{2,3\} \\ 2 \left[\begin{array}{cc} \{2\} & \{2\} \end{array} \right] \\ 3 \left[\begin{array}{cc} \{3\} & \{3\} \end{array} \right] \end{array}.$$

Рассматривая первый столбец, из домена переменной X_9 удаляется значение “4”. Получаем следующее **текущее состояние CSP**:

$$X_5 - \{1\}, X_6 - \{2, 3, 4\}, X_9 - \{2, 3\}, X_{10} - \{2, 3\}, X_{11} - \{3, 4\}.$$

Теперь активируем ограничение C_{11} . По аналогии с предыдущими шагами выполняем следующие преобразования. Из C_{11} удаляются первые две строки и ограничение принимает вид:

$$\begin{array}{cc} X_{11} & X_{12} \\ \{3,4\} & \{1,2,3,4\} \\ 3 \left[\begin{array}{cc} \{3\} & \{3\} \end{array} \right] \\ 4 \left[\begin{array}{cc} \{4\} & \{4\} \end{array} \right] \end{array}.$$

Очевидно, что домен переменной X_{12} усекается до множества $\{3, 4\}$. Запишем полученное на этом шаге **текущее состояние CSP**:

$$X_5 - \{1\}, X_6 - \{2, 3, 4\}, X_9 - \{2, 3\}, X_{10} - \{2, 3\}, X_{11} - \{3, 4\}, X_{12} - \{3, 4\}.$$

Теперь активируем ограничение C_9 . Из анализа столбцов данной C -системы, пользуясь **УЗ**, сужаем домены X_7, X_8 до множеств $\{2, 3, 4\}, \{1, 2, 3\}$, соответственно. Имеем:

$$\begin{array}{cc} X_8 & X_7 \\ \{1,2,3\} & \{2,3,4\} \\ 1 \left[\begin{array}{cc} \{1\} & \{2\} \end{array} \right] \\ 2 \left[\begin{array}{cc} \{2\} & \{3\} \end{array} \right] \\ 3 \left[\begin{array}{cc} \{3\} & \{4\} \end{array} \right] \end{array}.$$

Текущее состояние CSP:

$$X_5 - \{1\}, X_6 - \{2, 3, 4\}, X_7 - \{2, 3, 4\}, X_8 - \{1, 2, 3\}, X_9 - \{2, 3\}, X_{10} - \{2, 3\}, X_{11} - \{3, 4\}, X_{12} - \{3, 4\}.$$

Для дальнейшего успешного распространения ограничений необходимо прибегнуть к проверке количественного ограничения C_5 .

Напомним, что дисциплины вариативной части имеют индекс, начиная с цифры 7. Из полученных соответствий и количественного ограничения C_5 (дисциплины вариативной части могут преподаваться одновременно с дисциплинами базовой части, но не более одной в семестр) очевидно, что X_8 должна преподаваться в 1 семестре:

Текущее состояние CSP:

$X_5 - \{1\}, X_6 - \{2, 3, 4\}, X_7 - \{2, 3, 4\}, X_8 - \{1\}, X_9 - \{2, 3\}, X_{10} - \{2, 3\}, X_{11} - \{3, 4\}, X_{12} - \{3, 4\}.$

Далее снова активируем C_9 , поскольку изменился домен переменной X_8 . В процессе “настройки” C -системы C_9 на новый домен первые компоненты второй и третьей строк матрицы становятся пустыми (по **У5**) и, следовательно, данные строки удаляются (по **У4**). Имеем:

$$\begin{array}{cc} X_8 & X_7 \\ \{1\} & \{2,3,4\} \\ 1[\{1\} & \{2\}] \end{array}.$$

Тогда домен переменной X_7 становится равным одноэлементному множеству $\{2\}$.

Текущее состояние CSP:

$X_5 - \{1\}, X_6 - \{2, 3, 4\}, X_7 - \{2\}, X_8 - \{1\}, X_9 - \{2, 3\}, X_{10} - \{2, 3\}, X_{11} - \{3, 4\}, X_{12} - \{3, 4\}.$

Далее для анализа снова привлекаем количественное ограничение C_5 . Из доменов переменных X_9 и X_{10} исключается значение “2”: $X_9 - \{3\}$ и $X_{10} - \{3\}$. Переменные X_9 и X_{10} могут принимать одно и то же значение, поскольку соответствуют модулям одной дисциплины (D_7). По аналогии, значение “3” исключается из доменов переменных X_{11} и X_{12} .

Текущее состояние CSP:

$X_5 - \{1\}, X_6 - \{2, 3, 4\}, X_7 - \{2\}, X_8 - \{1\}, X_9 - \{3\}, X_{10} - \{3\}, X_{11} - \{4\}, X_{12} - \{4\}.$

Для дальнейшего распространения ограничений необходимо учесть количественное ограничение C_6 . Переменные X_1 и X_2 , входящие в ограничение C_7^1 , соответствуют модулям одной дисциплины D_1 . Сумма их объемов составляет 14 ЗЕТ (см. табл. 1), что противоречит количественному ограничению C_6 – “объем преподавания одной дисциплины в семестр не может превышать 8 ЗЕТ”. Таким образом, модули этой дисциплины не могут преподаваться в одном семестре, значит должны преподаваться в соседних. Аналогично, превышает суммарный объем преподавания в семестр для переменных X_3, X_4 , входящих в ограничение C_7^2 , которые также соответствуют модулям одной дисциплины D_2 .

Тогда из компонент ограничений C_7^1 и C_7^2 удаляются “лишние” значения, а в преобразованных ограничениях остаются только те пары значений, которые не противоречат количественному ограничению C_6 : преподавание модулей дисциплин D_1 и D_2 в соседних семестрах. Ограничения примут вид:

$$\begin{array}{cc} \text{Ограничение } C_7^1 & \text{Ограничение } C_7^2 \\ \begin{array}{cc} X_1 & X_2 \\ \{1,2,3,4\} & \{1,2,3,4\} \\ 1 \begin{bmatrix} \{1\} & \{2\} \\ \{2\} & \{3\} \\ \{3\} & \{4\} \end{bmatrix} \end{array} & \begin{array}{cc} X_3 & X_4 \\ \{1,2,3,4\} & \{1,2,3,4\} \\ 1 \begin{bmatrix} \{1\} & \{2\} \\ \{2\} & \{3\} \\ \{3\} & \{4\} \end{bmatrix} \end{array} \end{array}.$$

Исходя из анализа столбцов, из доменов переменных по **У3** исключаются лишние значения.

Текущее состояние CSP:

$X_1 - \{1, 2, 3\}$, $X_2 - \{2, 3, 4\}$, $X_3 - \{1, 2, 3\}$, $X_4 - \{2, 3, 4\}$, $X_5 - \{1\}$,
 $X_6 - \{2, 3, 4\}$, $X_7 - \{2\}$, $X_8 - \{1\}$, $X_9 - \{3\}$, $X_{10} - \{3\}$, $X_{11} - \{4\}$, $X_{12} - \{4\}$.

Активируем ограничение C_{13} . Тогда при “настройке” ограничения C_{13} на новые домены получаем (по аналогии с предыдущими шагами):

$$\begin{array}{cc} X_2 & X_3 \\ \{2,3,4\} & \{1,2,3\} \\ 2[\{2\} & \{3\}]. \end{array}$$

Теперь на основании анализа столбцов полученной матрицы можно сузить домены переменных X_2 и X_3 до множеств $\{2\}$ и $\{3\}$, соответственно. Ограничение C_{13} исключается из дальнейшего рассмотрения.

Текущее состояние CSP:

$X_1 - \{1, 2, 3\}$, $X_2 - \{2\}$, $X_3 - \{3\}$, $X_4 - \{2, 3, 4\}$, $X_5 - \{1\}$, $X_6 - \{2, 3, 4\}$,
 $X_7 - \{2\}$, $X_8 - \{1\}$, $X_9 - \{3\}$, $X_{10} - \{3\}$, $X_{11} - \{4\}$, $X_{12} - \{4\}$.

Далее снова активируются ограничения C_7^1 и C_7^2 . При их “настройке” на новые домены переменных X_2 и X_3 имеем:

$$\begin{array}{cc} \text{Ограничение } C_7^1 & \text{Ограничение } C_7^2 \\ X_1 & X_2 & X_3 & X_4 \\ \{1,2,3\} & \{2\} & \{3\} & \{2,3,4\} \\ 1[\{1\} & \{2\}] & 3[\{3\} & \{4\}] \end{array}$$

Анализ столбцов полученной матрицы показывает, что можно домены переменных X_1 и X_4 до множеств $\{1\}$ и $\{4\}$, соответственно.

Ограничения C_7^1 и C_7^2 исключаются из рассмотрения, поскольку полностью конкретизировались значения переменных $X_1 - X_4$.

Получим окончательное решение:

$X_1 - \{1\}$, $X_2 - \{2\}$, $X_3 - \{3\}$, $X_4 - \{4\}$, $X_5 - \{1\}$, $X_6 - \{2, 3, 4\}$, $X_7 - \{2\}$,
 $X_8 - \{1\}$, $X_9 - \{3\}$, $X_{10} - \{3\}$, $X_{11} - \{4\}$, $X_{12} - \{4\}$.

Действительно, еще не учтенные количественные ограничения $C_1 - C_4$ не нарушаются. Суммарный объем дисциплин базовой части составляет 28 ЗЕТ – ограничение C_1 удовлетворяется. Суммарный объем дисциплин вариативной части составляет 20 ЗЕТ – ограничение C_2 удовлетворяется. В первом семестре преподаются модули дисциплин, соответствующие переменным X_1 , X_5 и X_8 , объем этих модулей – 16 ЗЕТ. Во втором семестре преподаются модули дисциплин, соответствующие переменным X_2 и X_7 , объем этих модулей – 15 ЗЕТ. В третьем семестре преподаются модули дисциплин, соответствующие переменным X_3 , X_9 и X_{10} , объем этих модулей составляет 11 ЗЕТ. В четвертом семестре преподаются модули дисциплин, соответствующие переменным X_4 , X_{11} и X_{12} , объем этих модулей – 8 ЗЕТ. Ограничения C_3 , C_4 удовлетворяются.

Таким образом, поскольку переменная X_6 соответствует модулю M_{41} дисциплины D_4 (табл. 1), суммарный объем которой составляет 3 ЗЕТ и дисциплина входит в базовую часть, она может быть добавлена без нарушения как количественных, так и качественных ограничений в любой семестр, кроме первого (по ограничению C_8).

Итак, в *первом* семестре преподаются: математика (первая часть), дискретная математика и линейная алгебра. Во *втором* семестре преподаются: математика (вторая часть) и аналитическая геометрия. В *третьем* семестре преподаются: математический анализ (первая часть) и дифференциальные уравнения. В *четвертом* семестре преподаются: математический анализ (вторая часть) и дифференциальные уравнения в частных производных. Теория вероятностей и математическая статистика должна быть добавлена по выбору в любой семестр кроме первого.

Проведенные исследования показали, что предлагаемый аппарат, основанный на представлении данных и знаний в виде матрицеподобных структур, позволяет успешно решать, в том числе, и задачи планирования.

Заключение

Применение авторских методов распространения ограничений к задаче формирования учебных планов для ВУЗов позволяет решать, в том числе, и задачи планирования. Представление качественных и количественных зависимостей (ограничений) предметной области в виде С-систем дает возможность “сжато” представлять зависимости между параметрами модели и эффективно их обрабатывать. Применение разработанных методов позволяет совместно обрабатывать качественные и количественные ограничения и решать задачу формирования учебного плана за полиномиальное время. Использование предлагаемых методов ускоряет традиционные алгоритмы удовлетворения ограничений и расширяет область применения подобных алгоритмов.

Литература

1. Фридман, О.В. Анализ программных продуктов для автоматизации формирования учебного плана вуза / О.В. Фридман // Труды Кольского научного центра РАН, Информационные технологии. – Вып. 6. - Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2015. – С.152-175.
2. Зуенко, А.А., Фридман, О.В. Применение методов распространения ограничений для формирования учебных планов вузов / А.А. Зуенко, О.В. Фридман // Качество, инновации, образование. – 2016. - 17 с.
3. Russel, S., & Norvig, P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3rd ed. Pearson Education, 2010. -1152 p.
4. Rossi, F., van Beek, P. & Walsh, T. Constraint Programming. In F. van Harmelen, V. Lifschitz, B. Porter (Eds.), Foundations of Artificial Intelligence. Handbook of Knowledge Representation, 2008, vol. 3. -P.181-211.
5. Ruttkay, Zs. Constraint satisfaction a survey, CWI Quarterly, 1998, vol. 11. -P.163–214.
6. Кулик, Б.А. Алгебраический подход к интеллектуальной обработке данных и знаний / Б.А. Кулик, А.А. Зуенко, А.Я. Фридман. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. -235 с.
7. Zakrevskij, A. 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.
8. Зуенко, А.А. Матрицеподобные вычисления при обработке недоопределенных знаний в производственных системах (на примере задачи выбора технологии обогащения минерального сырья) / А.А. Зуенко, О.В. Фридман // Труды ИСА РАН. – Т.65-1, 2015. – С.44-56.

9. 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.
10. 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 научн.-техн. конф., г. Минск, 19-21 февраля 2015 г. – Минск: БГУИР, 2015. – С.297-301.
11. Зуенко, А.А. Совместное применение алгоритмов фильтрации и распространения ограничений на основе матриц ограничений / А.А. Зуенко // Системный анализ и информационные технологии (САИТ-2015): труды Шестой Международной конф., Калининградская обл., г. Светлогорск, 15-20 июня 2015 г., в 2-х т. -М.: ИСА РАН, 2015. – Т. 1– С.56-66.
12. Зуенко, А.А. Качественное моделирование технических систем на основе методов распространения ограничений / А.А. Зуенко // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2016): материалы VI Международной научно-техн. конф., г. Минск, 18-20 февраля 2016 г. – Минск: БГУИР, 2016. – С.573-578.
13. Зуенко, А.А. Применение методов распространения ограничений в слабо формализованных предметных областях / А.А. Зуенко // Пятнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ- 2016: труды конференции, г. Смоленск, 3-7 октября 2016 г. – Смоленск: Универсум, 2016. - Т3. -С.22-30.
14. Трофимова, О.К. Автоматизация процесса составления учебных планов вузов: дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук /Трофимова О.К. -М., 1999. -125 с.
15. Карпов, В.И. Составление учебных планов вузов с помощью ЭЦВМ / В.И. Карпов // Применение ЭЦВМ для автоматизации обучения и управления учебными заведениями. -Киев, 1972. – С.121-130.
16. Гусев, В. В. Система моделей и методов рационального планирования и организации учебного процесса в вузе / В.В. Гусев; ред. Н.Я. Краснер. – Воронеж : Изд-во Воронежского ун-та, 1984. -151с.
17. Бейгуленко, О.Я. Методические рекомендации по разработке учебных планов бакалавриата и магистратуры / О.Я. Бейгуленко. URL. – Режим доступа: <http://ed.dgu.ru/Content/plans.pdf> (10.10.2016).

Сведения об авторах

Зуенко Александр Анатольевич – к.т.н, старший научный сотрудник,
e-mail: zuenko@iimm.ru

Alexander A. Zouenko – Ph.D. (Tech. Sci.), a senior researcher

Фридман Ольга Владимировна – к.т.н, старший научный сотрудник,
e-mail: ofridman@iimm.ru

Olga V. Fridman – Ph.D. (Tech. Sci.), a senior researcher

УДК 004.94

Д.Н. Халиуллина¹, В.В. Быстров^{1,2}, С.Н. Малыгина^{1,2}

¹ Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

² ФГБОУ ВО «Мурманский арктический государственный университет»

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПОТРЕБНОСТИ В КАДРАХ ОТРАСЛЕЙ ЭКОНОМИКИ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация

В статье представлен краткий отчет о проделанной научно-исследовательской работе по заказу Комитета по труду и занятости населения Мурманской области, посвященной прогнозированию дополнительной кадровой потребности региона. Описывается методология проведения исследования, основанная на интеграции как утвержденных методик составления прогнозов, так и средств имитационного моделирования. Особенностью предлагаемой методологии является получение детального прогноза кадровой потребности в различных срезках: по видам экономической деятельности, профессиям и должностям, образовательным программам.

Ключевые слова:

кадровая потребность, трудовые ресурсы, методика прогнозирования, имитационное моделирование.

D.N. Khaliullina, V.V. Bystrov, S.N. Malygina

FORECASTING ADDITIONAL STAFFING NEEDS OF THE MURMANSK REGION ECONOMY BRANCHES

Abstract

The article presents a brief report on the research work by order of the Committee on labor and employment of population of Murmansk region. This work is dedicated to forecasting additional staffing needs in the region. The methodology used in the research is based on the integration of approved methods of forecasting and simulation tools. Feature of the proposed methodology is to obtain a detailed forecast of personnel needs in various aspects: by types of economic activities, by professions and positions, by educational programs.

Keywords:

staffing requirements, labor resources, methods of forecasting, simulation.

Введение

Мурманская область - регион, входящий в состав Арктической зоны России, условия жизнедеятельности в котором специфичны и зависят от таких особенностей как: экстремальные природно-климатические условия, очаговый характер освоения территорий, низкая плотность населения, преобладание предприятий, ориентированных на добычу и первичную переработку природных ресурсов.

Указанные особенности определяют демографическую ситуацию Мурманской области, которая в течение длительного периода характеризуется устойчивой тенденцией снижения численности населения. Так, в период 2000-2015 гг. численность населения региона сократилась на 175 тыс. чел., что

подтверждается данными официальной статистики Мурманской области, представленными на рис. 1.



Рис. 1. Статистические данные по населению Мурманской области

Основная причина такой ситуации - миграционная убыль населения. За период с 2000 по 2015 год в область прибыло 352745 человек, а покинуло – 458153 человека. Отток населения составил 105408 человек за данный временной промежуток (рис. 2).

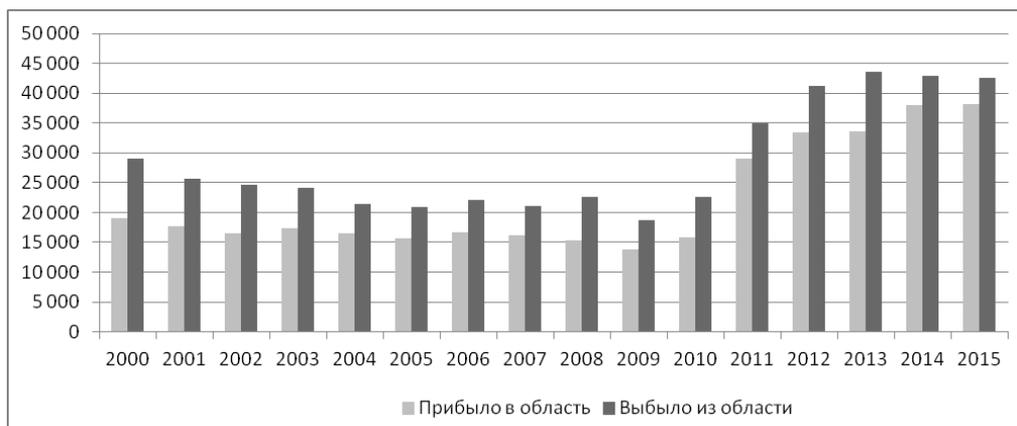


Рис. 2. Миграционные процессы Мурманской области (чел.)

Миграционные процессы со странами ближнего зарубежья являются единственным источником увеличения численности населения регионов Крайнего Севера. Особенностью социально-демографической структуры региональной миграции является высокая доля в миграционных потоках лиц трудоспособного возраста (66% от общего числа мигрантов), большая часть которых является высококвалифицированными кадрами.

Несмотря на некоторое увеличение миграционного притока трудоспособного населения в Мурманскую область в 2014-2015 годах, основным

источником трудовых ресурсов для региона остается местное население. При этом сохраняется негативная тенденция оттока из региона молодежи, обусловленная тем, что из выехавших за пределы региона для получения профессионального образования молодых людей, обратно возвращается только небольшая их часть. Одна из причин такой тенденции - отсутствие рабочих мест по получаемой квалификации, что приводит к безработице. Дисбаланс между спросом и предложением рынка труда и рынка образовательных услуг усугубляет данное положение. Так, несмотря на дефицит инженерных специальностей в 2013 г. среди выпускников вузов региона наиболее популярными группами направлений подготовки и специальностей являлись экономика и управление (42.6 %) и гуманитарные науки (20.6 %) [3].

Начиная с 2012 года, наблюдалась тенденция по снижению количества безработных в области (с 36,3 до 30,7 тыс. человек), но за последний год она поменялась в обратную сторону (вновь выросло до 35,3 тыс. человек). Количество занятых с 2008 по 2015 год падало (рис. 3), причем в структуре безработных граждан около 14% составляли граждане, уволенные в связи с ликвидацией предприятия, либо сокращением численности работников. Наибольшее число высвобождаемых (более 50%) составили работники предприятий сферы добычи полезных ископаемых [2]. Примером данных явлений может служить оптимизация бизнес-процессов и реструктуризация на градообразующем предприятии Апатитско-Кировского района ОАО «Апатит» с выделением части активов в качестве подрядных организаций [1].



Рис. 3. Трудовые ресурсы Мурманской области (тыс. чел.)

Для предотвращения оттока населения, обусловленного ухудшением ситуации на региональном рынке труда, необходимо наладить взаимодействие региональных властей и крупных предприятий с учреждениями высшего и среднего профессионального образования для обеспечения трудоустройства выпускников заведений и популяризации специальностей, актуальных для экономики Мурманской области [4]. Поиск подходов и методов решения обозначенной проблемы занимаются региональные органы исполнительной власти. Как следствие, Комитет по труду и занятости Мурманской области поставил задачу по проведению научно-исследовательской работы по следующим направлениям:

- актуализация прогноза дополнительной потребности в кадрах предприятий и организаций Мурманской области;
- определение оптимальной численности выпускников образовательных организации для удовлетворения кадровой потребности экономики Мурманской области.

Методология прогнозирования

Вычисление прогнозных значений потребностей социально-экономической системы Мурманской области в кадрах осуществлялось на основе комбинированного использования нескольких методик расчетов:

- Методика разработки прогноза баланса трудовых ресурсов, утвержденная приказом Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 29 февраля 2012 г. № 178н [5]. Данная методика предусматривает разработку прогноза баланса трудовых ресурсов на очередной год и прогнозный период (плановый 2-летний период) по видам экономической деятельности (ВЭД) в соответствии с перечнем разделов Общероссийского классификатора видов экономической деятельности (ОКВЭД). Основой для разработки прогноза являются данные, предоставляемые органами службы государственной статистики.

- Методика «Центра бюджетного мониторинга» Петрозаводского государственного университета под руководством Гуртова В.А. [6]. Методика позволяет осуществлять прямое и обратное преобразование данных о необходимом количестве мест по направлениям подготовки в (/из) данные (/ых) о необходимом количестве работников по их категориям.

- Методы экстраполяции данных. Применялись для получения временных рядов с информацией о прогнозируемой потребности в кадрах в соответствии с Общероссийским классификатором профессий рабочих, должностей служащих и тарифных разрядов (ОКПДТР).

- Имитационное моделирование. Имитационные модели разрабатывались с использованием агентного и системно-динамического моделирования, а в некоторых случаях применялась также технология концептуальных шаблонов. Часть моделей была направлена на исследование планируемых инвестиционных проектов, которые предусматривают создание новых рабочих мест. Серии имитационных экспериментов обеспечили расчет корректировок значений базовых трендов динамики численности занятых в экономике с учетом видов экономической деятельности и профессионально-квалификационной структуры трудовых ресурсов.

- Экспертные оценки. Применялись для корректировки различных данных, а также для анализа полученных результатов.

- Матрицы соответствия. Создавались для решения двух взаимосвязанных задач:

1. Распределение данных классификатора служащих и рабочих (ОКПДТР) по видам экономической деятельности (ОКВЭД).

2. Преобразование данных о потребности работодателей в конкретных специалистах, служащих и рабочих (в соответствии с ОКПДТР) в данные о потребности в выпускниках по конкретным направлениям подготовки в соответствии с утвержденным перечнем укрупненных групп специальностей Министерства образования и науки РФ.

Концептуальная схема предлагаемой методики прогнозирования представлена на рис. 4.



Рис. 4. Концептуальная схема прогнозирования дополнительной потребности (СОУ-среднее образовательное учреждение; ОУ-образовательное учреждение)

При практической реализации предложенной методологии возник ряд проблем, связанных с неполнотой исходной информации от различных источников. Рассмотрим данные проблемы и предложенные решения более подробно.

Дополнительная потребность региона в кадрах возникает в связи с естественным выбытием работников с предприятий, а также в соответствии с появлением новых рабочих мест за счет запуска новых производств или расширения имеющихся предприятий (инвестиционные проекты). Анализ предоставленных исходных данных от работодателей по планируемым проектам выявил недостаточность информации, что затрудняет составление точного прогноза. Одним из вариантов решения данной проблемы является разработка имитационных моделей, которые позволяют дополнить исходный набор данных результатами моделирования различных вариантов реализации инвестиционных проектов предприятий Мурманской области.

Согласно техническому заданию получаемый прогноз дополнительной потребности должен содержать информацию в разрезе должностей по ОКПДТР, а также в разрезе ВЭД. В результате анализа существующих классификаторов соответствия ОКПДТР и ОКВЭД, а также методов сопоставления данных было принято решение разработать механизм отображения данных из ОКПДТР в ОКВЭД. В качестве предложенного механизма используются матрицы соответствия рассматриваемых классификаторов, которые формируются на основе профессиональных стандартов РФ. При отсутствии разработанных профессиональных стандартов Министерства труда РФ для получения необходимой информации по профессиям рабочих и должностей служащих проводился анализ типовых должностных инструкций.

В связи с переходом системы высшего образования РФ на новые федеральные образовательные стандарты (ФГОС), согласно которым высшее образование приобрело другую структуру (бакалавриат, магистратура и специалист), возникла задача преобразования данных по выпускникам в удобную для последующего анализа форму. Использование экспертных данных позволило отобразить старую структуру системы образования в актуальные на данный момент укрупненные группы направлений подготовки и специальностей.

В ходе анализа исходных статистических данных возникали ситуации, когда наблюдались иррегулярные отклонения временных рядов, что затрудняло процесс построения прогноза дополнительной потребности. Чтобы увеличить точность прогноза, использовались численные методы сглаживания.

Обновление данных официальной статистики происходит с временной задержкой. В связи с этим при расчете дополнительной потребности в настоящей работе были использованы прогнозные значения для некоторых показателей.

Методики прогнозирования

Согласно приведенной выше схеме (рис. 4) процесс прогнозирования дополнительной потребности в кадрах отраслей экономики можно разбить на два этапа. Первый этап состоит в актуализации прогноза дополнительной потребности, второй – подразумевает под собой определение оптимальной численности выпускников образовательных организации для удовлетворения кадровой потребности экономики региона.

Методика прогнозирования дополнительной потребности

Вычисление дополнительной кадровой потребности отраслей Мурманской области сводится к выполнению 7 этапов, которые представлены на общей схеме (рис. 5).



Рис. 5. Методика прогнозирования дополнительной потребности

Рассмотрим эти этапы более подробно:

1. Обработка данных Центра занятости (ЦЗ) Мурманской области. Центром занятости были предоставлены сведения на бумажных носителях о количестве вакансий, трудоустроенных, обращений в ЦЗ, высвобожденных рабочих местах за 2007-2015 гг. в разрезе ОКПДТР. Данная информация была подвергнута предварительной обработке, что позволило сформировать таблицы размерностью 1136x9 и 1036x9, каждая запись которых соответствует конкретной должности или профессии регионального рынка труда.

2. Построение временных рядов профессий рабочих и должностей служащих. Для каждой записи из полученных таблиц строился тренд с помощью методов экстраполяции: полиномиальной, логарифмической, экспоненциальной или степенной. Вид аппроксимирующей функции определялся исходя из наименьшего среднеквадратичного отклонения для выбранного набора данных.

3. Анализ инвестиционных проектов. Проводился анализ предоставленных данных по существующим и планируемым инвестиционным проектам, в результате которого определялось количество вновь создаваемых рабочих мест. Использование этой информации позволило произвести корректировку трендов, полученных на этапе 2.

4. Имитационное моделирование. На данном этапе рассматривались инвестиционные проекты, по которым отсутствовала информация с конкретизацией по профессиям рабочих и должностям служащих. Использование набора системно-динамических моделей с имитацией планируемых инвестиционных проектов предприятий Мурманской области дало возможность получить дополняющие прогнозные данные. На рис. 6 представлен фрагмент системно-динамической модели «Реализация инвестпроекта», отвечающий за распределение рабочих мест в рамках рассматриваемого проекта.

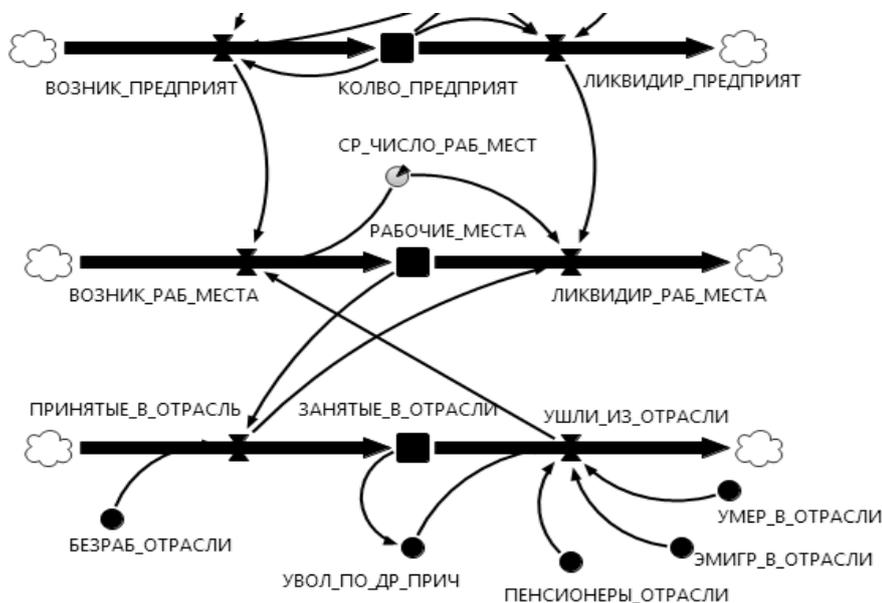


Рис. 6. Фрагмент системно-динамической модели для прогнозирования рабочих мест на предприятии

5. Коррекция данных экспертами. На данном этапе проводилось объединение данных, полученных на этапах 3 и 4, и экспертная оценка обобщенных результатов расчета дополнительной потребности в кадрах Мурманской области.

6. Формирование матриц соответствия. Данные, получаемые в результате предыдущих этапов, содержали информацию о дополнительной потребности по профессиям рабочих и должностям служащих в соответствии с ОКПДТР. Для распределения этих данных по видам экономической деятельности (по ОКВЭД) был проведен анализ уже существующих решений обозначенной проблемы, который не дал результатов. В конечном счете, необходимая информация по возможному распределению должностей и профессий по ВЭД и уровню образования извлекалась из профессиональных стандартов, их проектов и должностных инструкций, что позволило сформировать матрицы соответствия (1035x16 и 1133x16) данных из рассматриваемых классификаторов (ОКПДТР и ОКВЭД), которые с математической точки зрения представляют собой матрицы весовых коэффициентов. Весовые коэффициенты нормированы и имеют значение в диапазоне от 0 до 1.

7. Расчет дополнительной потребности по ВЭД и уровням образования. Расчет дополнительной потребности проводился с использованием сформированных матриц соответствия. Вычисления производились на основе линейных преобразований из алгебры матриц. В результате была получена таблица распределения дополнительной потребности по профессиям рабочих и должностям служащих по видам экономической деятельности и уровням образования (размерностью 2168x160).

Методика прогнозирования выпускников образовательных организаций

Данная методика позволяет определить оптимальную численность выпускников образовательных организации для удовлетворения кадровой потребности экономики региона. В рамках проводимого исследования под оптимальной численностью выпускников будем понимать требуемое количество выпускников по соответствующим образовательным программам, которое необходимо региону для удовлетворения кадровой потребности, полученной в результате прогнозирования на 2016-2025 гг. Основные этапы методики представлены на рис. 7.

1. Описание социально-экономической ситуации в регионе. Данный этап представляет собой расчет дополнительной потребности в кадрах в соответствии с методикой, описанной выше (рис. 5). В результате были получены временные ряды прогнозируемой потребности в кадрах в соответствии с ОКПДТР.

2. Формирование экспертных матриц соответствия. Для распределения профессий и должностей по различным образовательным программам было принято решение разработать матрицы соответствия, которые использовались для преобразования данных о потребности работодателей в конкретных должностях и профессиях (по ОКПДТР) в данные о потребности в выпускниках по конкретным направлениям подготовки в соответствии с утвержденным перечнем Министерства образования и науки РФ. Матрицы были составлены для каждого уровня образования: высшее (размерностью 2168x359), среднее профессиональное (размерностью 2168x533).



Рис. 7. Методика прогнозирования выпускников образовательных организаций

3. Расчет кадровой потребности по подготовке высшего образования (ВО), среднего профессионального образования (СПО) и профессионального обучения. В результате матричных вычислений были получены временные ряды с потребностями в выпускниках в соответствии с перечнем Министерства образования и науки РФ.

4. Коррекция данных о потребностях в выпускниках. Наличие данного этапа обусловлено необходимостью учета в прогнозе сроков обучения и отсева обучающихся по различным причинам. Для этого были сформированы векторы корректирующих коэффициентов на основе анализа статистики образовательных учреждений и экспертных знаний. Для практической реализации этапа применялись линейные операции из алгебры матриц, что позволило получить сгенерированные временные ряды о выпускниках, закрывающих кадровую потребность экономики и социальной сферы Мурманской области.

5. Экспертиза полученных временных рядов. Для выявления возможных отклонений в результате автоматической обработки данных или ошибок, вызванных человеческим фактором, был проведен экспертный анализ прогнозных значений.

Результаты

Верификация полученных данных распределения трудовых ресурсов по видам экономической деятельности на 2016-2018 гг. проводилась в сопоставлении с прогнозом баланса трудовых ресурсов, рассчитанной Министерством экономического развития Мурманской области по официальной методике [5]. Результаты сравнения приведены в таблице.

Сравнение данных прогноза распределения трудовых ресурсов по видам экономической деятельности Мурманской области

	МинЭкономРазвития			Предлагаемая методика			Относительная погрешность		
	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2016	2017	2018
Вид экономической деятельности:	400210	395940	392000	405014	403454	402002	1,2%	1,9%	2,6%
Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство	3050	3020	3010	3329	3318	3308	9,1%	9,9%	9,9%
Рыболовство, рыбоводство	10700	10600	10600	10872	10792	10721	1,6%	1,8%	1,1%
Добыча полезных ископаемых	15250	15100	14950	15366	15273	15188	0,8%	1,1%	1,6%
Обрабатывающие производства	43460	43460	43500	42152	41616	41092	3,0%	4,2%	5,5%
Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	20250	20150	19890	20894	20890	20886	3,2%	3,7%	5,0%
Строительство	24100	24000	23800	23945	23876	23804	0,6%	0,5%	0,0%
Оптовая и розничная торговля; ремонт автотранспортных средств, мотоциклов, бытовых изделий и предметов личного пользования	70350	69850	68520	70745	70860	70967	0,6%	1,4%	3,6%
Гостиницы и рестораны	9800	9500	9330	9717	9716	9715	0,8%	2,3%	4,1%
Транспорт и связь	40500	39170	38400	41008	40378	39812	1,3%	3,1%	3,7%
Финансовая деятельность	5500	5300	5000	5569	5586	5602	1,3%	5,4%	12,0%
Операции с недвижимым имуществом, аренда и предоставление услуг	33000	32700	32650	32822	32843	32862	0,5%	0,4%	0,6%
Государственное управление и обеспечение военной безопасности; социальное страхование	41020	40900	40800	42022	42038	42053	2,4%	2,8%	3,1%
Образование	32290	31720	31340	33142	32918	32712	2,6%	3,8%	4,4%
Здравоохранение и предоставление социальных услуг	31600	31420	31200	33239	33095	32962	5,2%	5,3%	5,6%
Предоставление прочих коммунальных, социальных и персональных услуг	19180	18890	18850	20192	20255	20318	5,3%	7,2%	7,8%

На основе анализа результатов сравнения данных (таблица) можно сделать вывод, что прогнозные значения распределения трудовых ресурсов по видам экономической деятельности, рассчитанные по рассматриваемым в таблице методикам, отличаются незначительно, что подтверждается значениями относительной погрешности по каждому виду деятельности. В среднем, значения данных настоящего исследования расходятся с прогнозом Министерства экономического развития от 0,5% до 9,6% в зависимости от вида деятельности. Общая погрешность по всем видам деятельности составила $\approx 3,5\%$. В целом, характер изменения численности занятого населения Мурманской области в обоих случаях совпадает, за исключением таких видов, как оптовая и розничная торговля, финансовая деятельность, государственное управление и обеспечение военной безопасности, предоставление прочих коммунальных, социальных и персональных услуг. В данных случаях наблюдается незначительное расхождение в прогнозах.

Согласно разработанной методологии был осуществлен прогноз общего числа занятых в разрезе уровней образования (рис. 8).

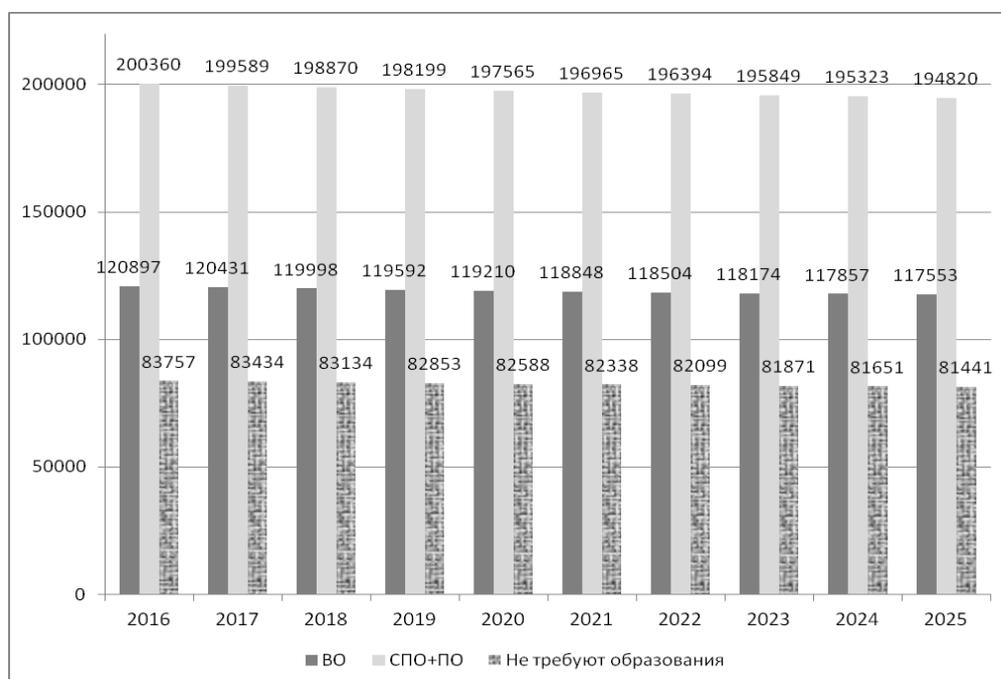


Рис. 8. Прогноз общего числа занятых в разрезе уровней образования (чел.)

Анализируя прогнозные данные, можно сделать вывод о том, что количество экономически занятого населения в регионе с каждым годом будет постепенно уменьшаться в среднем на 2,8% по каждому уровню образования. Это можно объяснить демографическими процессами, наблюдаемыми в последние годы в Мурманской области (рис.1, 3).

Прогноз общего количества экономически занятого населения использовался в качестве отправной точки расчета дополнительной кадровой потребности, в том числе и по уровню образования. На рис. 9 представлен

прогноз требуемых кадров с соответствующим уровнем образования для покрытия вакантных (высвобожденных и вновь создаваемых) мест предприятий и организаций области.

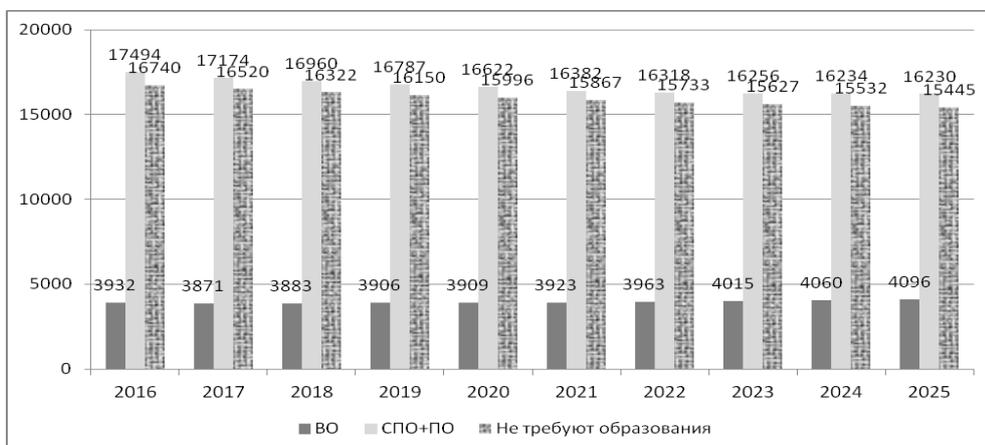


Рис. 9. Прогноз дополнительной кадровой потребности (чел.)

В целом наблюдается следующая тенденция: количество требуемых работников, имеющих высшее образование, с каждым годом будет увеличиваться (на 4% с 2016 по 2025 гг.), а количество работников со средним профессиональным образованием и прошедших профессиональное обучение на предприятиях, а также без требования к образованию будет уменьшаться (в среднем на 7,5% с 2016 по 2025 гг.). Это, в первую очередь, связано с высоким спросом на рынке труда медицинских специалистов, что вызвано отсутствием региональных высших учебных заведений, осуществляющих подготовку по данным направлениям. На рис. 10 представлены результаты прогноза дополнительной кадровой потребности в разрезе уровней образования, в который не включены работники без требования к образованию.



Рис. 10. Прогноз дополнительной кадровой потребности по уровням образования (чел.)

На рис. 11 и 12 представлены результаты прогноза наиболее востребованных должностей и профессий к 2025 году. Для наглядности и подтверждения наших предположений о причинах увеличения числа работников с высшим образованием, отмеченных выше, все должности медицинских специалистов были объединены в одну категорию - "врачи".

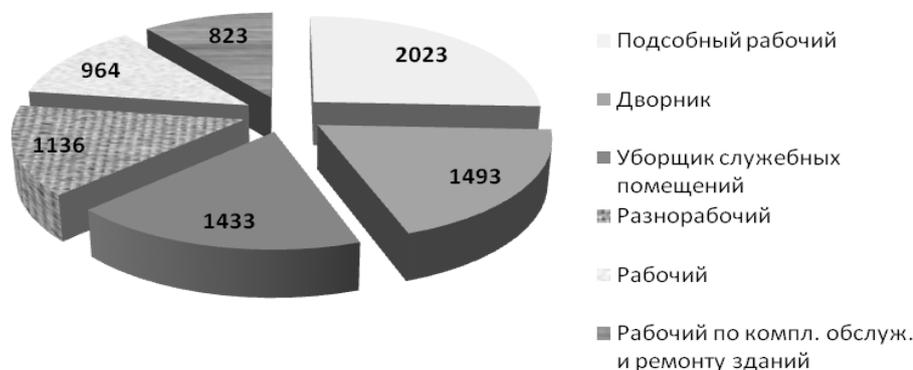


Рис. 11. Прогноз наиболее востребованных профессий рабочих и должностей служащих без требования к образованию на 2025 год (чел.)

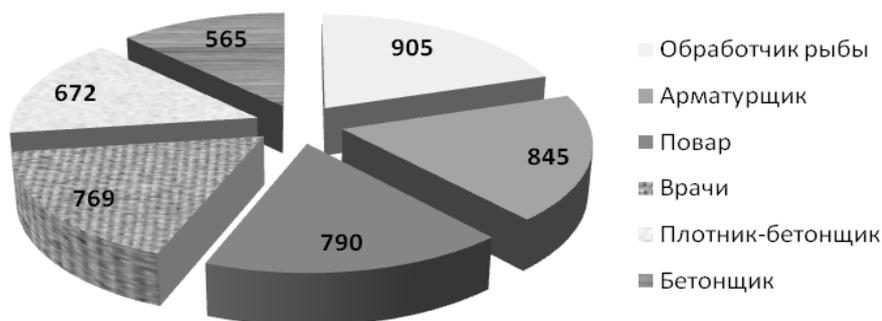


Рис. 12. Прогноз наиболее востребованных профессий рабочих и должностей служащих с образованием (ВО, СПО, профобучение) на 2025 год (чел.)

Заключение

Проведенный анализ выполненных прогнозов показал, что достаточно общей тенденцией, как занятости, так и дополнительных потребностей в рабочей силе по большинству видов экономической деятельности является рост доли работников с высшим образованием. Однако влияние этого роста по-разному сказывается на общих показателях в различных видах экономической деятельности, изменение значений которых, в большей мере, зависит от реализации конкретных инвестиционных проектов.

Особо следует отметить, что учет потенциальных последствий реализации инвестиционных проектов носит достаточно условный характер вследствие высокого уровня неопределенности информации о структуре перспективной кадровой потребности соответствующих хозяйствующих субъектов. Более

продуктивным представляется оперативное прогнозирование влияния на рынок труда региона того или иного инвестиционного проекта по мере появления достаточных данных по графику реализации и структуре определяемых проектом кадровых потребностей. Еще одной альтернативой является формирование «пакета» из прогнозов, рассчитанных для каждого из различных возможных вариантов развития инвестиционных проектов. В этом случае для лиц, принимающих решения, появляется возможность видеть и анализировать «лучшие», «худшие», и «промежуточные» варианты развития ситуации. Однако, для реализации указанных альтернативных подходов к формированию кадрового прогноза необходимы разработка и использование соответствующих программных инструментов. При отсутствии таких инструментов прогнозные показатели целесообразно актуализировать не реже одного раза в год, на основе уточненной статистической информации и новых конкретизированных данных об инвестиционной деятельности в регионе.

Литература

1. Корчак, Е.А. Миграционные процессы в формировании трудового потенциала Мурманской области / Е.А. Корчак // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №3. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13794> (21.10.2016).
2. Ситуация на рынке труда Мурманской области за 2013 г. // Управление государственной службы занятости населения Мурманской области. – Режим доступа: <http://murman-zan.ru/home/info/analitika.aspx>.
3. Иванова, М.В., Щеглова, А.Н. Возможности и ограничения инновационного развития регионов Севера / М.В. Иванова, А.Н. Щеглова // Север и рынок: формирование нового экономического порядка. –2015. –№ 2(45). – С.101-112.
4. Тесля, А.Б., Булачева, Л.В. Формирование и развитие трудового потенциала Арктической зоны Российской Федерации / А.Б. Тесля, Л.В. Булачева // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2015. – №3. – С.537-546.
5. Приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 29 февраля 2012 г. № 178н "Об утверждении Методики разработки прогноза баланса трудовых ресурсов". - Режим доступа: <http://base.garant.ru/70144878>
6. Математическое моделирование динамических процессов в системе «Экономика – рынок труда – профессиональное образование». - Режим доступа: <http://openbudgetrf.ru/>

Сведения об авторах

Халиуллина Дарья Николаевна – младший научный сотрудник,

e-mail: khaliullina@iimm.ru

Daria N. Khaliullina - junior researcher

Быстров Виталий Викторович – к.т.н., научный сотрудник,

e-mail: bystrov@iimm.ru

Vitaliy V. Bystrov - researcher

Малыгина Светлана Николаевна – к.т.н., научный сотрудник,

e-mail: malygina@iimm.ru

Svetlana N. Malygina - researcher

УДК 004.45, 004.5

А.В. Вицентий

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОЙ ГЕОВИЗУАЛИЗАЦИИ В ГЕОСОЦИАЛЬНЫХ МЕДИА*

Аннотация

В работе рассматривается возможность применения элементов адаптивной геовизуализации в геосоциальных сетях. Технология адаптивной визуализации геоданных может быть применена в современных геосоциальных сервисах для отображения геоинформации, а также для решения различных задач, связанных с визуализацией и обработкой геоинформации пользователями социальных медиа. Предложенная технология адаптивной визуализации геоданных может быть использована как для разработки новых геосоциальных сервисов, так и для улучшения работы существующих геосервисов в социальных медиа.

Ключевые слова:

социальные медиа, адаптивное геоизображение, гео-социальные сервисы, пространственно-временные данные, интерактивный визуальный анализ, адаптивная визуализация геоданных.

A.V. Vicentiy

APPLICATION OF ADAPTIVE GEOVISUALIZATION IN GEOSOCIAL MEDIA

Abstract

The paper considers the possibility of using elements of the adaptive geovisualization in the geo-social networks. The adaptive visualization technology of geodata can be applied in modern geo-social services, as well as to solve various problems related to the visualization and processing of geo-information by users of social media. This decreases the total cognitive load on the consumer of information. The proposed technology of adaptive visualization of geodata can be used for both the development of new geosocial services and to improve the performance of existing geoservices in social media.

Keywords:

social media, adaptive geoimages, geo-social service, spatiotemporal data, interactive visual analysis, adaptive visualization of geodata.

Введение

Взрывное развитие современных социальных медиа в последние годы оказывает все более значительное влияние на жизнь общества. В подтверждение данного тезиса можно привести активность законодателей по данному направлению, как в России, так и за рубежом. Количество нормативно-правовых актов, призванных регулировать деятельность как отдельных социальных медиа, так и Интернет-пространства в целом значительно возросло. Кроме того,

* Работа выполнена при финансовой поддержке Программы ОНИТ 1 РАН «Интеллектуальные информационные технологии, системный анализ и автоматизация».

предоставление различных государственных сервисов и услуг также в последние годы активно переносится в Интернет, что стимулирует граждан осваивать современные цифровые коммуникационные технологии.

Объединяя людей в виртуальном пространстве Интернета, подобные сервисы создают новую среду общения людей, новое виртуальное социальное пространство. Роль основных коммуникационных площадок в этом новом пространстве сегодня взяли на себя различные социальные сервисы и медиа ресурсы. Сложно отрицать тот факт, что появление и развитие современных социальных медиа изменило наше привычное взаимодействие с другими людьми и организациями. Обычному молодому человеку сегодня сложно представить себе, как группы людей объединялись для достижения какой-либо цели (социальной или нет) без использования Facebook, Twitter, Google Maps, LinkedIn и многих других средств для общения и передачи информации. Реальная глубина изменений нашего общества, которые связаны с развитием социальных медиа, еще недостаточно осознана. Однако это не мешает уже сейчас извлекать значительную выгоду из этого относительно нового явления. Причем, речь может идти не только об экономической выгоде [1].

Сегодня социальные медиа оказывают значительное влияние на такие сферы нашей жизни, как:

- Экономика и ведение бизнеса.
- Управление городским трафиком и навигация.
- Доступность личной информации и безопасность.
- Маркетинг, управление продажами, электронный туризм.
- Поиск, получение, накопление, обработка и анализ данных.
- Распределенные вычисления и краудсорсинг.
- Прикладные исследования для различных гуманитарных и общественных наук.
- Средства и методы распространения информации.
- Получение консультаций в сфере здравоохранения.
- Оперативность и почти полное отсутствие пространственных и материальных ограничений в потреблении и производстве информации.

Этот список можно дополнить еще большим количеством пунктов, особенно если учесть проникновение социальных медиа в профессиональные сферы деятельности и взаимодействия граждан с государством [2].

Несмотря на то, что явление, называемое «социальные медиа» существует уже более 20 лет, однозначного определения для него все еще не найдено [3, 4]. Иногда для лучшего понимания сути этого явления, «социальные медиа» разделяют на «технологии» и «разновидность интернет ресурсов». Однако, такое деление не имеет большого смысла с практической точки зрения. Так как сервисы социальных медиа являются совокупностью технологий и виртуального пространства, предоставляемого этим сервисом, то чаще всего невозможно отделить одно от другого, не разрушив их целостность.

В современном мире четко разделить медиа на «социальные» и «не социальные» также довольно сложно. Например, многие современные интернет-СМИ имеют инструменты, характерные для социальных медиа ресурсов (возможность комментировать, оценивать, дополнять и редактировать статьи и т.д.).

В такой ситуации разумным кажется подход, при котором определение социальных медиа дается через некоторый набор характерных для них свойств. О количестве и точном определении этих свойств можно вести дискуссию. Некоторые из них перечислены ниже, однако главным характеризующим их свойством является роль пользователя в социальных медиа. Новизна этой роли состоит в том, что потребители информационных ресурсов одновременно могут выполнять роль производителей информации [5]. В связи с этим, типичного пользователя социальных медиа можно назвать «просьюмер» - producer (производитель) и consumer (потребитель) одновременно [6].

Кроме этой важнейшей характеристики социальных медиа, можно перечислить следующие:

- Интерактивность.
- Мультимедийность.
- Реализация на основе принципов Веб 2.0.
- Почти свободная публикация материалов почти неограниченного объема.
- Возможность использования перекрестных ссылок.
- Возможность частичной утери авторства после публикации материала (в связи с возможностью дополнения или изменения другими пользователями).
- Объединение пользователей в сообщества.

Медиа, для которых свойственны эти характеристики, можно отнести к социальным медиа. Далее достаточно будет определить социальные медиа, как некоторую категорию веб-ресурсов, которые предоставляют возможность для поиска, потребления, производства, распространения и обсуждения информационного контента большому количеству конечных пользователей. Под веб-ресурсом понимается сайт в сети Интернет, однозначно идентифицируемый своим адресом (URL) и воспринимаемый пользователем как единая система. Принципиально важно, что для работы с таким веб-ресурсом пользователь не обязан иметь специальные знания, навыки или умения.

Самыми популярными видами социальных медиа сегодня являются:

- Социальные сети.
- Блоги (микроблоги).
- Формумы.
- Фото и видеохостинги.
- Специализированные социальные сети.
- Сервисы для знакомства и общения.
- Социальные закладки и сервисы отзывов.
- Социальные игры и виртуальные миры.
- Геосоциальные сервисы и сети.

Нерешенные проблемы геовизуализации есть во многих из этих социальных медиа, но острее всего проблемы визуализации геоданных стоят перед разработчиками геосоциальных сервисов и сетей.

Геосоциальный сервис (или геосоциальная сеть) - это особый вид социального сервиса, неотъемлемой частью которого является геокодирование и геотегинг. Использование пространственно-временных данных и простых инструментов работы с ними является основой для социализации. Такие сервисы позволяют объединять пользователей на основании их присутствия в

определенных местах в определенное время. Технологии, которые пользователь использует для геолокации в данном случае не имеют значения.

Типичная модель поведения пользователей таких сервисов включает следующие действия: 1) Регистрация в сервисе; 2) Отметка о своем нахождении в некоторых местах («check-in»); 3) Получение «награды» в некоторых случаях.

Основная мотивация участников таких геосоциальных сетей сводится к игровой мотивации и желанию повысить свой «виртуальный статус» среди других пользователей. Особенно это характерно для подростков и молодых людей, для которых реакция общества на их поведение особенно важна. Иногда пользователи геосоциальных сервисов могут получить реальное «вознаграждение». Обычно это скидка в одном из заведений, в котором пользователь чаще всего отмечается.

Пространственные данные составляют основу информационного обеспечения любой геосоциальной сети. Современные средства анализа пространственно-временных данных позволяют совмещать эти данные с современными инструментами обработки и визуальным веб-интерфейсом. Это позволяет сократить время на поиск и анализ данных и выдать качественный ответ на запрос пользователя быстрее. Таким образом, использование сложно организованных геоданных становится доступно широкому кругу пользователей, не являющихся профессионалами.

Примеры типичных вопросов пользователя на которые может ответить геосоциальный сервис:

- «Какие объекты находятся в указанном месте?».
- «Где находится указанный объект?».
- «Где находится ближайший объект указанного типа?».
- «Какие объекты находятся в указанной области?».
- «Какие объекты указанного типа находятся не далее, чем через указанное расстояние от текущего местоположения?».
- «Что изменилось в указанном месте с указанным объектом за указанное время?».
- «Каким образом добраться до указанного объекта?».

Этот список можно дополнить еще множеством типичных вопросов, связанных с конкретными характеристиками геообъектов. Примером может быть поиск объектов по популярности среди определенной возрастной группы, по возрастанию оценки объекта другими пользователями, по посещаемости объекта и т.д.

Данные описания социальных медиа и геосоциальных сервисов не претендуют на абсолютную точность и полноту. Но их точности вполне достаточно, чтобы сформулировать основную проблему, связанную с визуализацией геоданных в социальных медиа.

Проблема эффективной геовизуализации в социальных медиа

Предпосылки возникновения проблемы эффективной геовизуализации связаны с тем, что функционал геосоциальных сервисов постоянно расширяется. У пользователей появляются новые функции и возможности работы с геоданными. При этом интерфейс остается простым и понятным для типичного пользователя геосервиса. Таким образом, геосоциальные сервисы постепенно

приближаются по своим возможностям к классическим картографическим сервисам и географическим информационным системам. В связи с этим, геосоциальные сервисы сталкиваются с аналогичными проблемами. Одной из наиболее сложных и малоисследованных проблем является проблема эффективной визуализации геоданных.

В отличие от проблем получения, хранения и обработки геоданных, которые на сегодняшний день достаточно хорошо изучены, вопросы эффективной геовизуализации уже много лет не теряют своей актуальности [7-9]. Проблему можно описать следующим образом: «Каким образом можно построить геоизображение по запросу пользователя, чтобы это геоизображение с одной стороны удовлетворяло информационную потребность пользователя, а с другой стороны, имело минимально возможное количество избыточной информации?». В данном контексте избыточность информации можно оценивать, как по количеству элементов геоизображения, не способствующих удовлетворению информационной потребности пользователя, так и по количеству байт «бесполезной» с точки зрения удовлетворения информационной потребности пользователя информации, которые были переданы по каналам связи и обработаны вычислительными мощностями устройства отображения.

В настоящее время решению проблемы эффективной геовизуализации в геосоциальных сервисах уделяется недостаточно внимания. При проведении литературного обзора удалось найти много научных работ, связанных с социальными медиа. Анализ этих работ позволяет сделать вывод о том, что на данный момент существует два основных направления исследований в этой области. Первое направление связано с развитием средств геовизуализации [10, 11]. Недостатком таких работ является то, что описываемые в них методы недостаточно полно учитывают особенности представления геоинформации в социальных медиа [12, 13]. В таких работах часто предлагается просто изменить отображение некоторых элементов или дополнить существующий набор несколькими новыми элементами [10, 14]. При этом предметная область и особенности устройств отображения не учитываются.

В работах второго направления больше внимание уделяется особенностям социальных медиа и геосоциальных сервисов [15, 16]. Однако в них мало внимания уделяется разработке новых [17] или улучшению существующих методов геовизуализации [18]. Характерной особенностью таких работ является то, что они воспринимают социальные медиа как один из источников информации [17]. Часто основные результаты подобных работ связаны с новыми данными, которые можно получить при анализе социальных медиа с помощью хорошо известных ранее методов и технологий [19]. Такие работы почти никогда не учитывают особенности восприятия визуальной геоинформации конечного пользователя и избыточность получаемых геоизображений [20].

Целью данной работы является обобщенное описание применения подхода адаптивной визуализации геоданных в социальных медиа. Преимуществом этого подхода является возможность учета особенностей восприятия информации пользователем при создании геоизображения. Получаемое с помощью предлагаемого подхода адаптивное геоизображение с одной стороны, удовлетворяет информационную потребность пользователя, а с другой стороны, позволяет уменьшать избыточность геоизображения за счет учета особенностей конечного пользователя.

Общее описание подхода адаптивной визуализации геоданных

Если проанализировать действия пользователя в геосоциальных сетях, то можно сделать вывод о том, что пользователь, используя геосоциальные сети, осуществляет интерактивный визуальный анализ геоизображений и дополнительной семантической информации. Такой способ анализа пространственно-временных данных является наиболее удобным и эффективным для пользователя. Методология интерактивного визуального анализа подразумевает, что информационные технологии играют вспомогательную роль в процессе обработки информации. Основная функция информационных технологий заключается в предварительной подготовке, адаптации и передаче информации конечному пользователю для окончательного анализа [21]. Поэтому эффективность применяемого способа визуализации является особенно важной.

Сегодня существует несколько точек зрения на то, что называть визуализацией геоданных или геовизуализацией. В данной работе под геовизуализацией понимается возможность системы отображать большой объем пространственно-временных и других данных в виде единого относительно компактного геоизображения. Важно, чтобы это изображение было понятно конечному пользователю, удовлетворяло его информационную потребность и не требовало больших усилий для восприятия визуальной информации.

Одним из главных свойств хорошей геовизуализации является то, что она не перегружена различными дополнительными визуальными элементами, которые не имеют отношения к удовлетворению информационной потребности пользователя. Таким образом, можно определить хорошую геовизуализацию как способ представления разнородных данных, который обеспечивает наиболее эффективное восприятие, обработку и изучение этих данных зрительной системой и мозгом человека.

В зависимости от результата, который хочет получить пользователь, акцент при визуализации данных может быть сделан как на представлении данных для улучшения их визуального восприятия, так и на представлении данных для последующего анализа и обработки. Адаптивная геовизуализация, в отличие от традиционного подхода, позволяет совмещать данные о географическом положении некоторых объектов с дополнительной семантической информацией об этих объектах, а также учитывать когнитивные особенности восприятия визуальной информации пользователем. При синтезировании геоизображения также учитываются характеристики линий связи и устройства отображения, если эти данные удастся получить.

В общем случае, синтез адаптивного геоизображения осуществляется в результате совместного анализа формальных моделей запроса пользователя, визуальных картографических стереотипов и когнитивных «настроек и предпочтений» пользователя. Для уменьшения когнитивной нагрузки на пользователя проводится семантическое редуцирование геоизображения. Таким образом, геоизображение лучше соответствует запросу пользователя и его информационной потребности.

Модель пространственно- временных данных для адаптивного геоизображения

Задачи, которые решают пользователи геосоциальных сервисов значительно отличаются от классических задач картографии. Для решения задачи с помощью геосоциального сервиса приходится интегрировать не только географические данные, но также большое количество дополнительной информации (время работы объекта, статистика посещаемости, структура объекта и др.) Чтобы упростить процесс решения и сделать результаты более понятными для пользователя, современные геосоциальные сервисы используют так называемые «точки интереса» (POI - Points Of Interest). Для таких точек существует подробное описание, и имеются точные постоянные или динамические географические координаты. Временные характеристики объектов очень важны для пользователей. Во всех геосоциальных сервисах пространственные данные рассматриваются как пространственно-временные сущности, которые могут изменяться во времени. То есть эти объекты рассматриваются как динамические объекты. В качестве точки интереса может выступать практически любой географический объект (кафе, памятник, остановка автобуса и т.д.).

Информационную основу любого геосервиса образуют цифровые карты. Для их создания используются как пространственные, так и атрибутивные данные. Пространственные данные характеризуют местоположение объектов в пространстве относительно друг друга и их геометрию. Описание объектов осуществляется при помощи указания координат объектов и составляющих их частей. Атрибутивные данные характеризуют качественные или количественные свойства пространственных объектов. Наборы атрибутов описывают дополнительные непространственные данные об объектах.

Понимание структуры и методов представления картографических объектов позволяет лучше реализовать подход адаптивного представления геоданных в геосоциальных сервисах. В качестве источников пространственно-временных и атрибутивных данных могут использоваться разнородные данные: аэрокосмические, картографические, статистические, тематические и др.

Основные этапы взаимодействия пользователя с геосоциальным сервисом следующие:

- Постановка задачи – запрос пользователя на поиск геоданных.
- Выбор источников картографической информации – поиск пространственных и атрибутивных данных для удовлетворения информационной потребности пользователя.
- Создание геоизображения – визуализация отобранных пространственных и атрибутивных данных в соответствии с алгоритмами геосервиса.
- Интерпретация результатов – оценка пользователем качества, созданного геоизображения с точки зрения удовлетворения информационной потребности.

Для обеспечения эффективной адаптивной визуализации геоданных, процедура поиска информации должна учитывать семантическое содержание пространственно-временных и атрибутивных данных. Кроме того, при построении геоизображения нужно учитывать когнитивные особенности восприятия визуальной информации пользователем, предметную область

запроса (историю запросов пользователя) и свойства отображения пространственных данных.

При построении результирующего геоизображения, подсистема визуализации геосоциального сервиса может использовать только те представления географических объектов, которые возможно описать с помощью реализованных в геосервисе моделей данных. Поэтому вопрос описания модели геоданных является очень важным для оценки возможностей подсистемы визуализации.

В работе предлагается использовать обобщенную модель информационных ресурсов геосоциального сервиса. Модель ресурса геосоциального сервиса может быть представлена следующим образом:

$Res = \langle Spa, Tim, Sem, Rel \rangle$, где: Spa – множество пространственных параметров ресурса; Tim – множество временных параметров ресурса; Sem – множество семантических параметров ресурса; Rel – множество связей между ресурсами.

Избыточность синтезированного геоизображения выражается как: $Red = Vol_{gen} - Vol_{req}$, где: Vol_{gen} – объем геоинформации в синтезированном геосоциальном сервисом геоизображении; Vol_{req} – объем геоинформации, который необходим для удовлетворения информационной потребности пользователя.

Для количественной оценки избыточности можно применять две различные меры. Первая мера - это количество графических примитивов, которые присутствуют в геоизображении, но не имеют отношения к запросу пользователя. Вторая мера - количество информации (например, в байтах), которая передана пользователю, но не имеет отношения к его запросу.

Увеличение избыточности имеет ряд побочных негативных эффектов. Среди них, например, сложность восприятия информации пользователем, увеличение трафика в связи с передачей бесполезных данных по каналам связи, неэффективное использование вычислительных мощностей устройства отображения информации (смартфон, планшетный компьютер и т. п.), повышенный расход энергии на обработку данных и т. д.

Схема адаптивной геовизуализации

Чтобы реализовать адаптивную визуализацию геоданных нужно интегрировать знания, накопленные в последние годы в таких областях, как картография, визуализация информации [22], взаимодействие человека с компьютером [23], научная визуализация и других. Многие аспекты визуального отображения пространственно-временных данных в геосоциальных сервисах могут быть значительно улучшены при условии большего внимания к результатам исследований в когнитивной науке [24].

В связи с этим необходимо разрабатывать методы адаптивной когнитивной геовизуализации сложноорганизованных пространственных данных. Для этого нужно использовать формальные описания картографических стереотипов и интерпретации запросов пользователей в подсистеме визуализации геосоциальных сервисов. Также необходимо применять методики семантического редуцирования результатов первичной (предварительной) геовизуализации и технологии адаптации геоизображений для эффективного визуального

восприятия на основе формально представленных знаний о когнитивных особенностях восприятия пользователей.

Для удовлетворения информационной потребности пользователя важно выделить и отобразить на геоизображении ту часть, которая наиболее интересна для пользователя или группы пользователей. Для удовлетворения противоречивых требований пользователя к результату визуализации необходимо использовать методику адаптивной визуализации геооданных. При использовании этой методики синтез адаптивного изображения осуществляется в результате совместного анализа запроса пользователя и его профиля, который включает в себя информацию о когнитивных особенностях пользователя. Редуцирование геоизображения проводится с использованием информации из профиля пользователя.

Синтез изображения, которое учитывает когнитивные особенности пользователя (или группы пользователей) включает несколько основных этапов, описанных ниже:

- Формализация запроса для определения адекватного набора данных для удовлетворения информационной потребности пользователя.
- Выбор необходимых данных из хранилищ данных (геоданные, текстовые описания, мультимедиа данные, ссылки, и другие).
- Сопоставление (ассоциирование) и выбор графических данных (примитивов) со средствами отображения пространственной информации, которые имеет подсистема визуализации.
- Синтез «предварительного» (не адаптивного) геоизображения.
- Совместный анализ «предварительного» геоизображения и профиля пользователя.
- Редуцирование «предварительного» геоизображения.
- Выбор средств отображения пространственных данных в соответствии с личным профилем пользователя (когда это возможно).
- Синтез результирующего когнитивного геоизображения.

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 [25].

Для того чтобы геоизображение имело практическую ценность, оно должно отображать не просто объекты какой-либо предметной области, а конкретную ситуацию. Кроме того, для быстрого восприятия пользователем ситуации она должна быть представлена в соответствии с его ментальными стереотипами. Ситуационное реагирование в данном случае связано с когнитивной интероперабельностью. Таким образом, адаптивное геоизображение это субъективная репрезентация состояния географического объекта в виде связанного набора графических динамических компонент представления состояния и правил, описывающих их взаимовлияние в различных ситуациях, которые в совокупности позволяют пользователю образно оценить пространственно-временную ситуацию.

Чтобы эффективно визуализировать пространственно-временные ситуации необходимо определить язык описания ситуаций. На первом этапе описывается некоторая абстрактная ситуация, а на втором - конкретная предметная область и классы ситуаций этой предметной области. Таким образом, ситуация, описываемая в терминах предметной области, является надстройкой над базовой абстрактной ситуацией и содержит понятия наследующие понятия базовой ситуации. Данные о территории преобразуются в экземпляры понятий предметной области и отношения между ними, а ситуациями являются понятия более высокого уровня.

Ситуацию S можно представить как набор всех сведений о текущем состоянии или всех предыдущих состояниях объекта: $S = \langle O, R, E, F, Rul \rangle$, где: O - множество физических объектов; R - множество областей в пространстве; E - множество событий; F множество предикатов, отражающих связи между элементами множеств O, R, E ; Rul - множество продукционных правил вида $(F \Rightarrow G)$ и $(F \Leftarrow G)$, описывающих базовые механизмы логического вывода, в том числе ограничения на значения предикатов F , а также предусловия и следствия для прохождения событий E .

В настоящее время наиболее распространен подход, при котором пространственная информация может быть представлена с помощью 4 видов объектов: точка; линия; полигон; растр. Open Geospatial Consortium в спецификации SLD 1.0 описывает возможные варианты визуализации этих объектов. Визуализация объектов описывается в файле стиля на языке xml в соответствии спецификации SLD 1.0. Эта технология решает лишь техническую задачу геоинформационной визуализации, отвечая на вопрос «как сформировать геоизображение», оставляя без ответа вопрос «каким должно быть геоизображение».

Классы ситуаций C можно представить, как: $C = \langle O', R', E', F' \rangle$, где: O' - множество переменных, обозначающих элементы множества O ; R' - множество переменных обозначающих элементы множества R ; E' - множество переменных обозначающих элементы множества E ; F' - подмножество F , каждый элемент которого является предикатом. Аргументами предиката являются элементы множеств O', R', E' . Тогда, модель визуализации ситуации можно описать следующим образом. Множество классов ситуаций различных предметных областей разбивается на множества более высокого уровня. Тогда, визуализацию V можно представить как: $V = \langle C', Style \rangle$, где C' - абстрактная ситуация; $Style$ - стиль отображения в виде набора файлов стилей SLD.

Для определения ситуаций, которые интересуют пользователя, нужно формализовать категории пользователей. Для этого нужно определить на

множестве атрибутов понятий предметной области отношение порядка, определяющее значимость атрибута для данного пользователя или группы пользователей. Таким образом, можно описать наиболее важные пространственно-временные ситуации и определить соответствующие им абстрактные ситуации общие для всех предметных областей.

Заключение

Описанная адаптивная визуализация геоданных в социальных медиа может применяться и в других прикладных задачах. Например, в системах мониторинга пространственно-распределенных объектов, где пользователю необходимо анализировать большое геоизображение не перегруженное лишними деталями. Также подобный подход может использоваться для систем городской навигации, где геоинформация быстро меняется и необходимо учитывать контекст запроса при синтезе результирующего изображения. Адаптивная геовизуализация может найти применение везде, где нужно проводить визуальный анализ данных и при этом не перегружать сенсорную и когнитивную системы конечного пользователя.

Некоторые элементы предлагаемой технологии были реализованы в региональной системе радиологического мониторинга и прогнозирования для информационной поддержки принятия решений [23]. Количественно оценить выгоды использования технологии адаптивной геовизуализации в реальных геосоциальных сетях достаточно сложно. Это связано с тем, что исходный код всех популярных геосоциальных сетей является закрытым.

Литература

1. Aichner, T. Measuring the degree of corporate social media use / T. Aichner, F. Jacob // *International Journal of Market Research*, vol. 57, Mar. 2015. - P.257-275.
2. Buettner, R. Getting a Job via Career-oriented Social Networking Sites: The Weakness of Ties / R. Buettner // in *Proc. HICSS-49 Conf.*, Jan. 2016. - P.2156-2165.
3. Boyd, D.M. Social network sites: Definition, history, and scholarship / D.M. Boyd, N.B. Ellison // *Journal of Computer-Mediated Communication*, vol. 12, Oct. 2007. - P.210-230.
4. Obar, J.A. Social media definition and the governance challenge: An introduction to the special issue / J.A. Obar, S. Wildman // *Telecommunications policy*, vol. 39, Aug. 2015. -P.745-750.
5. Benkler, Y. *The Wealth of Networks : How Social Production Transforms Markets and Freedom* / Y. Benkler // New Haven, Conn: Yale University Press, 2006.- 515 p.
6. Toffler, A. *The Third Wave* / A. Toffler // USA: Bantam Books, 1980. - 543 p.
7. MacEachren, A.M. Research Challenges in Geovisualization / A.M. MacEachren, M.J. Kraak // *Cartography and Geographic Information Science*, vol. 28, Jan. 2001. - P.3-12.
8. Smith, M. *Geospatial Analysis. A comprehensive guide* / M. Smith, P. Longley, M. Goodchild // Free online book. The Winchelsea Press, 2015.
- Режим доступа: <http://www.spatialanalysisonline.com/HTML/index.html>.
9. An interactive visualization approach to the overview of geoscience data / J. Li и др. // *Journal of Visualization*, vol. 19, Feb. 2016. - P.1-19.
10. Map Style Formalization: Rendering Techniques Extension for Cartography / S. Christophe и др. // in *Proc. NPAR '16 Conf.*, May. 2016. -P.59-68.

11. N. Andrienko, N. Exploratory spatio-temporal visualization: an analytical review / N. Andrienko, G. Andrienko, P. Gatalsky // *Journal of Visual Languages & Computing*, vol. 14, Dec. 2003. –P.503-541.
12. Dodge, M. Geographic visualization: concepts, tools and applications / M. Dodge, M. McDerby, M. Turner // US: John Wiley & Sons Ltd, 2008. - 325 p.
13. StickViz: A New Visualization Tool for Phenomenon-Based k-Neighbors Searches in Geosocial Networking Services / K. S. Kim и др. // in Proc. APWEB Conf., Apr. 2010. –P.22-28.
14. Ma, D. Visualization of social media data: mapping changing social networks / D. Ma. -68 p. –Режим доступа: https://www.itc.nl/library/papers_2012/msc/gfm/dingma.pdf. 2012.
15. Khalili, N. Mapping the geography of social networks / N. Khalili, J. Wood, J. Dykes // in Proc. GISRUK Conf., Apr. 2009. -P.311-315.
16. Furht, B. (Ed.) Handbook of Social Network Technologies and Applications / B. Furht // New York: Springer Science+Business Media, 2010. - 716 p.
17. Aggarwal, C. C. (Ed.) Social Network Data Analytics / C. C. Aggarwal // New York: Springer Science+Business Media, 2011. - 497 p.
18. Seo, S. H. Geo-Social Tracking System for Detecting Unusual Behavior: Visualization of Social Activities based on Spatiotemporal Change / S. H. Seo, C. Chung // *International Journal of Control and Automation*, vol. 6, Aug. 2013. -P.473- 482.
19. Radil, S.M. Spatializing Social Networks: Using Social Network Analysis to Investigate Geographies of Gang Rivalry, Territoriality, and Violence in Los Angeles / S.M. Radil, C. Flint, G.E. Tita // *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 100, Aug. 2010. –P.307-326.
20. Koylu, C. Understanding Geo-Social Network Patterns: Computation, Visualization, and Usability / C. Koylu. -157 p.–Режим доступа: <http://scholarcommons.sc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4058&context=etd>, 1
21. Шишаев, М.Г. Проблема формирования эффективных картографических интерфейсов информационных систем для задач управления территориями / М.Г. Шишаев, Т.А. Порядин // *Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии*. –Вып. 5, 2013. - С.69-76.
22. Вицентий, А.В. Визуализация в научных и инженерных исследованиях / А.В. Вицентий, М.Г. Шишаев // *Научный альманах*, №4, 2015. - С.192 - 196.
23. 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*, №5, 2015. -С.123 - 127.
24. Solso, R.L. Cognitive Psychology / R.L. Solso, M.K. MacLin, O.H. MacLin // Boston: Allyn & Bacon, 2008. - 602 p.
25. A.V. Vicentiy, M.G. Shishaev, A.G. Oleynik / Dynamic cognitive geovisualization for information support of decision-making in the regional system of radiological monitoring, control and forecasting», in Proc. CSOC2016 Conf., Mar. 2016. –P.483-495.

Сведения об авторах

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

А.С. Шемякин, С.Ю. Яковлев

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

РАСЧЁТ ЗОНЫ ПОРАЖЕНИЯ ДЛЯ ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ*

Аннотация

Проведен анализ нормативно-методической базы, регулирующей вопросы оценки риска химически опасных объектов. Выполнен расчет параметров зоны возможного химического заражения в соответствии с различными методиками для аварии на аммиачной холодильной установке, дан сравнительный анализ методик и результатов.

Ключевые слова:

промышленная безопасность, зона возможного химического заражения, нормативно-методическая база.

A.S. Shemyakin, S.Yu. Yakovlev

CALCULATION OF CONTAMINATED AREA FOR CHEMICALLY HAZARDOUS OBJECTS

Abstract

Regulatory and methodic basis to risk assessment of chemically hazardous objects has been analyzed. The calculation of possible chemical contamination area parameters according to the different methods for the accident on the ammonia refrigeration system has been made, various methods of analysis have been compared.

Keywords:

industrial safety, possible chemical contamination area, regulatory and methodic basis.

Введение

Вопросы анализа и оценки риска химически опасных объектов (ХОО) рассматривались ранее в работах [1-5]. За последнее десятилетие нормативно-методическая база анализа безопасности ХОО менялась, прежде всего, по линии Ростехнадзора, МЧС России, а также других ведомств. Расчёты и оценки риска сегодня применяются во многих направлениях: при декларировании и паспортизации безопасности, в ходе исследований устойчивости функционирования, для разработки планов действий в чрезвычайных ситуациях и т. п. Поэтому представляет интерес текущее состояние нормативно-методического обеспечения риск-анализа ХОО. В статье основное внимание уделено вопросу определения размеров зоны возможного химического заражения (ЗВХЗ). Это связано с последними изменениями методической базы расчёта ЗВХЗ, инициированными МЧС России.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 15-07-02757, 15-29-06973, 15-07-04290).

Программа ОНИТ 1 РАН «Интеллектуальные информационные технологии, системный анализ и автоматизация».

1. Общее состояние нормативно-методической базы

Основные нормативные акты федерального уровня в сфере промышленно-экологической безопасности [6-10] остались прежними, однако в них неоднократно вносились некоторые изменения и дополнения, в том числе федеральными законами.

Акты регионального уровня (в т. ч. реестры, перечни потенциально опасных объектов) также регулярно обновлялись, в основном сохраняя номенклатуру.

Далее для определённости остановимся на вопросах паспортизации безопасности ХОО. Основным регулирующим документом при разработке паспортов безопасности разнородных объектов по-прежнему остаётся Приказ МЧС России [11]. Его характеристика дана в [2].

Методическое обеспечение оценки риска ХОО претерпело существенные изменения. На сегодняшний день основными рекомендуемыми (в явной или неявной форме) МЧС России документами являются [12, 13].

Приказ [12] утверждает руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах». Руководство содержит рекомендации по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий для обеспечения требований промышленной безопасности при проектировании, строительстве, капитальном ремонте, реконструкции, техническом перевооружении, эксплуатации, консервации и ликвидации опасных производственных объектов.

Свод правил [13] (далее - СП165) устанавливает требования к инженерно-техническим мероприятиям по гражданской обороне, которые должны соблюдаться при подготовке документов территориального планирования и документации по планировке территорий, при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов использования атомной энергии, опасных производственных объектов, особо опасных, технически сложных, уникальных объектов и объектов гражданской обороны. Для целей настоящей работы особенно важными являются обязательные Приложения Б (Методика прогнозирования масштабов возможного химического заражения аварийно химически опасными веществами при авариях на химически опасных объектах и транспорте) и Приложение В (Справочная информация для прогнозирования масштабов возможного химического заражения аварийно химически опасными веществами при авариях на химически опасных объектах и транспорте).

2. Основные термины и определения

В документах, перечисленных выше, приняты следующие термины и определения:

- **Аварийно химически опасное вещество (АХОВ)** – опасное химическое вещество, применяемое в промышленности и сельском хозяйстве, при аварийном выбросе (разливе) которого может произойти заражение окружающей среды в поражающих живой организм концентрациях (токсодозах).

- **Вторичное облако аварийно химически опасного вещества** – облако аварийно химически опасного вещества, образующееся в результате испарения разлившегося вещества с подстилающей поверхности.

• **Первичное облако аварийно химически опасного вещества** – облако аварийно химически опасного вещества, образующееся в результате мгновенного перехода в атмосферу части аварийно химически опасного вещества из емкости при ее разрушении.

• **Площадь зоны возможного химического заражения аварийно химически опасным веществом (площадь ЗВХЗ)** – площадь территории, в пределах которой под воздействием изменения направления ветра может перемещаться облако аварийно химически опасного вещества.

• **Пороговая токсодоза** – минимальное количество аварийно опасного химического вещества, вызывающая у людей начальные симптомы поражения.

• **Потенциально опасные объекты** – совокупность зданий, строений, сооружений, машин, оборудования и технических средств, расположенных на определяемых в соответствии с законодательством Российской Федерации объектах использования атомной энергии (в том числе ядерных установках, пунктах хранения ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов), опасных производственных, особо опасных, технически сложных, уникальных объектах и гидротехнических сооружениях, аварии на которых могут привести к чрезвычайным ситуациям.

• **Химически опасный объект** – объект, при аварии или разрушении которого могут произойти массовые поражения людей, животных и растений аварийно химически опасными веществами.

• **Эквивалентное количество аварийно химически опасного вещества** – количество хлора, масштаб заражения которым при инверсии эквивалентен масштабу заражения при данной степени вертикальной устойчивости атмосферы количеством данного аварийно химически опасного вещества, перешедшим в первичное (вторичное) облако. Далее остановимся на расчёте ЗВХЗ.

3. Методика СП165

Недавно пере утверждённая в рамках [13] методика прогнозирования масштабов возможного химического заражения на самом деле известна со времён бывшего СССР [14]. Она распространяется на случаи выброса АХОВ в атмосферу в газообразном, парообразном или аэрозольном состоянии.

Масштабы возможного химического заражения АХОВ, в зависимости от их физических свойств и агрегатного состояния в емкостях, хранилищах и технологическом оборудовании, рассчитывают по первичному и вторичному облаку, например:

- для сжиженных газов – отдельно по первичному и вторичному облаку;
- для сжатых газов – только по первичному облаку;
- для ядовитых жидкостей, кипящих выше температуры окружающей среды – только по вторичному облаку.

Исходными данными для расчетов являются: тип АХОВ, количество АХОВ, метеоусловия (скорость ветра, температура воздуха и степень вертикальной устойчивости атмосферы).

При заблаговременном прогнозировании масштабов возможного химического заражения на случай возможных производственных аварий в качестве исходных данных рекомендуется принимать:

- за величину выброса АХОВ - количество АХОВ в максимальной по объему единичной емкости (технологической, складской, транспортной и др.);

- для химически опасных объектов, расположенных в сейсмических районах, а также для объектов, отнесенных к категориям по гражданской обороне, в т.ч. атомных станций, за величину выброса АХОВ следует принимать общий запас АХОВ на объекте;

- метеорологические условия – изотермия, скорость ветра – 3 м/с; температура воздуха – + 20°С.

Внешние границы зоны возможного химического заражения АХОВ рассчитывают по пороговой токсодозе при ингаляционном воздействии на организм человека. Количественные характеристики выброса АХОВ для расчета масштабов возможного химического заражения определяются по их эквивалентным значениям (по отношению к хлору).

Эквивалентное количество АХОВ (в тоннах) в первичном облаке определяется по формуле:

$$Q_{Э1} = K_1 K_3 K_5 K_7 Q_0 \quad (1)$$

где $Q_{Э1}$ – эквивалентное количество АХОВ;

K_1 - коэффициент, зависящий от условий хранения АХОВ, определяемый по приложению В (таблица В.3) [13]; для сжатых газов $K_1=1$;

K_3 - коэффициент, равный отношению пороговой токсодозы хлора к пороговой токсодозе другого АХОВ, определяемый по приложению В (таблица В.3);

K_5 - коэффициент, учитывающий степень вертикальной устойчивости атмосферы; для инверсии принимают равным 1, для изотермии - 0,23, для конвекции - 0,08; исходя из допущений, принятых в Б1.5 [13];

K_7 - коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха, определяемый по приложению В (таблица В.3) [13]; для сжатых газов $K_7 = 1$;

Q_0 - количество выброшенного (разлившегося) при аварии АХОВ, в тоннах.

Эквивалентное количество АХОВ (в тоннах) во вторичном облаке определяется по формуле:

$$Q_{Э2} = (1 - K_1) K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 \frac{Q_0}{hd} \quad (2)$$

где $Q_{Э2}$ – эквивалентное количество АХОВ;

K_1 - коэффициент, зависящий от условий хранения АХОВ, определяемый по приложению В (таблица В.3) [13]; для сжатых газов $K_1=1$;

K_2 – коэффициент, зависящий от физико-химических свойств АХОВ, определяемый по приложению В (таблица В.3) [13];

K_3 - коэффициент, равный отношению пороговой токсодозы хлора к пороговой токсодозе другого АХОВ, определяемый по приложению В (таблица В.3) [13];

K_4 – коэффициент, учитывающий скорость ветра, определяемый по приложению В (таблица В.4) [13];

K_5 - коэффициент, учитывающий степень вертикальной устойчивости атмосферы; для инверсии принимают равным 1, для изотермии - 0,23, для конвекции - 0,08; исходя из допущений, принятых в Б1.5 [13];

K_6 – коэффициент, зависящий от времени N , прошедшего после начала аварии;

K_7 – коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха, определяемый по приложению В (таблица В.3) [13]; для сжатых газов $K_7 = 1$;

Q_0 – количество выброшенного (разлившегося) при аварии АХОВ, в тоннах.

h – толщина слоя АХОВ в метрах. Согласно допущениям, в Б1.7 [13] толщину слоя жидкости для АХОВ, разлившихся свободно на подстилающей поверхности, принимают равной 0,05 м по всей площади разлива;

d – плотность АХОВ, определяемая по приложению В (таблица В.3) [13].

Коэффициент K_6 вычисляется по формуле:

$$K_6 = \begin{cases} N^{0,8} & \text{при } N < T \\ T^{0,8} & \text{при } N \geq T \end{cases} \quad (3)$$

где N – время, прошедшее с после аварии, в часах;

T – продолжительность испарения АХОВ, в часах. Если $T < 1$, то для расчета используем $T=1$.

Время T определяется по формуле:

$$T = \frac{hd}{K_2 K_4 K_7} \quad (4)$$

Глубина ЗВХЗ Γ_1 (для первичного облака) и Γ_2 (для вторичного облака) определяется с помощью таблиц В.2 и В.5 [13].

Полная глубина ЗВХЗ определяется по формуле:

$$\Gamma = \Gamma' + 0.5\Gamma'' \quad (5)$$

где Γ' – наибольший из размеров Γ_1 и Γ_2 ;

Γ'' – наименьший из размеров Γ_1 и Γ_2 .

Полученное значение сравнивают с предельно возможным значением глубины переноса воздушных масс, определяемым по формуле:

$$\Gamma = Nv \quad (6)$$

где N – время, прошедшее от начала аварии, ч;

v – скорость переноса переднего фронта зараженного воздуха при заданной скорости ветра и степени вертикальной устойчивости атмосферы, км/ч, определяемая по приложению В (таблица В.5) [13]. За окончательную расчетную глубину зоны возможного химического заражения принимается меньшее из двух сравниваемых между собой значений.

4. Методика «Токси»

Длительное время одним из основных документов, рекомендуемых для оценки последствий химических аварий являлась методика «Токси» [15].

В методике используются около 140 параметров, величин, постоянных и переменных. Некоторые из них выбираются из таблиц, другие рассчитываются. В зависимости от агрегатного состояния опасного химического вещества (ОХВ) в оборудовании и характера разрушения оборудования методика позволяет

провести расчёты для четырёх основных сценариев аварий. При заблаговременном прогнозировании следует принимать:

- сценарий с полным разрушением ёмкости, содержащей ОХВ в максимальном количестве;
- сценарий «гильотинного» разрыва трубопровода с максимальным расходом при максимальной длительности выброса;
- метеоусловия: класс устойчивости атмосферы – инверсия, скорость ветра – 1 м/с.

Основными элементами расчёта являются (формулы не приводятся):

- определение количества, выброшенного ОХВ или производительности поступления ОХВ в атмосферу;
- определение пространственно-временного распределения концентраций ОХВ;
- определение пространственного распределения токсодозы;
- оценка поражающего воздействия ОХВ, включая расчёт зон химического заражения.

Границы зон химического заражения рассчитываются по смертельной и пороговой токсодозам при ингаляционном воздействии.

В методике приняты следующие допущения:

- газообразное ОХВ считается идеальным газом, свойства которого не зависят от температуры;
- жидкое ОХВ считается несжимаемой жидкостью, свойства которой не зависят от температуры;
- истечение ОХВ и его испарение происходит с постоянной скоростью, соответствующей максимальной скорости истечения/испарения;
- в образовавшемся сверху сразу после выброса облаке находится только ОХВ без подмешивания воздуха;
- разлив жидкой фазы происходит на твердой не впитывающей поверхности;
- для случая отсутствия обваловки высота слоя разлившегося ОХВ принимается равной 0,05 м;
- при расчете рассеивания ОХВ в атмосфере используется гауссова модель диффузии пассивной примеси; осаждение на подстилающую поверхность выброса ОХВ и его химические превращения при рассеянии не учитываются;
- метеоусловия остаются неизменными в течение времени экспозиции, а характеристики атмосферы – по высоте постоянны.

5. Пример расчёта зоны заражения (на примере аммиачной холодильной установки)

Приведем пример расчета ЗВХЗ для случая разлива аммиака на аммиачной холодильной установке (АХУ). В холодильной установке в качестве рабочего вещества используется аммиак, циркулирующий по кругу, суммарное количество которого составляет около 50 т. От 8 до 10 т аммиака хранится в 4 линейных ресиверах на открытой площадке под навесом, остальной аммиак находится в рабочей системе охлаждения. Максимальное количество аммиака в одном ресивере составляет 2,5 т. Рассмотрим следующий сценарий развития аварии: разрыв трубопровода во фланцевом соединении у линейного ресивера с

выбросом 2,5 т аммиака. В линейном ресивере аммиак хранится в жидком виде (присутствуют как жидкая, так и газообразная фаза) при температуре минус 8°C и давлении 7,5 атм.

Результаты расчета ЗВХЗ по СП165

Эквивалентное количество АХОВ (в тоннах) в первичном облаке определяется по формуле (1). Согласно исходным данным и с использованием таблиц из приложения В [13] получаем: $K_1 = 0,18$; $K_3 = 0,04$; $K_5 = 0,23$; $K_7 = 1$; $Q_0 = 2,5$ т.

$$Q_{э1} = 0,18 * 0,04 * 0,23 * 1 * 2,5 = 0,00414т$$

Эквивалентное количество АХОВ в первичном облаке $Q_{э1} = 0,00414$ т.

Эквивалентное количество АХОВ (в тоннах) во вторичном облаке определяется по формулам (2) - (5).

Для расчетов по формуле (2) требуется вычислить коэффициент K_6 по формуле (3), для вычисления коэффициента K_6 по формуле (3) требуется вычислить значение T по формуле (4).

Для вычисления T используем следующие значения: $h = 0,05$; $d = 0,681$; $K_2 = 0,025$; $K_4 = 1,67$; $K_7 = 1$.

$$T = \frac{0,05 * 0,681}{0,025 * 1,67 * 1} = 0,815$$

Продолжительность испарения АХОВ – 0,815 ч. Для расчетов используем $T=1$, согласно пункту Б 2.1.2 [13].

По формуле (3) определяем, что $K_6 = 1$. Для вычислений по формуле (2) используем следующие значения: $K_1 = 0,18$; $K_2 = 0,025$; $K_3 = 0,04$; $K_4 = 1,67$; $K_5 = 0,23$; $K_6 = 1$; $K_7 = 1$; $Q_0 = 2,5$ т; $h = 0,05$; $d = 0,681$.

$$Q_{э2} = (1 - 0,18) * 0,025 * 0,04 * 1,67 * 0,23 * 1 * 1 * \frac{2,5}{\frac{0,05 * 0,681}{2,5}} = 0,82 * 0,025 * 0,04 * 1,67 * 0,23 * \frac{2,5}{0,0341} = 0,0231т$$

Эквивалентное количество АХОВ в вторичном облаке $Q_{э2} = 0,0231$ т.

Глубина ЗВХЗ Γ_1 (для первичного облака) и Γ_2 (для вторичного облака) определяется с помощью таблиц В.2 и В.5 [13], с использованием линейного интерполирования и экстраполирования (при естественном предположении $\Gamma=0$ при $Q=0$) данных.

$$\Gamma_1 = \frac{0,22}{0,01} * 0,00414 = 0,0911 \text{ км}$$

$$\Gamma_2 = 0,22 + \left(\frac{0,48 - 0,22}{0,05 - 0,01} \right) * (0,0231 - 0,01) = 0,22 + \frac{0,26}{0,04} * 0,0131 = 0,3052 \text{ км}$$

Полная глубина ЗВХЗ:

$$\Gamma = 0,3052 + 0,5 * 0,0911 = 0,3508 = 0,351 \text{ км.}$$

По формуле (6) определяем предельно возможную глубину переноса воздушных масс:

$$\Gamma_{\text{п}} = 1 * 18 = 18 \text{ км}$$

$\Gamma_{\text{п}} > \Gamma$, следовательно, расчетная глубина ЗВХЗ составляет 351 м.

Полная глубина ЗВХЗ – 0,351 км.

Результаты расчета ЗВХЗ по методике «Токси»

Для аналогичного сценария при тех же исходных данных для АХУ методика даёт следующие результаты.

1. Скорость выброса.

Давление насыщенных паров ОХВ при равно 714060 Па.

Плотность газообразного ОХВ равна 5,08 кг/м³.

Скорость выброса равна 67,26 кг/с.

При разгерметизации давление в линейном ресивере уменьшается до 1 атм., скорость выброса принимается равной 67,26 кг/с.

2. Количество газа в первичном облаке.

Скорость поступления в атмосферу газообразного ОХВ, образующегося при мгновенном вскипании, равна 10,16 кг/с.

Скорость поступления в атмосферу газообразного ОХВ в виде аэрозольных включений также равна 10,16 кг/с.

Аналогичные скорости, но после отсечения аварийного участка равны 10,7 кг/с.

Составляющая времени формирования первичного облака от начала выброса до времени отсечения аварийного участка равна 1 с.

Составляющая времени формирования первичного облака от времени отсечения аварийного участка до окончания формирования первичного облака равна 0 с.

Количество газа в первичном облаке равно 22,58 кг.

Время формирования облака менее 1 сек, следовательно, далее первичное облако не рассматривается.

3. Расход ОХВ во вторичном облаке от пролива равен 67,26 кг/с.

Длительность выброса жидкого ОХВ равна 0 с.

4. Площадь пролива равна 36,13 м².

5. Скорость испарения из пролива определяем по формуле равна 88,64 кг/с.

6. Длительность испарения равна 1 с.

7. Поля концентрации и токсодозы.

Рассчитываются поля концентраций и токсодоз и по полученным данным строятся графики, представленные на рис. 1-5.

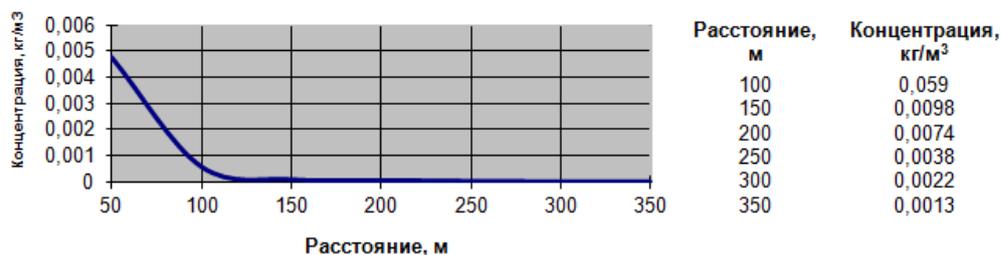


Рис. 1. Максимальная концентрация на оси выброса (по направлению ветра) при выбросе 2,5 т аммиака на стадии истечения жидкой фазы

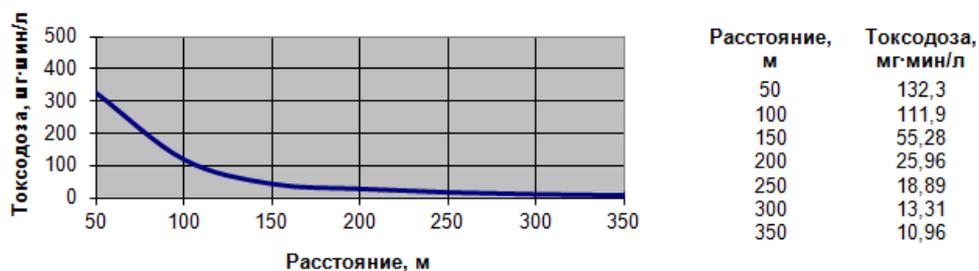


Рис. 2. Токсодоза на оси выброса (по направлению ветра) при выбросе 2,5 т аммиака на стадии истечения жидкой фазы

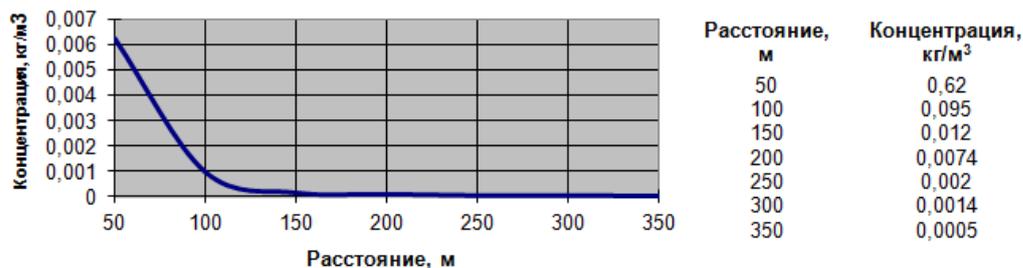


Рис. 3. Максимальная концентрация на оси выброса (по направлению ветра) при выбросе 2,5 т аммиака на стадии испарения пролива

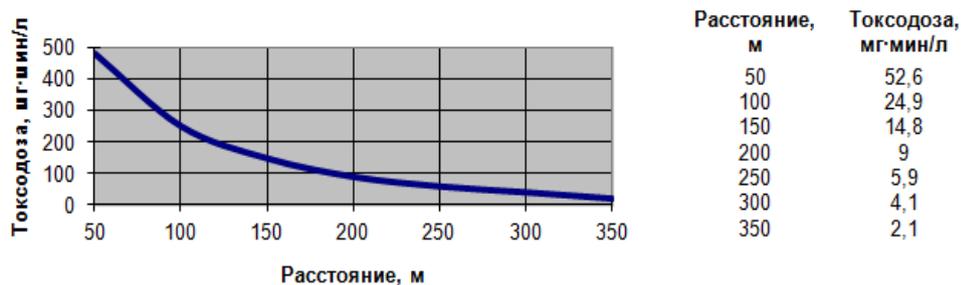


Рис. 4. Токсодоза на оси выброса (по направлению ветра) при выбросе 2,5 т аммиака на стадии испарения пролива

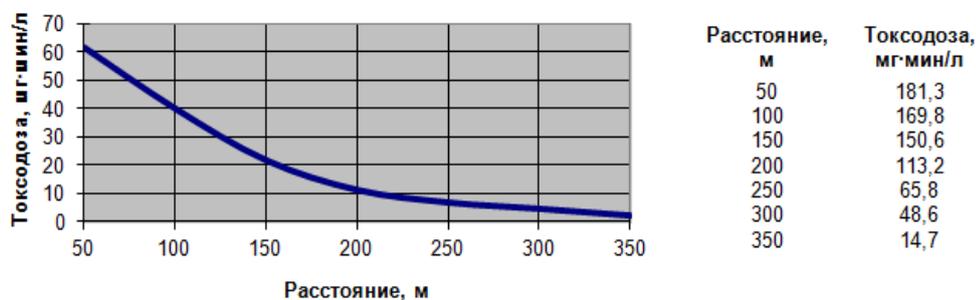


Рис. 5. Токсодоза на оси выброса (по направлению ветра) при выбросе 2,5 т аммиака за всю стадию

8. Санитарная зона и зона дискомфорта.

Из полученных данных (рис. 1-5) следует, что:

- зона санитарных потерь $R_{сан} \approx 150$ м;
- зона дискомфорта (малых концентраций) $R_{дис} \approx 350$ м.

6. Сравнение методик и результатов расчёта

В целом использованные методики построены на схожих принципах и моделях. Тем не менее, имеющиеся различия не позволяют провести полное и корректное сопоставление методик.

Расчёты по СП165 существенно проще за счёт использования таблиц вместо формул. При этом для промежуточных (не табличных) значений можно воспользоваться линейной интерполяцией либо экстраполяцией. Однако результаты по «Токси» более информативны.

У авторов отсутствуют сведения о проверке достоверности методик. Что касается оценки глубины ЗВХЗ, то для приведённого примера методики дают практически один и тот же результат. Это означает, что в целях оценки радиуса ЗВХЗ можно использовать упрощённую методику СП165.

Заключение

Проведен анализ нормативно-методической базы, регулирующей вопросы оценки риска химически опасных объектов. На сегодняшний день основными рекомендуемыми МЧС России документами являются [12, 13]. Приложение В [13] содержит методику прогнозирования масштабов возможного химического заражения АХОВ при авариях на химически опасных объектах и транспорте. Альтернативной является методика оценки последствий химических аварий [15].

В данной работе проведен расчет параметров ЗВХЗ в соответствии с [13] и [15] для аварии на аммиачной холодильной установке, выполнен сравнительный анализ методик и результатов. Сравнительный анализ показывает, что расчеты по СП165 существенно проще за счёт использования таблиц вместо формул. Однако результаты по «Токси» более информативны. Что касается оценки глубины ЗВХЗ, то для приведённого примера методики дают практически один и тот же результат. Это означает, что в целях оценки радиуса ЗВХЗ можно использовать упрощённую методику СП165.

Литература

1. Яковлев, С.Ю. Основы оценки устойчивости химически опасных объектов (на примере хлорного хозяйства) / С.Ю. Яковлев, Н.В. Исакевич // Управление безопасностью природно-промышленных систем. – Апатиты: КНЦ РАН, 2003. – Вып. IV. – С.21-28.
2. Яковлев, С.Ю. Методические вопросы разработки паспортов безопасности опасных объектов / С.Ю. Яковлев, А.А. Рыженко, Н.В. Исакевич // Информационные технологии в региональном развитии. – Апатиты: КНЦ РАН, 2005. – Вып. V. – С.83-88.
3. Яковлев, С.Ю. Количественный анализ промышленно-экологического риска на объектовом уровне / С.Ю. Яковлев, Н.В. Исакевич // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: труды международной научной школы МАБР-2007, г. Санкт-Петербург, 4-8 сентября 2007 г. - СПб: ГУАП, 2007. – С.461-465.
4. Рыженко, А.А. Оценка риска для химически опасного объекта / А.А. Рыженко, С.Ю. Яковлев, Н.В. Исакевич // Управление безопасностью природно-промышленных систем: сб. науч. тр. – Апатиты: КНЦ РАН, 2008. – Вып. VII. – С.100-104.
5. Рыженко, А.А. Анализ безопасности комплекса холодильных установок / А.А. Рыженко, С.Ю. Яковлев, Н.В. Исакевич // Управление безопасностью природно-промышленных систем: сб. науч. тр. – Апатиты: КНЦ РАН, 2008. – Вып. VII. – С.105-107.
6. Федеральный Закон от 21.12.94 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территории от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (в редакции Федерального закона от 23.06.2016 г. № 218-ФЗ).

7. Федеральный Закон от 21.07.97 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (в редакции Федерального закона от 02.06.2016 г. № 170-ФЗ).
8. Федеральный закон от 22.08.2004 г. №122-ФЗ «Об изменениях и дополнениях в законодательные акты РФ и ...» (в редакции Федерального закона от 23.07.2013 г. № 250-ФЗ. с изменениями, внесенными Определением Конституционного Суда РФ от 11.07.2006 г. № 353-0, Постановлениями Конституционного Суда РФ от 31.01.2008 г. № 2-П, от 14.05.2013 г. № 9-П).
9. Постановление Правительства РФ от 30.12.2003 г. № 794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» (в редакции постановления Правительства РФ от 18.07.2013 г. № 605).
10. Приказ МЧС России от 28.02.2003 г. №105 «Об утверждении Требований по предупреждению чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах и объектах жизнеобеспечения».
11. Приказ МЧС России от 04.11.2004 г. №506 «Об утверждении типового паспорта безопасности опасного объекта».
12. Приказ Ростехнадзора от 11.04.2016 г. №144 Об утверждении руководства по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах».
13. Свод правил СП 165.1325800.2014 «Инженерно-технические мероприятия по гражданской обороне. Актуализированная редакция СНиП 2.01.51-90» // Утвержден приказом Министерства строительства и ЖКХ РФ от 12.11.2014 г. №705/ПР.
14. Руководящий документ РД 52.04.253-90 «Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте» // Утвержден штабом гражданской обороны СССР 24.03.1990 г.
15. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси», вторая редакция) // Согласовано Госгортехнадзором России 19.11.1998 г. № 02-35/1551. – 83 с.

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 – младший научный сотрудник, старший преподаватель,

e-mail: shemyakin@iimm.ru

Alexey S. Shemyakin – junior researcher, assistant professor

УДК 65.011.56, 62.50

И.Е. Кириллов

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ МОДЕЛИ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА

Аннотация

В статье предложен вариант адаптивной системы автоматического управления (САУ) двигателем постоянного тока (ДПТ). Представлено исследование модели, предложенной САУ и краткий анализ её работы. Особенностью предложенной модели является отклик настроек системы управления на изменения свойств объекта управления (ОУ) в процессе работы, вызванных различными физическими явлениями и внешними возмущающими воздействиями. Адаптивность САУ заключается в оценке изменений свойств двигателя, в следствии чего изменяется его передаточная функция, и изменение настроек ПИД регулятора с помощью нечеткого регулятора с механизмом аппроксимации.

Ключевые слова:

системы управления, нечеткая логика, адаптивность.

I.E. Kirillov

DEVELOPMENT AND RESEARCH ADAPTIVE MODEL SAU ELECTRIC IN VIEW OF CHANGES TRANSFER FUNCTION ACTUATOR

Abstract

This paper proposes an adaptive version of the automatic control system (ACS) DC motor (DPT). Presentation of the study model of the proposed ACS and a brief analysis of its work. A feature of the proposed model is the response of the control system settings to change the properties of a control object (DU) during the operation, due to various physical phenomena and external perturbations. Adaptability of ACS is to evaluate changes in engine characteristics, in consequence of that change its transfer function, and change the settings using the PID controller with fuzzy approximation mechanism.

Keywords:

modeling, technological process, fuzzy logic, management.

Введение

Решение задачи повышения качества управления производственными механизмами является одной из первоочередных задач, поскольку тесно связано с повышением экономических показателей производств, ростом качества продукции и увеличением показателей надежности оборудования.

Идея применения адаптивных систем управления (СУ) не нова [1, 2], наибольшее распространение они получили в современном мире. При адаптивном управлении электромеханическими объектами (ЭМО) с контролируемыми возмущениями в исполнительных электроприводах известны следующие подходы [6]:

- параметрический синтез регуляторов СУ с обратной связью по выходу ЭМО;
- синтез модального управления электромеханическими объектами с широтно-импульсным регулятором;
- синтез стабилизирующего управления ЭМО с использованием функций Ляпунова;
- синтез локально - оптимального управления исполнительными электроприводами ЭМО.

Каждый из данных подходов нашел свое применение в различных СУ производственных механизмов определенного назначения, однако в них есть одна общая черта, а именно отсутствие оценки изменения передаточных функций механизмов при продолжительных режимах работы.

В первую очередь адаптивные СУ необходимо применять при управлении технологическими объектами с изменяющимися возмущающими воздействиями. Однако следует отметить тот факт, что не только внешние изменения влияют на работу технологического оборудования, но и характеристики самого оборудования, которые способны изменяться во времени, причем не только в долгосрочном периоде, но и достаточно сжатых временных отрезках.

Передаточная функция любого ОУ есть величина не постоянная, изменяющаяся со временем, описать данную величину в отдельные моменты времени можно аппроксимируя значения входного и выходного сигналов (рассматривается не многомерная модель) и проводя расчет коэффициентов передаточной функции.

В качестве простого примера, подтверждающего это утверждение, может выступать обычный трансформатор тока. При длительной работе обмотки трансформатора нагреваются, вследствие чего, изменяется их сопротивление, а следовательно, и передаточная функция самого трансформатора. Аналогичные явления можно наблюдать и на примере любого электрического двигателя, которые являются наиболее распространенными исполнительными механизмами в производственных ОУ.

Физический эксперимент

Далее в статье для примера возьмем ДПТ. Существует три известных режима работы двигателей под нагрузкой в зависимости от ее длительности:

Продолжительный режим: двигатель работает без перерыва, за рабочий период

Продолжительная нагрузка может быть постоянной или изменяющейся. В первом случае температура не изменяется, во втором - изменяется вместе с изменением нагрузки.

Пример: двигатели конвейеров, лесопильных рам, насосы водоотливных установок и др., а также с переменной продолжительной нагрузкой работают двигатели различных металлообрабатывающих и деревообрабатывающих станков.

Кратковременный режим: двигатель не успевает нагреться до установившейся температуры, а в течение паузы охлаждается до температуры окружающей среды.

Суть проведенного эксперимента заключалась в следующем: в начале исследовались переходные процессы (пуск, работа, торможение) с постоянной нагрузкой в момент, когда температура корпуса двигателя была равна температуре окружающей среды, а именно 18°C (технической возможности оценки температуры обмоток двигателя не было). Результаты приведены на рис. 2 в виде красного графика. Затем после 2,5 часов работы, когда температура корпуса двигателя достигла 41 градуса, были сняты характеристики в тех же самых режимах, что и в первом эксперименте (на рис. - зеленый график).

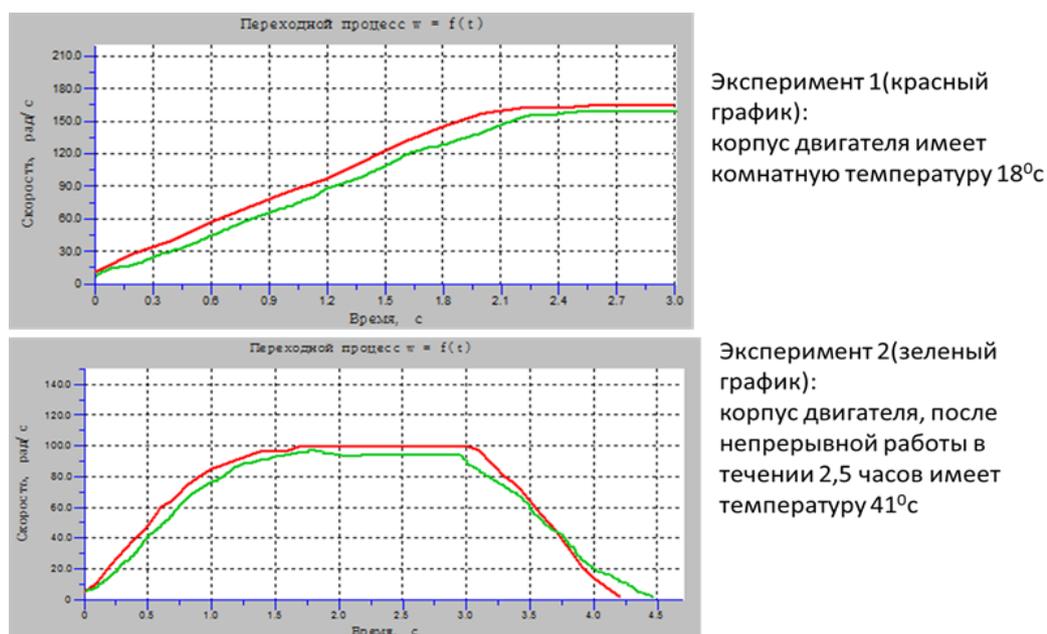


Рис. 2. Результаты моделирования переходных процессов

При анализе графиков переходных процессов становится очевидно, что качество работы (за критерий качества берем необходимую скорость работы) ухудшается, а именно падает. Данные результаты свидетельствуют о целесообразности проведения настроек используемого ПИД регулятора именно в процессе работы.

Одноконтурная система управления ДПТ

Рассмотрим классическую модель одноконтурной системы управления ДПТ по каналу регулирования скорости с применением ПИД регулятора и управляемого выпрямителя (на рис. 3 - блок UniversalBridge). Данная модель реализована в среде Simulink приложения Matlab, имитирует работу стенда, описанного выше:

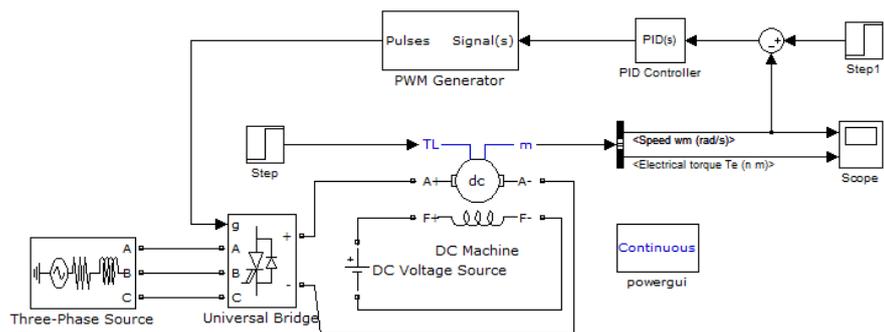


Рис. 3. Модель одноконтурной системы управления ДПТ

Рассмотрим результат моделирования работы ДПТ в момент пуска и выброса нагрузки через некоторое время, для наглядности будем рассматривать изменение скорости вращения двигателя и момента. На рис. 4, показано изменение скорости и момента двигателя в момент пуска и в момент подачи нагрузки на 5-й секунде.

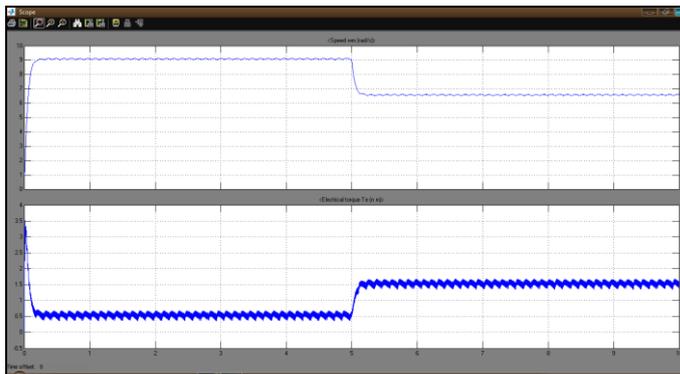


Рис. 4. Изменение скорости и момента двигателя в момент пуска и в момент подачи нагрузки на 5-й секунде

Анализируя результаты работы данной модели можно сделать вывод, о том, что необходимо производить настройку регулятора, чтобы избежать провала скорости и как следствие скачка момента при изменении нагрузки. В данном примере было промоделировано 10 секунд работы ДПТ, в реальной ситуации время работы технологического оборудования может составлять часы, сутки и т.д. При этом очевидно, что в течении работы оборудование может изменять свои свойства. К примеру, на рис. 5 показано влияние температуры на вольтамперную характеристику диодов, которые входят в состав управляемого выпрямителя.

По аналогичным причинам будет изменяться и сопротивление обмоток ДПТ. Таким образом, можно сделать вывод о том, что при моделировании длительного периода работы ДПТ, результаты моделирования потеряют свою актуальность.

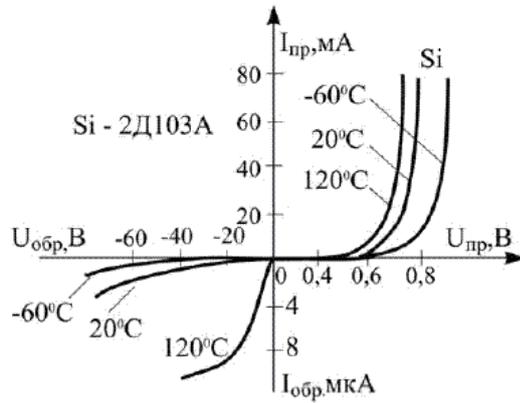


Рис.5. Влияние температуры на вольт-амперную характеристику диода

В целях некоторого упрощения проводимого эксперимента, предположим, что управляемый выпрямитель не изменяет своих свойств в ходе работы. Далее при моделировании будем придерживаться лишь изменения характеристики ОУ, а именно ДПТ. Модель ДПТ, реализована на основе схемы замещения двигателя и имеет возможность настройки значений параметров обмоток двигателя.

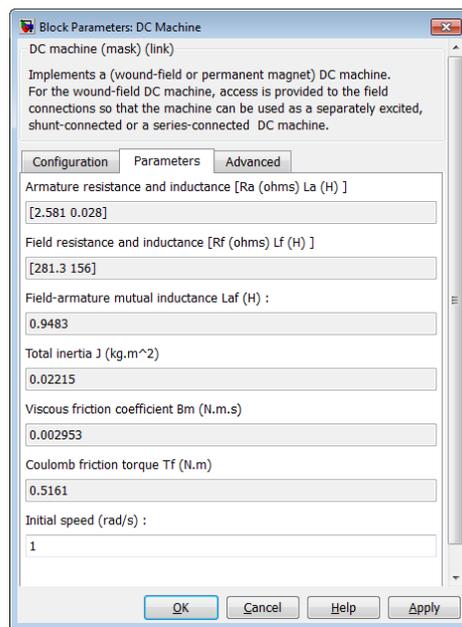


Рис. 6. Окно настройки параметров ДПТ

Добавим в реализованную модель блок, который будет имитировать изменение сопротивления обмоток ДПТ (имитация будет осуществлена мгновенно, а не в течении времени) и проанализируем результаты. На рис. 7 приведена модель с блоком S-Function, который через некоторое время изменит свойства сопротивлений обмоток ДПТ.

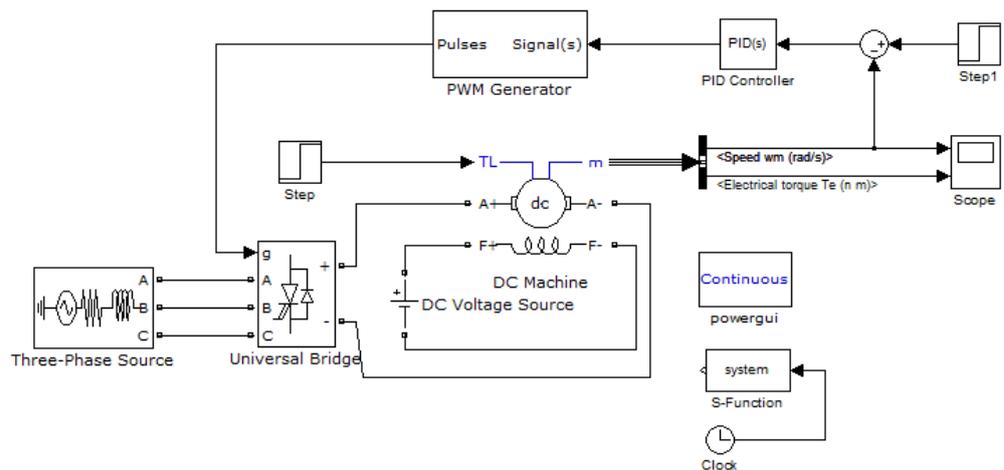


Рис. 7. Модель одноконтурной системы управления ДПТ с моделированием изменения свойств обмоток

Сравним результаты работы двух моделей на одном графике, для наглядности будем рассматривать лишь скорость ДПТ.

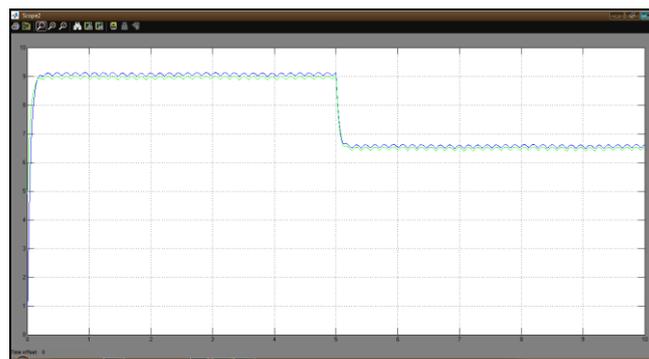


Рис. 8. Изменение скорости двигателя в момент пуска и в момент подачи нагрузки на 5-й секунде, с учетом изменения сопротивлений обмоток

В результате видно, что при изменении сопротивлений обмоток ДПТ и при тех же самых настройках ПИД регулятора, результат отличается примерно на 1,3%. При этом стоит обратить внимание на то, что в реальных условиях отличие результатов могут быть гораздо существеннее.

Двухконтурная адаптивная система

Двигатель постоянного тока с независимой обмоткой возбуждения, как динамическая система, описывается следующими уравнениями в операторной форме:

$$U_{\text{ДВ}} = I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} + E_{\text{я}} + L_{\text{я}} \cdot P \cdot I_{\text{я}}$$

$$E_{\text{я}} = K_{\text{эм}} \cdot \omega$$

$$M = K_{\text{эм}} \cdot I_{\text{я}}$$

$$M = M_{\text{с}} + J \cdot P \cdot \omega$$

где $I_{\text{я}}$ - ток якоря; $R_{\text{я}}$ - сопротивление обмотки якоря; $E_{\text{я}}$ - ЭДС якоря; $L_{\text{я}}$ - индуктивность обмотки якоря; $K_{\text{эм}}$ - электромеханический коэффициент двигателя (“постоянная” величина); M - момент двигателя; $M_{\text{с}}$ - статический момент нагрузки; J - момент инерции; $U_{\text{ДВ}}$ - напряжение на обмотке якоря; ω - угловая скорость вращения.

На основании этих уравнений может быть построена структурная схема двигателя как динамической системы. С целью большей наглядности построим новую модель ДПТ на основе уравнений в операторной форме приведенных выше, но добавим в данную модель дополнительный, второй контур регулирования. Дополнительно в данной модели реализован механизм настройки параметров ПИД регуляторов на основе использования нечеткого аппроксиматора, данная модель так же необходима по причине отсутствия возможности изменения параметров стандартного блока ДПТ из библиотеки Simulink во время моделирования.

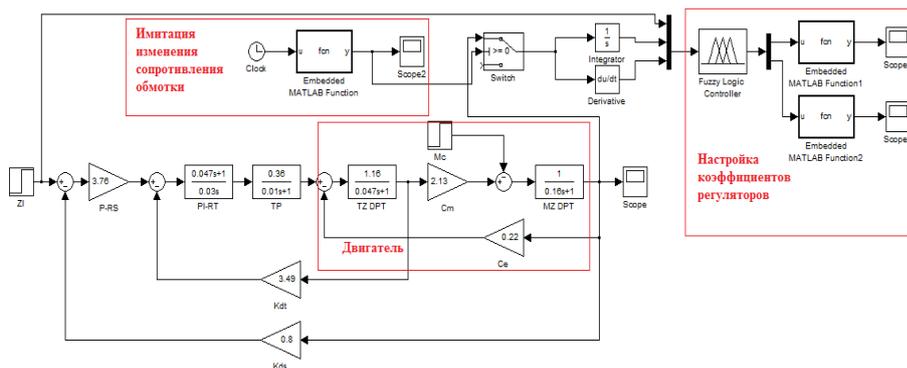


Рис. 9. Структурная схема САУ ДПТ с механизмом адаптации

Особенностью данной модели является присутствие блока Embedded MATLAB Function, имитирующего изменение сопротивления обмотки ДПТ в момент времени, заданный блоком Clock, тем самым моделируется изменение передаточной функции ДПТ.

В этот же момент времени с помощью блока Switch происходит подключение нечеткого аппроксиматора коэффициентов регулятора тока (Embedded MATLAB Function1 – отвечает за коэффициент усиления, Embedded MATLAB Function 2 – за постоянную времени), описание аналогичного подхода можно найти в [3-5], входными параметрами для данного блока служат интегрирующая, дифференцирующая составляющая выходного сигнала и управляющее воздействие.

Таким образом, корректируя передаточную функцию регулятора тока, в соответствии с изменением передаточной функцией ДПТ происходит настройка передаточной функции всей системы, для приведения её к нужному виду.

Результаты работы данной модели в сравнении с работой модели без настройки параметров регуляторов приведены на рис. 10.

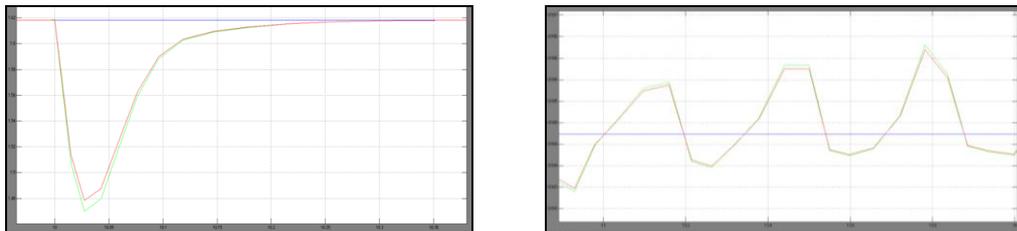


Рис. 10. Изменение скорости ДПТ в момент изменения сопротивления якоря (левый рисунок) и после (правый рисунок)

На каждом из рисунков приведены три графика: график без моделирования изменения сопротивления обмотки (прямая линия), график без настройки коэффициентов регулятора (кривая с минимальной по модулю амплитудой) и график с настройкой регулятора тока (кривая с максимальной по модулю амплитудой).

Результаты моделирования свидетельствуют о более качественном управлении двигателем с применением данного подхода.

Литература

1. Костюк, В.И., Осипов, В.И. Бесписковые самонастраивающиеся системы / В.И. Костюк, В.И. Осипов. - Киев: Техника, 1969. - 275 с.
2. Системы оцувствления и адаптивные промышленные роботы / Под ред. Е.П. Попова и В.В. Клюева. -М., 1985.
3. Морозов, И.Н., Кулаков, А.Г., Колесник, А.Е. Итеративный алгоритм ситуационного управления технологическим процессом / И.Н. Морозов, А.Г. Кулаков, А.Е. Колесник //Прикладные проблемы управления макросистемами /Труды Института системного анализа (ИСА РАН) /Под ред. Ю.С. Попкова, В.А. Путилова. -Т.39. -М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2008. – С.353-361.
4. Компьютерное моделирование переходных процессов в детерминированной и нечеткой системах регулирования /И.Н. Морозов и др.//Информационные технологии в региональном развитии: сб. научных трудов ИИММ КНЦ РАН, вып. IX. -Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2009. – С.84-87.
5. Управление технологической безопасностью процессов на основе оценки рисков принимаемых решений /И.Н. Морозов и др.//Информационные технологии в региональном развитии: сб. научных трудов ИИММ КНЦ РАН, вып. IX. -Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2009. – С.87-90.

Сведения об авторе

Кириллов Иван Евгеньевич, к.т.н., младший научный сотрудник,
e-mail: kirillovi@rambler.ru,
Ivan E. Kirillov, Ph. D. (Tech), junior researcher

УДК 004.94

И.Н. Морозов, И.Е. Кириллов

Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ ПРИ ПОСТРОЕНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация

В статье рассмотрена возможность применения теории нечетких множеств при создании автоматизированной системы регулирования процесса измельчения горно-обогатительных предприятий. Детально представлены существующая и предлагаемая системы регулирования, а также описана процедура разработки нечеткого регулятора. Предлагаемая система регулирования промоделирована в среде Matlab.

Ключевые слова:

имитационное моделирование, теория нечетких множеств, система автоматического регулирования.

I.N. Morozov, I.E. Kirillov

USING THE THEORY OF FUZZY SETS IN CONSTRUCTION OF AUTOMATED SYSTEM OF MANAGING GRINDING MINING AND PROCESSING ENTERPRISES

Abstract

The article discusses the possibility of applying the theory of fuzzy sets to create an automated control system of process of crushing ore mining and processing enterprises. Presented in detail the existing and proposed regulatory system and describes how to design a fuzzy controller. The proposed control system modeled in Matlab environment.

Keywords:

simulation, the theory of fuzzy sets, automatic control system.

Современное горно-обогатительное производство представляет собой сложный комплекс целенаправленно организованных технологических процессов.

Особое место в общей структуре горно-обогатительного производства занимают процессы рудоподготовки как наиболее энергоемкие и трудоемкие процессы, включающие в себя несколько стадий дробления и грохочения, а также стадию измельчения.

К качеству продуктов рудоподготовки (исходному материалу процессов обогащения) предъявляются все более высокие требования. Поэтому от эффективности процесса измельчения зависит работа всей технологической цепи обогатительной фабрики [1, 2].

Существующая структурная схема САР пульпового наполнения мельниц

Для создания более эффективной САР и возможностью настройки процесса на оптимум контур регулирования загрузки мельницы рудой

представляется каскадным, состоящим из двух вложенных контуров регулирования. Существующая структурная схема контура регулирования пульсового наполнения мельницы представлена на рис. 1.

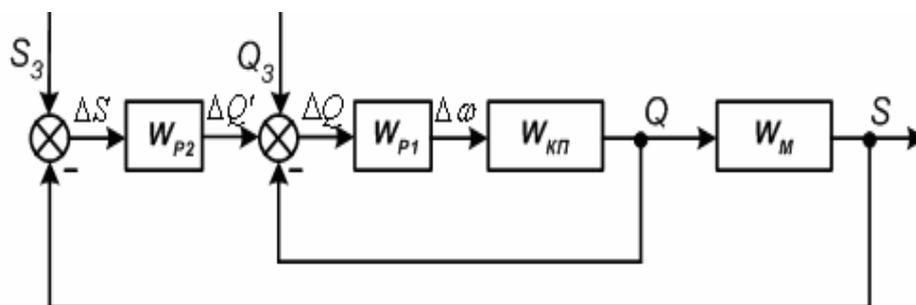


Рис. 1. Существующая структурная схема САР пульсового наполнения мельниц

Внутренний контур представляет собой стабилизирующий регулятор, который обрабатывает задание производительности по руде Q_3 . Измеренная текущая производительность наклонного конвейера по руде Q сравнивается с заданной Q_3 . Сигнал рассогласования ΔQ поступает на регулятор P_1 (W_{P1}), который вырабатывает сигнал изменения угловой скорости вращения $\Delta \omega$ (числа оборотов) приводного двигателя конвейера-питателя ($W_{кп}$). Изменение угловой скорости вращения приводного двигателя приводит к изменению производительности конвейера-питателя по руде.

Внешний контур стабилизирует пульсовое наполнение мельницы, которое характеризуется уровнем шума, производимого мельницей в зоне помола. Измеренное текущее значение уровня шума S (запаса материала в мельнице) сравнивается с заданным S_3 . Сигнал рассогласования ΔS поступает на регулятор P_2 (W_{P2}), который вырабатывает сигнал изменения задания внутреннего контура $\Delta Q'$.

Такая структура САР препятствует аварийной перегрузке мельницы рудой и настраивает процесс измельчения на оптимум.

Предлагаемая структурная схема САР пульсового наполнения мельниц

В структурной схеме системы с нечетким регулированием (рис. 2), по сравнению с классической, появились блок формирования задания и нечеткий регулятор наполнения мельницы по шуму. В этих звеньях присутствуют обязательные для нечеткой системы преобразователи: блок фаззифицирования (Ff), блок дефаззифицирования (Dff) сигналов, а также важные для фаззиуправления блоки принятия решений (Inf).

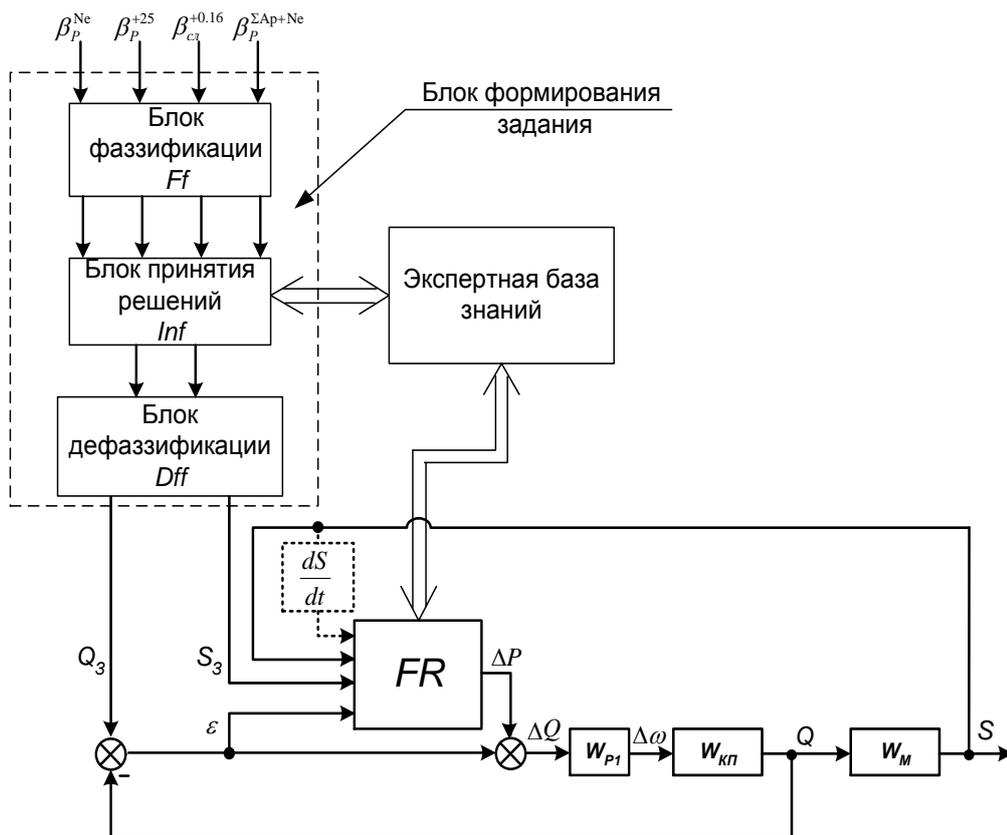


Рис. 2. Структурная схема САУ пульпового наполнения мельниц

Общий алгоритм определения задания по руде и шуму в блоке формирования задания представлен на рис. 3.

Описание и структура нечеткого регулятора

Информация о потоке руды, поступающей в мельницу, имеет неопределенный характер в отношении гранулометрического состава руды, ее влажности и измельчаемости. Поэтому применение нечетких методов управления в САУ мельницы может быть оправдано.

В нашем случае нечеткий регулятор [3] можно применить на регулировании загрузки мельницы по шуму. Управляющими сигналами, поступающими на нечеткий регулятор, примем шум мельницы (S), задание по шуму от оператора (S_3) и разность между текущим значением руды, поступающей в мельницу и заданием по руде от оператора (ϵ) (рис. 2).

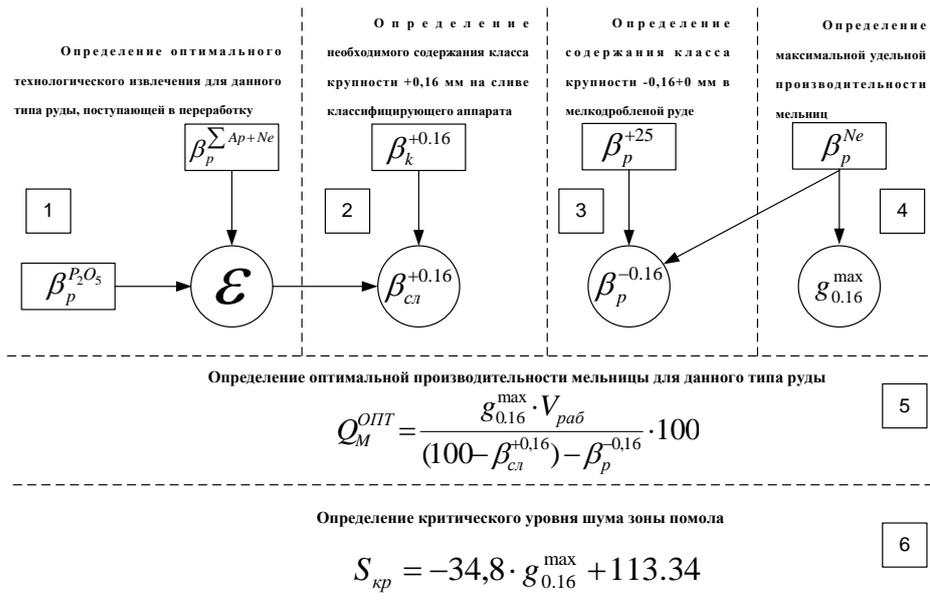


Рис. 3. Алгоритм определения задания по руде и шуму в блоке формирования задания

Структура разработанного нечеткого регулятора представлена на рис. 4.

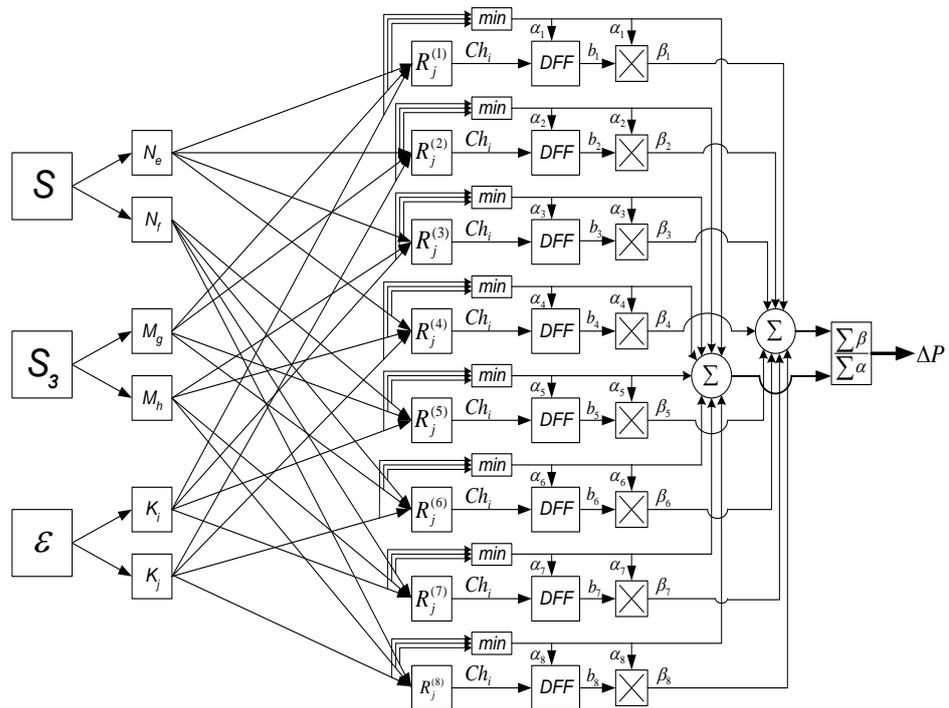


Рис. 4. Структурная схема нечеткого(fuzzy) регулятора

Введены лингвистические переменные, определены их терм-множества и заданы функции принадлежности каждому терм-множеству лингвистической переменной.

Были выделены три лингвистические переменные:

- «Шум» (S);
- «Задание по шуму» (S_3);
- «Разность по руде» (ε).

Лингвистические переменные S , S_3 и ε задаются на вход нечеткого регулятора. Далее происходит фаззиидентификация (фаззифицирование). Для фаззиидентификации были привлечены эксперты. В качестве экспертов привлекались в первую очередь опытные специалисты, все, кто непосредственно работает на пульте управления, контролирует технологический процесс. Экспертными методами определяются терм-множества и функции принадлежности всех лингвистических переменных, а также составляются алгоритмы фаззи-управляющих устройств (экспертной базы знаний). Далее определяются терм-множества ($N_e, N_f, M_g, M_n, K_i, K_j$), к которым относятся входные переменные. Каждая переменная может иметь различные степени принадлежности только двум терм-множествам.

Пример функции принадлежности терм-множеств лингвистических переменных показан на рис. 5.

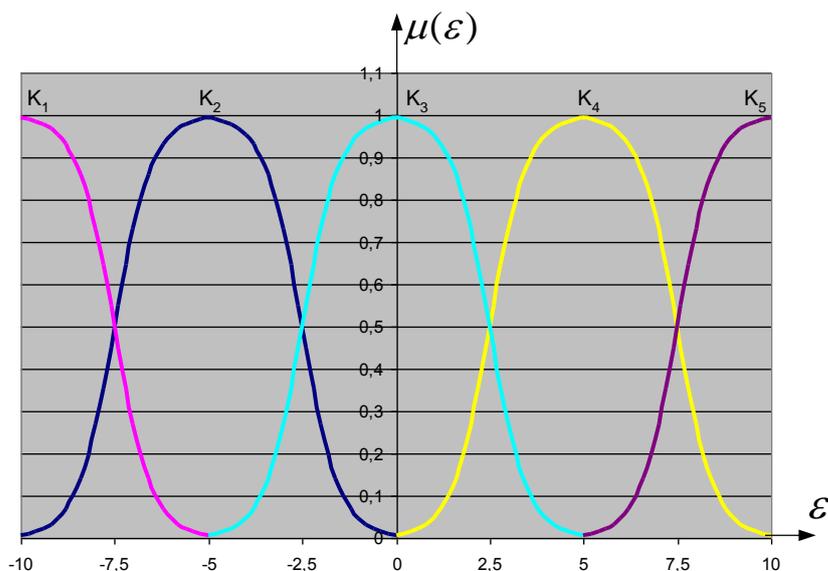


Рис. 5. Терм-множество входного параметра разность по руде

После чего определяются правила нечеткого вывода ($R_j^{(1)} - R_j^{(8)}$). Эти правила выбираются в соответствии с экспертной базой знаний.

Значения функции принадлежности для терм-множеств, а также ниже следующие базы правил приняты в результате наблюдения за объектом, а также в результате опроса экспертов (мельника, технолога-обогапителя, инженера по автоматизации).

Составим базу правил нечеткого вывода. В связи со сложностью графического представления базы правил сразу для трех управляющих переменных разобьем ее на две со связующей переменной ΔP .

Базу правил составляли в соответствии со следующими лингвистическими правилами, например:

Если $S = H$ и $\varepsilon = OM$ и $S_3 = T$ тогда $\Delta P = OM$.

Одновременно с определением правил происходил выбор минимума функций принадлежности α для каждого из восьми наборов. При выборе правил определялось некоторое терм-множество Ch_i , после чего оно в блоке DFF преобразовывалось вместе с α в уже конкретное число b_{1-8} , т.е. происходил процесс дефаззифицирования. Дефаззификация – процесс обратный фаззификации, т.е. преобразование нечетких значений в конкретные числа, четкие значения величин.

Дефаззифицирование осуществляется по методу центра тяжести по упрощенной формуле:

$$\Delta P = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i b_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}, \quad (1)$$

где b – абсцисса среднего значения выходного терма;

α – степень принадлежности выходного терма;

i – количество действующих выходных термов.

Моделирование системы с нечетким регулятором с помощью ЭВМ

Моделирование системы будем проводить в приложении Simulink программы Matlab. С этой целью в редакторе FIS определяем структуру регулятора, алгоритм нечеткого вывода, задаем все параметры функций принадлежности и базу знаний из 125 правил.

И с помощью приложения Simulink моделируем систему (рис. 6). Ввод ступенчатого воздействия, то есть изменение задания по шуму и производительности, осуществляем с учетом нечеткого вывода блока формирования задания.

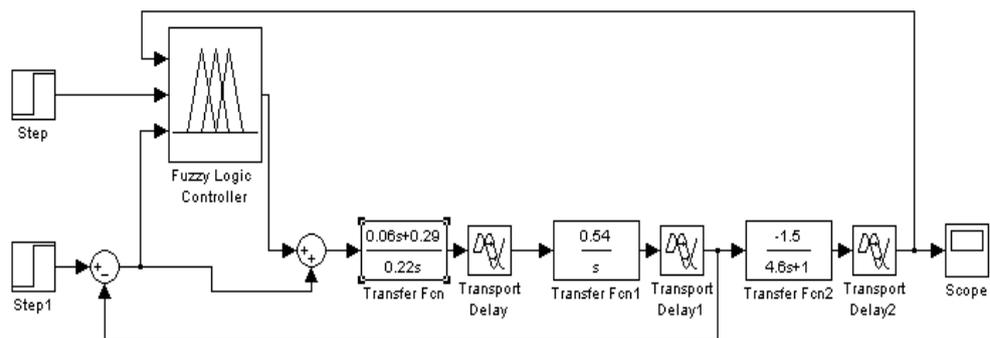


Рис. 6. Модель системы в приложении Simulink среды разработки Matlab

В результате моделирования был получен график изменения уровня шума в зоне помола при запуске загруженной мельницы и при изменении измельчаемости исходной руды (рис. 7).

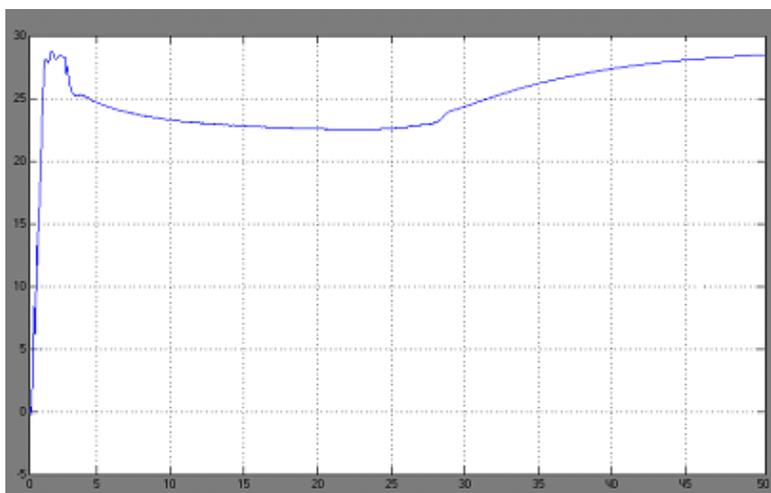


Рис. 7. График изменения уровня шума в зоне помола при запуске загруженной мельницы и при изменении измельчаемости исходной руды

Используя теорию нечетких множеств были разработаны: блок формирования задания и нечеткий регулятор, корректирующий задание по производительности конвейера-питателя мельницы. Результаты моделирования позволяют судить о возможном применении методов теории нечетких множеств при разработке систем автоматического регулирования процессов горно-обогатительных предприятий.

Литература

1. Оптимизация технологии и управления измельчения на одной секции АНОФ-2 / Отчет о НИР /ЛГИ. Руководитель О.Н. Тихонов. – Л., 1983. – 42 с.
2. Внедрение системы автоматического управления циклом измельчения очереди АНОФ-2 / Отчет о НИР ЦЛ ПО «Апатит». Руководитель Г.Е. Златорунская. – Апатиты, 1988. – 104 с.
3. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH /А.В. Леоненков. – СПб.:БХВ, Петербург, 2005. – 736 с.

Сведения об авторах

Морозов Иван Николаевич - к.т.н, младший научный сотрудник,
e-mail: moroz.84@mail.ru

Ivan N. Morozov - Ph.D. (Tech. Sci.), junior researcher

Кириллов Иван Евгеньевич - к.т.н, младший научный сотрудник,
e-mail: kirillovi@rambler.ru

Ivan E. Kirillov - Ph.D. (Tech. Sci.), junior researcher

УДК 004.942

Е.А. Сотников¹, И.Н. Морозов²

¹ ФГБОУ ВО «Мурманский арктический государственный университет»

² Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Аннотация

В статье рассмотрен вопрос имитационного моделирования распределения температурных полей в тепловых насосах. Для решения подобных задач авторами предлагается применять среду Matlab, включающую вычислительный инструмент PDE Toolbox. Приводятся результаты моделирования для различных технических реализаций рассматриваемого объекта.

Ключевые слова:

теплопередача, имитационное моделирование.

E.A. Sotnikov, I.N. Morozov

MODELING OF TEMPERATURE FIELDS AT VARIOUS TECHNICAL IMPLEMENTATION OF HEAT PUMPS

Abstract

In the article the question of the distribution of simulation of temperature fields in a heat pump. To solve these problems the authors propose to use Matlab environment, including computational tool PDE Toolbox. Results of the modeling results for the various technical implementations of the object.

Keywords:

heat transfer, simulation.

Теплоснабжение в условиях России с ее продолжительными и достаточно суровыми зимами требует весьма больших затрат топлива, которые превосходят почти в 2 раза затраты на электроснабжение. Основными недостатками традиционных источников теплоснабжения являются низкая энергетическая (особенно на малых котельных), экономическая и экологическая эффективность (традиционное теплоснабжение является одним из основных источников загрязнения крупных городов). Кроме того, высокие транспортные тарифы на доставку энергоносителей усугубляют негативные факторы, присущие традиционному теплоснабжению.

Нельзя не учитывать и такой серьезный термодинамический недостаток, как низкий эксергетический КПД использования химической энергии топлива для систем теплоснабжения, который в системах отопления составляет 6-10%.

Одним из эффективных энергосберегающих способов, дающих возможность экономить органическое топливо, снижать загрязнение окружающей среды, удовлетворять нужды потребителей в технологическом тепле, является применение нетрадиционных технологий производства теплоты.

Сейчас доступны различные источники тепловой энергии: нефть, уголь, газ, дерево и электричество. У всех имеются свои преимущества, но, взвесив все

критерии, такие как низкая стоимость капитальных вложений, хорошая управляемость, практически абсолютная чистота, большой комфорт и довольно скромные эксплуатационные расходы. Легко прийти к выводу, что отопление с использованием теплового насоса - это выбор сегодняшнего и завтрашнего дня [1].

Рассмотрим стационарный процесс переноса теплоты через плоскую стенку (рис. 1). Возможны различные способы подвода теплоты к одной поверхности стенки и его отвода через другую: за счет конвекции горячей или холодной жидкости около поверхности стенки, теплообмена излучением с другими телами, непосредственного контакта с другими более (или менее) нагретыми твердыми стенками и др. Предположим, что в любом случае подвода (отвода) теплоты температуры двух поверхностей стенки постоянны: $T_{c1} = const$ и $T_{c2} = const$.

При этом изотермические поверхности в стенке будут представлять собой плоскости, перпендикулярные к оси Ox . Таким образом, в нашем случае $\partial T/\partial y = 0$, $\partial T/\partial z = 0$ и $\partial T/\partial x \neq 0$. С учетом всех допущений уравнение теплопроводности примет вид [2]:

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) = 0. \quad (1)$$

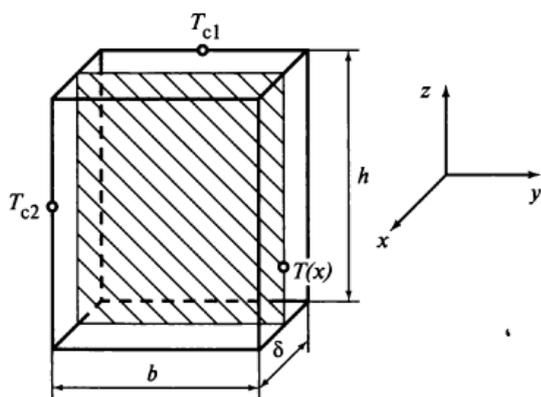


Рис. 1. Плоская стенка

Искомая функция $T = T(x)$ должна удовлетворять дифференциальному уравнению (1) и граничным условиям:

$$T(x)|_{x=0} = T_{c1}; \quad T(x)|_{x=\delta} = T_{c2}. \quad (2)$$

Сначала рассмотрим случай постоянного коэффициента теплопроводности стенки. При $\lambda = const$ в (1) λ сокращается, тогда путем двукратного интегрирования (1) находим:

$$T = C_1 x + C_2.$$

Определив постоянные с помощью (2), получим:

$$T = T_{c1} + \frac{T_{c2} - T_{c1}}{\delta} x. \quad (3)$$

Таким образом, при $\lambda = \text{const}$ температура в плоской стенке изменяется по линейному закону.

Вектор плотности теплового потока в изотропном теле перпендикулярен к изотермической поверхности. Поэтому в нашем случае $q_y = 0$ и $q_z = 0$.

$$\frac{dq_x}{dx} = 0. \quad (4)$$

откуда следует, что $q_x = \text{const}$. Значение q_x можно найти с помощью закона Фурье:

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{\lambda}{\delta} (T_{c1} - T_{c2}). \quad (5)$$

Термическое сопротивление, обусловленное внутренним механизмом процесса теплопроводности, обозначим R_λ . Кроме того, здесь и в дальнейшем индекс «x» в обозначении проекции вектора q на ось O_x опустим, т.е. $q_x = q$. Из (5) получим:

$$R_\lambda = \frac{T_{c1} - T_{c2}}{q} = \frac{\delta}{\lambda}. \quad (6)$$

С учетом сказанного формулу (5) представим в виде:

$$q = \frac{T_{c1} - T_{c2}}{\frac{\delta}{\lambda}}, \quad (7)$$

или тоже самое,

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\frac{\delta}{\lambda}}. \quad (7a)$$

Таким образом, плотность теплового потока, проходящего через плоскую стенку, прямо пропорциональна разности температур ее поверхностей и обратно пропорциональна термическому сопротивлению [2].

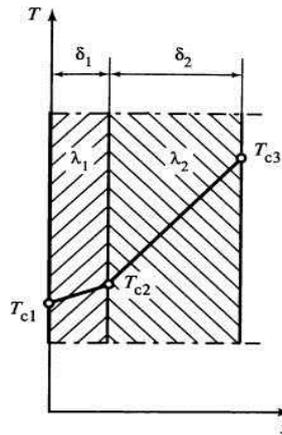


Рис. 2. Распределение температуры в двухслойной стенке с постоянными теплопроводностями слоев

Для многослойной плоской стенки $q = \text{const}$. Тогда, например, для двухслойной стенки (рис. 2) можно записать:

$$q = \frac{T_{c1} - T_{c2}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}},$$

$$q = \frac{T_{c2} - T_{c3}}{\frac{\delta_2}{\lambda_2}}.$$

Перенеся термические сопротивления в левую часть этих выражений, а затем их сложив, получим:

$$q = \frac{T_{c1} - T_{c3}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}.$$

Если стенка состоит из n слоев, коэффициенты теплопроводности которых $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, а толщины $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$, то:

$$q = \frac{T_{c1} - T_{c,n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}. \quad (8)$$

Анализируя с помощью закона Фурье изменение температуры в трехслойной стенке (рис. 3), нетрудно качественно предсказать зависимость $T = T(x)$ в однослойной стенке, если теплопроводность ее зависит от температуры.

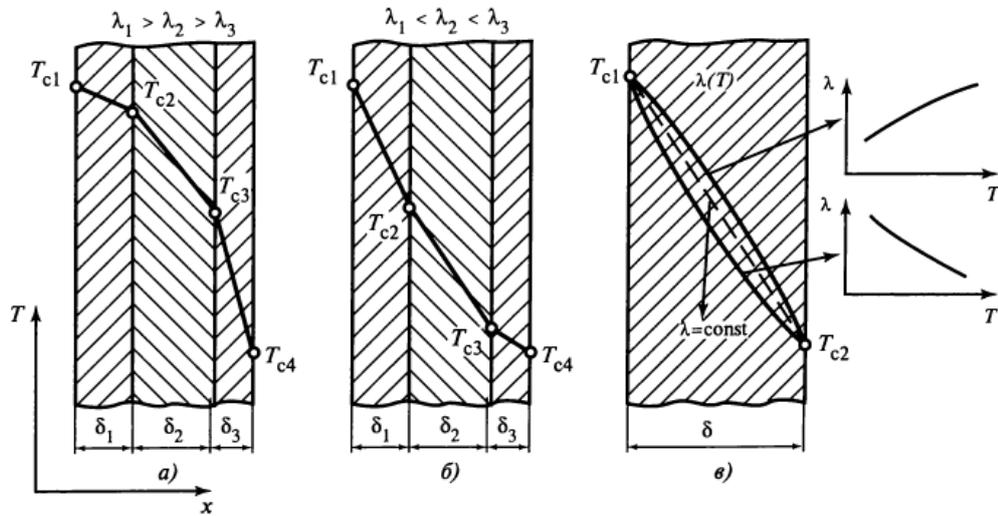


Рис. 3. Распределение температуры в трехслойной стенке (а, б) и вид температурных кривых (в) при различных зависимостях $\lambda = \lambda(T)$

Задачу по определению температурного поля в стенке при $\lambda = \lambda(T)$ можно решить следующим образом. Преобразуем (1) и (2) посредством подстановки:

$$u = \int_{T_0}^T \lambda dT, \quad (9)$$

где T_0 – произвольная температура.

Такое преобразование математического описания стационарных процессов теплопроводности называется преобразованием Кирхгофа.

Из (2) получим граничные условия для функции $u = u(T) = u[T(x)]$:

$$u(T)|_{x=0} = u_1 = \int_{T_0}^{T_{c1}} \lambda dT, \quad (10)$$

$$u(T)|_{x=\delta} = u_2 = \int_{T_0}^{T_{c2}} \lambda dT. \quad (11)$$

Уравнение (1) приводится к виду:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = 0.$$

Решение этого уравнения с учетом граничных условий (10) и (11) можно записать как:

$$u = u_1 + \frac{u_2 - u_1}{\delta} x. \quad (12)$$

Выражения (12) и (3) отличаются друг от друга только обозначениями величин.

Плотность теплового потока:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} = -\frac{du}{dx} = \frac{u_1 - u_2}{\delta}. \quad (13)$$

Имея в виду (10) и (11), получаем:

$$u_1 - u_2 = \int_{T_0}^{T_{c1}} \lambda dT + \int_{T_{c2}}^{T_0} \lambda dT = \int_{T_{c2}}^{T_{c1}} \lambda dT.$$

Среднеинтегральное значение λ определяется по формуле:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{T_{c1} - T_{c2}} \int_{T_{c2}}^{T_{c1}} \lambda dT = \frac{u_1 - u_2}{T_{c1} - T_{c2}}. \quad (14)$$

Тогда вместо (13) можно записать:

$$q = \frac{T_{c1} - T_{c2}}{\delta} \bar{\lambda}. \quad (15)$$

Таким образом, мы получили обобщение формулы (7) на случай $\lambda = \lambda(T)$.

Расчет температур стенки по формуле (12), а также $\bar{\lambda}$ облегчается, если имеется таблица значений $u(T)$ для конкретного материала. Таковую таблицу несложно получить с помощью компьютера. Из нее можно найти значения u_1 и u_2 по заданным температурам T_{c1} и T_{c2} , а с помощью этих значений по (14) рассчитать λ и по (12) u в любой точке $0 < x < \delta$. По найденному значению u в таблице можно отыскать температуру в данной точке стенки [2].

В качестве примера теплового насоса типа воздух-воздух может служить любой бытовой кондиционер. К примеру, в данной работе используется бытовой оконный кондиционер марки БК1500.

С помощью программной среды Matlab, включающей вычислительный инструмент PDE Toolbox, были получены температурные поля для стенок рассматриваемого кондиционера (рис. 4, 5).

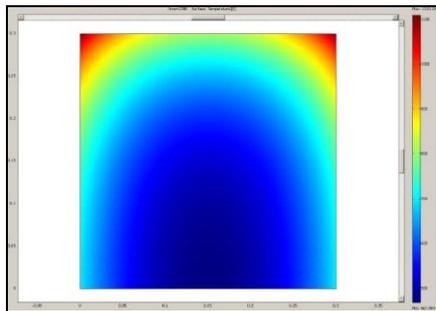


Рис. 4. Распределение температурных полей при реализации стенок из одного слоя

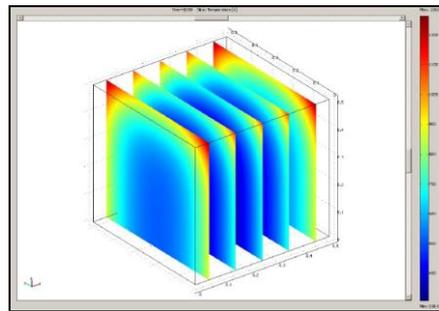


Рис. 5. Распределение температурных полей при реализации стенок из нескольких слоев

Как видно из полученных результатов моделирования распределение температурных полей в стенках тепловых насосов достаточно неоднородно, что в свою очередь позволяет предположить о значительном влиянии данного фактора на стабилизацию работы тепловых насосов и о необходимости дальнейших исследований в области имитационного моделирования теплообмена.

Литература

1. Баскаков, А.П. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / А.П. Баскаков. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТИ УПИ, 2004. - 87с.
2. Цветков, Ф.Ф., Григорьев, Б.А. Теплообмен: учебное пособие для вузов / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. - изд. 2-е, перераб. и доп. -М.: Изд-во МЭИ, 2005. - 550 с.

Сведения об авторах

Сотников Евгений Анатольевич – магистр,

e-mail: s.john93@mail.ru

Evgeniy A. Sotnikov - master

Морозов Иван Николаевич - к.т.н, младший научный сотрудник,

e-mail: moroz.84@mail.ru

Ivan N. Morozov - Ph.D. (Tech. Sci.), junior researcher

УДК 004.942

К.С. Музыченко¹, И.Н. Морозов²

¹ ФГБОУ ВО «Мурманский арктический государственный университет»

² Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТОПИТЕЛЬНЫХ РАДИАТОРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ

Аннотация

В статье рассмотрен подход к построению модели отопительных радиаторов. Особенности исследуемого процесса дают основания считать перспективным применение методов имитационного моделирования для определения конечных параметров объекта. Представлена модель отопительного радиатора при работе с различной нагрузкой.

Ключевые слова:

теплопередача, имитационное моделирование.

K.S. Muzychenko, I.N. Morozov

SIMULATION RADIATORS WITH DIFFERENT MODES OF OPERATION

Abstract

The article describes the approach to the construction of a model of heating radiators. Features of the process under investigation give reason to consider a promising application of simulation techniques to determine the final parameters of the object. The model of the heating radiator when working with different load.

Keywords:

heat transfer, simulation.

Отпуск тепла и его потребление – это емкие и информативные параметры, лежащие в основе теплотехнических и экономических расчетов. Отопление помещений может осуществляться как постоянным обогревом, так и прерывистым. Для целей повышения энергоэффективности систем отопления (снижения энергопотребления) возможно использование прерывистого режима подачи теплоносителя. Однако время натопа помещения в нормативных документах не регламентируется, т.е. предполагается только постоянное отопление [1]. При прерывистом отоплении существенным фактором следует рассматривать скорость восстановления температурного поля помещений до расчетного значения.

Исследование эффективности методов управления потреблением тепловой энергии возможно только при наличии математических моделей объектов управления, обладающих определенной степенью точности.

Рассмотрим процессы теплопередачи.

Для элемента поверхности теплообмена площадью dF_x уравнение теплопередачи имеет вид [2]:

$$dQ = k \Delta T dF_x \quad (1)$$

где k - коэффициент теплопередачи; ΔT - местный температурный напор.

Тепловая мощность теплообменника:

$$Q = \int_0^F k \Delta T dF_x. \quad (2)$$

Коэффициент теплопередачи в случае плоской стенки представляет собой величину, обратную сумме термических сопротивлений:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (3)$$

Как коэффициент теплопередачи, так и температурный напор изменяются вдоль поверхности теплообмена. В простейшем случае (при относительно малом изменении k) можно принять $k \approx const$.

Тогда из (2) получаем уравнение теплопередачи:

$$Q = k \overline{\Delta T} F, \quad (4)$$

где $\overline{\Delta T}$ - средний интегральный температурный напор.

$$\overline{\Delta T} = \frac{1}{F} \int_0^F \Delta T dF_x.$$

В случае прямо- или противоточной схемы движения теплоносителей:

$$\overline{\Delta T} = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_m}{\ln \frac{\Delta T_0}{\Delta T_m}}. \quad (5)$$

Если коэффициент теплопередачи сильно изменяется вдоль поверхности теплообмена и к тому же зависит от разности температур ΔT , уравнение (4) теряет смысл [2]. В ряде случаев значение k существенно зависит от температуры стенки. Тогда для расчета площади поверхности теплообмена необходимо использовать поинтервальный метод расчета (т.е. разбивать всю искомую поверхность на достаточно большое число участков).

$$Q = k \overline{\Delta T} F, \quad (6)$$

где $k \overline{\Delta T}$ - среднее интегральное значение произведения $k \Delta T$.

Для имитационного моделирования применялась среда Matlab, включающая вычислительный инструмент PDE Toolbox, т.е. специальный инструмент для интегрирования уравнений (систем уравнений) в частных производных (Partial Differential Equations).

Радиатор моделировался в виде прямоугольного блока длиной 1,3 м, высотой 0,4 м, глубиной 0,14 м, полный тепловой поток от радиатора – 980 Вт; 50% - конвективная составляющая и 50% - радиационная составляющая. В холодный период года в жилых помещениях, когда они не используются, допускается обеспечивать температуру внутреннего воздуха ниже нормируемой, но не менее 15°C [1]. Данные параметры являются граничными условиями для моделирования распределения теплового поля радиатора.

Далее представлены результаты моделирования работы отопительного радиатора при постоянной передаче теплоносителя и прерывистой.

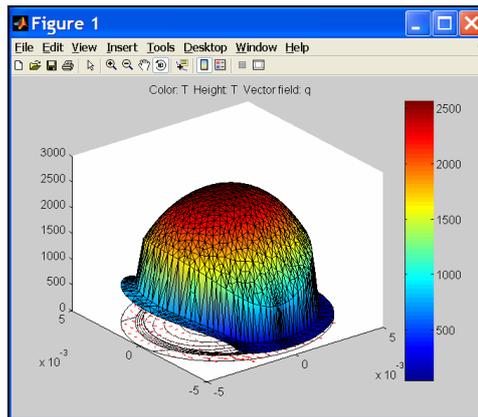


Рис. 1. Распределение температурного поля при постоянной тепловой нагрузке

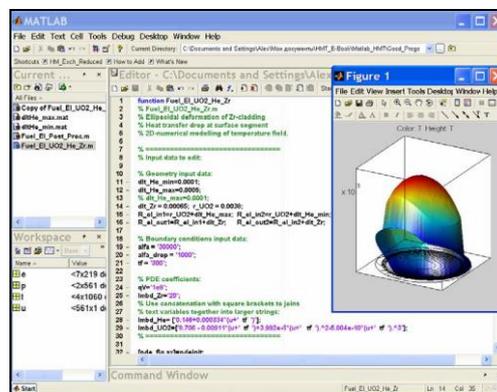


Рис. 2. Распределение температурного поля при прерывистой тепловой нагрузке

В результате имитационного моделирования видно отклонение температурного поля при одних и тех же граничных условиях и разных тепловых нагрузках, что, в свою очередь, позволит проводить дальнейшие исследования в области теплотехнических и экономических расчетов.

Литература

1. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. – М.: Госстрой России, 2004. – 56 с.
2. Цветков, Ф.Ф. Тепломассообмен: учебное пособие для вузов. - 2-е изд., испр. и доп./ Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. -М.: Изд. МЭИ, 2005. - 550 с.

Сведения об авторах

Музыченко Кирилл Сергеевич – магистр,
e-mail: mzkirill@mail.ru
Kirill S. Muzychenko - master

Морозов Иван Николаевич - к.т.н, младший научный сотрудник,
e-mail: moroz.84@mail.ru
Ivan N. Morozov - Ph.D. (Tech. Sci.), junior researcher

УДК 622.7:519.711/2

В.В. Бирюков¹, А.Г. Олейник²

¹ Горный институт Кольского НЦ РАН

² Институт информатики и математического моделирования технологических процессов
Кольского НЦ РАН

НЕТРАДИЦИОННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА МАГНИТНО – ГРАВИТАЦИОННОЙ СЕПАРАЦИИ*

Аннотация

Предложен подход к разработке математической модели процесса магнитно-гравитационного разделения, использующий закономерности образования ожигенного слоя ферромагнитных частиц стабилизированного магнитным полем и обеспечивающий получение результата моделирования в режиме реального времени технологического процесса.

Ключевые слова:

магнитно-гравитационный метод разделения, прогнозная математическая модель, ожигенный слой, магнитная стабилизация, диполь - дополнительное магнитное взаимодействие, магнитно-гравитационные (МГ) сепараторы.

V.V. Birukov, A.G. Oleynik

INNOVATIVE APPROACHES TO MODELING OF PROCESSES OF MAGNETIC – GRAVITY SEPARATION

Abstract

An approach to the development of a mathematical model of the magnetic-gravity separation process is proposed in the article. The model is based on the regularities of formation of the liquefied layer of ferromagnetic particles which stabilized by a magnetic field. The model provides the result of the simulation in real-time mode.

Keywords:

Magnetic-gravity separation method, predictive mathematical model, fluidized bed, magnetic stabilization, dipole - dopolnoe magnetic interaction, magnetic-gravity (MG) separators.

Введение

Основным методом обогащения магнетитовых руд в мировой практике остается мокрая магнитная сепарация (ММС) с использованием барабанных сепараторов, основанная на высокой магнитной восприимчивости главного рудного минерала – магнетита. В ходе технологических процессов рудо-подготовки проводится измельчение частиц руды для максимального раскрытия минеральных зерен, входящих в их состав. В результате появляются частицы, имеющие непрерывное распределение по содержанию в них железа от 0 до 100%. При обогащении руды методом мокрой магнитной сепарации требуется достижение степени раскрытия (массовое отношение раскрытых зерен магнетита к сросткам в определенном классе крупности) не менее 90% для обеспечения кондиционности концентратов по железу.

* Работа выполнена в соответствии с госзаданием (тема НИР № 0232-2014-0023).

Метод магнитно-гравитационной сепарации заключается в разделении частиц суспензии в восходящем закрученном потоке жидкости с наложением внешнего вертикально ориентированного слабо неоднородного магнитного поля [1 - 3].

Магнитно-гравитационный (МГ) сепаратор, реализующий данный метод разделения, представляет собой цилиндроконическую емкость, в которой в верхней части смонтирован патрубок подачи исходной суспензии и устройство слива немагнитной фракции, а в нижней части – устройство для выпуска концентрата. Промывная вода подается тангенциально по патрубкам в конической части аппарата. В аппарате реализованы встречные потоки воды и суспензии (рис. 1).

Исходная ферромагнитная суспензия подается через патрубок в верхней части аппарата и встречается с восходящим закрученным потоком промывной воды. В цилиндрической части аппарата формируется закрученный оживенный (кипящий) слой ферромагнитной суспензии. Снаружи цилиндроконического корпуса смонтирован электромагнитный соленоид, создающий в аппарате вертикально ориентированное магнитное поле.

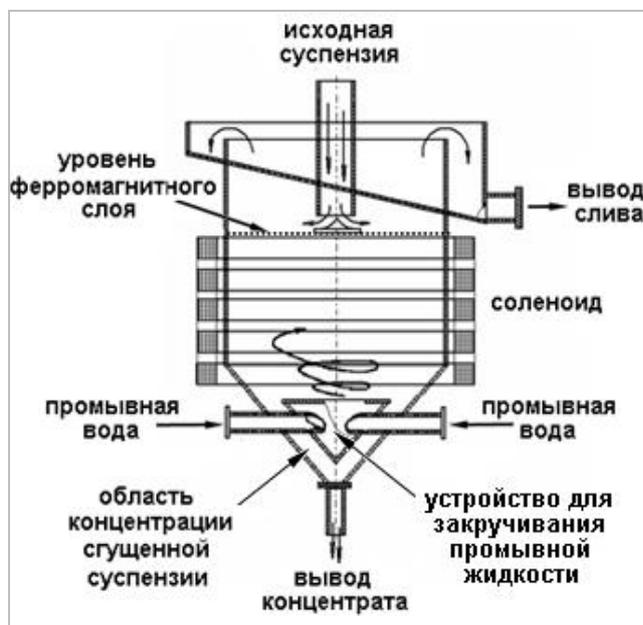


Рис. 1. Эскиз и принцип работы магнитно-гравитационного сепаратора

Процессы разделения минеральных компонентов, происходящие в оживленном (кипящем) слое частиц с наложением внешнего магнитного поля, отличаются повышенной эффективностью и избирательностью, что позволяет селективно выделять концентраты с заранее заданными технологическими параметрами. В зависимости от настройки управляющих параметров имеется возможность использования их в различных местах технологических цепей предприятий, для решения задач сгущения, стадийного выделения рядовых

магнетитовых концентратов и получения суперконцентратов. Особо актуально применение МГ – сепараторов в процессах получения сырья для горячебрикетированного железа, обладающего в настоящее время высокой конкурентной способностью.

МГ – сепараторы работают на дробильно-обогащительной фабрике АО ОЛКОН. Патент на постройку и использование сепараторов был продан Горным институтом КНЦ РАН на АО “Сюд-Варангер” в Норвегию.

Однако широкое внедрение магнитно-гравитационного оборудования сдерживается отсутствием математической модели процесса работы сепаратора, которая обеспечивает возможность управления функционированием аппарата и качеством продукции в реальном режиме времени технологического процесса.

Моделирование процесса разделения с использованием метода вычислительной гидродинамики

Технологические суспензии в объемах обогащительных аппаратов не могут быть отнесены к классу жидкостей, газов или твердых деформируемых тел и являются многофазными (гетерогенными) средами. Для моделирования течений многофазных сред разработан специализированный математический аппарат многофазного многоскоростного континуума (ММК), в основу которого положены работы [4, 5]. Частицы технологических суспензий в обогащительных аппаратах имеют непрерывные функции распределения физических свойств. При использовании математического аппарата ММК предусмотрена дискретизация этих функций с формированием конкретного числа фракций частиц с определенными физическими свойствами – плотностью, крупностью, формой и т.д. Каждая подобная фракция частиц считается отдельным континуумом или отдельной фазой, движущейся в рамках общего континуума под действием различных физических сил со своей скоростью. Для этого каждая дисперсная фаза считается сжимаемой псевдожидкостью со своей изменяемой плотностью и удельным объемом в каждой точке пространства. При этом

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_N,$$

$$\alpha_1 = \frac{V_1}{V}, \alpha_2 = \frac{V_2}{V}, \dots, \alpha_N = \frac{V_N}{V}, \sum_i \alpha_i = \frac{V_1}{V} + \frac{V_2}{V} + \dots + \frac{V_N}{V} = 1,$$

где V - общий объем многофазной жидкости, а α_i - удельный объем отдельной фазы.

Отдельные фазы движутся сквозь друг друга и при этом могут обмениваться массой, импульсом и энергией. Движение многофазной жидкости удобно моделировать комплектом из $3(N+1)$ уравнений сохранения в форме Эйлера.

Уравнение непрерывности для жидких фаз:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \vec{v}_q) = \frac{1}{\rho_q} \left(\sum_{p=1}^n m_{pq} - \alpha_q \frac{d_q \rho_q}{dt} \right).$$

Уравнение закона сохранения импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \alpha_q \rho_q (\vec{F}_q + \vec{F}_{a,q} + \vec{F}_{vm,q}) + \sum_{p=1}^n (K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) + m_{pq} \vec{v}_{pq})$$

где \vec{g} - ускорение свободного падения, $\bar{\bar{\tau}}_q$ тензор деформации напряжения фазы q :

$$\bar{\bar{\tau}}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \vec{v}_q \bar{\bar{I}}$$

В уравнениях μ_q и λ_q - тензор сдвига и объемная вязкость фазы, \vec{F}_q - внешняя массовая сила, $\vec{F}_{a,q}$ - архимедова сила, $\vec{F}_{vm,q}$ - виртуальная массовая сила, \vec{R}_{pq} - сила взаимодействия между фазами, p - давление распределенное на все фазы, \vec{v}_{pq} - межфазная скорость.

Уравнение замыкается соответствующими выражениями для межфазной силы \vec{R}_{pq} . Эта сила зависит от сопротивления, давления, сцепления и других эффектов, и определяется в соответствии с этими условиями $\vec{R}_{pq} = -\vec{R}_{qp}$ и $\vec{R}_{qq} = 0$.

Данный подход к созданию моделей процессов и технологических аппаратов называется вычислительной гидродинамикой (CFD) [6, 7].

CFD модели течений многофазных сред позволяют получить распределения давлений, скоростей, концентраций и температур в объемах технологического оборудования и, тем самым, получить исчерпывающее описание процессов разделения минеральных компонентов. Аналитическое решение систем дифференциальных уравнений подобных моделей невозможно, и они реализуются только в современных конечно элементных программных CAD – CAM – CAE комплексах типа ANSYS Fluent, ANSYS CFX, COMSOL. Работа CFD моделей в реальном масштабе времени невозможна, так как требует чрезмерных аппаратных затрат (размер конечно-элементной пространственной сетки $>10^6$ ячеек). Все это приводит к тому, что подобные модели используются в основном в научных исследованиях и редко в инженерной практике.

Использование подходов, применяемых в моделировании химико-технологических процессов

Сложности с использованием полных гидродинамических моделей течений многофазных суспензий приводят к применению на практике, например, при проектировании химико – технологического оборудования, упрощенных моделей типа “структуры потоков в объемах аппаратов”, где в качестве основной характеристики рассматривается функция распределения времени пребывания элементов потока в аппарате [8 - 10]. Для этого разработан ряд

идеализированных моделей, к которым, с известными допущениями, можно свести внутреннюю гидродинамику аппаратов:

– Модель идеального вытеснения (МИВ), которая сводится к движению элементов потока по параллельным траекториям без смешивания:

$$\left(\frac{1}{L}\right) \frac{d(Vc_i)}{dt} = -\frac{d(v_i c_i)}{dl} + G_{i(l)}^\Sigma$$

$$i = 1, \dots, n$$

где c_i , v_i , $G_{i(l)}^\Sigma$ – концентрация, скорость потока и функция источника i - компонента, V - объем зоны.

– Модель идеального смешения (МИС) противоположна по смыслу МИВ. В ней предполагается, что все потоки, попадающие в аппарат, идеально перемешиваются во всем объеме:

$$\left(\frac{1}{L}\right) \frac{d(Vc_i)}{dt} = v^{(0)} c_i^{(0)} - v c_i + G_i^\Sigma$$

$$i = 1, \dots, n$$

– Однопараметрическая диффузная модель предусматривает конечные скорости диффузии D_i и перемещения v_i компонентов.

$$\left(\frac{1}{L}\right) \frac{d(Vc_i)}{dt} = \frac{D_i}{L} \frac{d^2(Vc_i)}{dl^2} - \frac{d(v_i c_i)}{dl} + G_{i(l)}^\Sigma$$

$$i = 1, \dots, n$$

– Ячеечная модель структуры потоков является комбинацией вышеперечисленных моделей для различных областей аппаратов. В ячейочной модели могут быть предусмотрены замкнутые циклы и байпасные потоки. Выход одной ячейки такой модели является входом для следующей.

Традиционно процессы разделения компонентов минеральных суспензий имеют плавные функции распределения по физическим свойствам ξ : линейным размерам, плотности, магнитной восприимчивости, диэлектрической проницаемости, флотируемости и т. д. Свойства изменяются в диапазоне $[\xi_{\min} - \xi_{\max}]$, а процессы разделения моделируются уравнениями диффузии – переноса [11, 12]:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} = D \operatorname{div}(\operatorname{grad} \gamma) - \operatorname{div}(\gamma \vec{v}),$$

где γ - узкая фракция разделяемого материала, которая движется в зоне сепарации под действием приложенных сил с усредненной скоростью \vec{v} , зависящей от их физических свойств, а D - коэффициент макроdiffузии.

Решением уравнения диффузии - переноса является функция $\bar{\varepsilon}_{ik}$ - извлечение полезного компонента в слив и концентрат или сепарационная

характеристика процесса разделения, обладающая прогнозными характеристиками. Используя классификацию по структуре потоков, данную модель можно отнести к однопараметрической диффузной модели. Однако, разработка прикладных моделей на основе представленных традиционных методов моделирования процессов разделения сталкивается с проблемами нахождения функций \bar{v} и D .

Разработка модели ожиженного слоя в МГ-сепараторе

В настоящей работе предпринята попытка провести анализ одной из конструкций МГ сепараторов для разработки математической модели, обладающей прогнозными свойствами в реальном режиме времени и возможностью определения направления совершенствования конструкций аппаратов.

К настоящему времени разработано достаточно большое количество аппаратов, конструктивно отличающихся друг от друга. Известны конструкции с импеллерами для закручивания суспензии, с несколькими соленоидами, увеличенного диаметра и т.д. При разработке математической модели за основу была принята конструкция аппарата, установленного на предприятии “Сюд-Варангер” (Норвегия), схема которого была показана на рис. 1.

В аппаратах данного типа частицы исходной суспензии в пространстве разделения движутся под действием гравитационной, архимедовой (выталкивающей) и гидродинамической силы сопротивления, образуя ожиженный слой (рис. 2) [13 - 15].

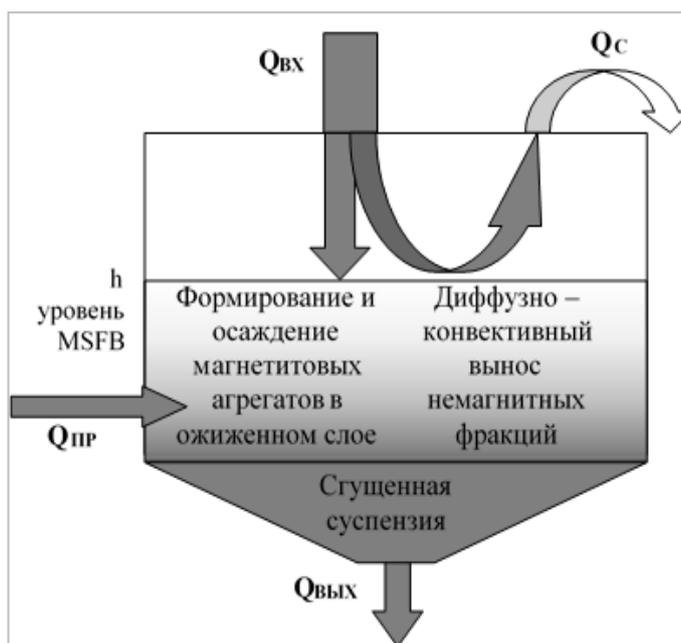


Рис. 2. Схема основных потоков в МГ-сепараторе

Для частиц, входящих в состав традиционного оживленного слоя, имеется две характерные скорости, зависящие от их физических свойств: фиктивная скорость начала псевдооживления W_0 и скорость начала их гидротранспорта W_v . Фиктивная скорость W - это скорость жидкости при данном расходе, отнесенная к сечению пустого аппарата. При фиктивной скорости жидкости меньше скорости начала псевдооживления частицы суспензии существуют в виде лежащего зернистого слоя (рис. 3).

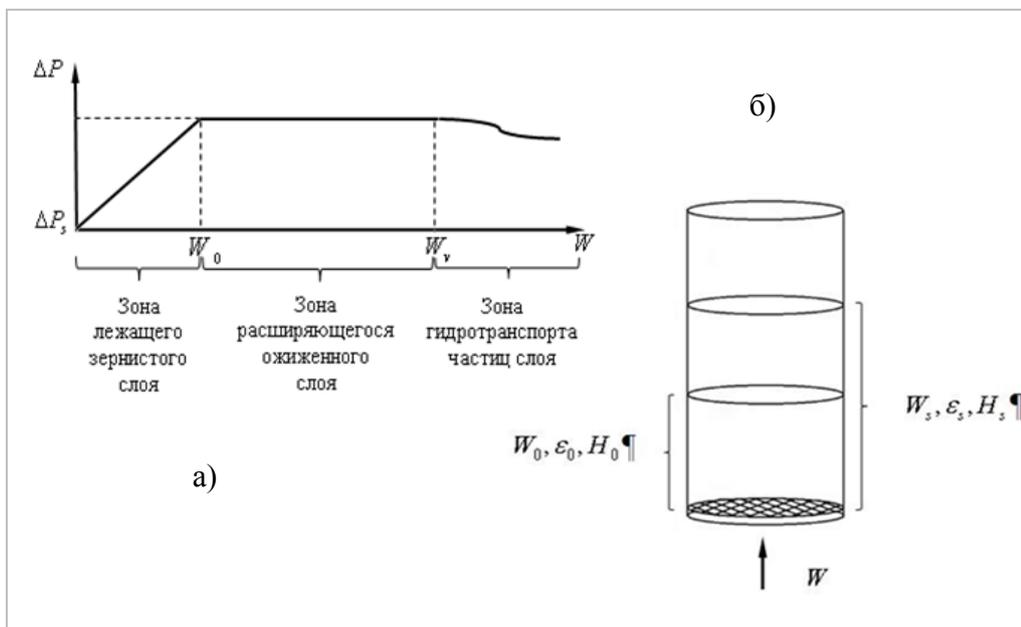


Рис. 3. а) - операционные режимы псевдооживления;
б) - расширение псевдооживленного (кипящего слоя)

При скорости жидкости, находящейся в диапазоне между скоростями начала псевдооживления и гидротранспорта, частицы хаотично перемещаются по всему слою и при этом интенсивно перемешиваются. При скоростях, превышающих скорость гидротранспорта, происходит вынос частиц из аппарата.

Для восходящего потока жидкости слой является гидродинамическим сопротивлением и, следовательно, перепад давления в слое равен его весу:

$$\Delta P_s = (\rho_s - \rho_f)(1 - \varepsilon)Hg.$$

При увеличении фиктивной скорости оживленный слой расширяется, и его высота связана с определенным значением порозности ε выражением:

$$\frac{\Delta P_s}{H} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu w}{(\phi D_p)^2} + 1.75 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g w^2}{\phi D_p},$$

где ΔP - перепад гидродинамических давлений в слое, H - высота оживленного слоя, ε - порозность слоя (удельный объем жидкости), ϕ - фактор

формы частиц слоя, D_p - диаметр частиц слоя, ρ_g - ускорение свободного падения, w - фиктивная скорость жидкости.

Изменение суммарной массы твердых частиц, накапливаемых в ожженном слое, можно также описать через соотношение потоков на входе и выходе в аппарате за промежуток времени:

$$\Delta M(t) = (Q(t) - q(t)) \Delta t, \text{ или, общем случае:}$$

$$\Delta M(t) = \int_0^t (Q(t) - q(t)) dt.$$

Решение системы уравнений позволит получить значения переменных w, H, ε - фиктивной скорости жидкости, высоты и порозности слоя.

Агрегирование магнетитовых частиц, структурирующих ожженный слой частицами с большой магнитной восприимчивостью, удобно моделировать на основе фундаментального уравнения Смолуховского [16 - 18]. При этом образующиеся колонии флокул частиц различных размеров носят название популяций частиц, а сама модель флокулообразования называется моделью популяционного баланса [4]:

$$\frac{dn_m}{dt} = 4\pi \left(\sum_{i=1}^{m-1} s_{i(m-i)} n_i n_{m-i} - n_m \sum_{i=1}^{\infty} s_{im} n_i \right).$$

Скорость dn_m/dt изменения концентрации n_m флокул i -й фракции является суммой приращения их концентрации при парных столкновениях флокул i -го и $(m-i)$ -го типов и убыли концентрации флокул i -го типа за счет их столкновения с флокулами любого другого типа. Вероятности агрегирования и разделения при парных столкновениях частицами $s_{i(m-i)}$ и $s_{i(mi)}$ соответственно зависят от действия магнитных и гидродинамических сил.

Высота ожженного слоя зависит от физических свойств частиц и фиктивной скорости жидкости. В диапазоне от скорости витания до скорости начала гидротранспорта частицы слоя хаотично перемещаются по всему слою и энергично перемешиваются. При наложении внешнего магнитного поля у слоя появляются абсолютно иные свойства, позволяющие использовать его в качестве среды разделения компонентов суспензии.

В магнитном поле ферромагнитные частицы становятся магнитными диполями с индуцированными магнитными моментами, зависящими от их физических свойств и напряженности внешнего поля. При межчастичных взаимодействиях происходят процессы структурирования движущихся частиц ожженного слоя суспензии с образованием агрегатов, ориентированных по направлению силовых линий магнитного поля. Движение хаотически перемещающихся по всему слою частиц затормаживается, состояние слоя стабилизируется, и он начинает проявлять упругие свойства. В состав образующихся ферромагнитных агрегатов входят частицы, для которых сила гидродинамического сопротивления не превышает сил магнитного межчастичного дипольного взаимодействия [19 - 22].

Высота ожигенного кипящего слоя ферромагнитных частиц снижается при наложении внешнего магнитного поля вследствие того, что сила гидродинамического сопротивления для свободных частиц выше, чем для частиц, структурированных в агрегаты. Сила сопротивления для остальных частиц слоя остается неизменной. Это приводит к вымыванию слабомагнитных частиц суспензии из слоя и уносу их в слив сепаратора потоком жидкости.

В магнитно – гравитационных аппаратах используется электромагнитный соленоид конечной высоты, что приводит к возникновению помимо магнитных межчастичных сил еще и магнитной градиентной силы, действующей на объем суспензии.

Использование закрученного потока промывной жидкости позволяет получить дополнительный инструмент управления ожигением слоя и магнитными силами взаимодействия частиц в агрегатах.

Заключение

В настоящей работе представлена возможность использования уравнений быстрого агрегирования Смолуховского для математического описания формирования ожигенного слоя частиц суспензии в МГ-сепараторе. Разрабатываемая модель ожигенного слоя является функциональным блоком ячеечной модели МГ-сепаратора. На рис. 4 представлена общая структура ячеечной модели, состоящей из набора связанных однонаправленными потоками блоков-ячеек. Каждый блок представляет собой завершённую модель определенного процесса в аппарате. Полученные в результате работы блока выходные характеристики передаются в качестве входов на следующие (согласно схеме) блоки модели.



Рис. 4. Схема ячеечной модели магнитно – гравитационного сепаратора

На выходе модели осуществляется расчет технологических характеристик концентрата и слива аппарата, которые обеспечивают определение эффективного включения в схему технологического процесса железнорудного предприятия. Кроме того, модель обеспечивает динамический расчет высоты оживленного слоя, используемый для управления функционированием самим МГ-сепаратором.

Литература

1. Алейников, Н.А. Структурирование ферромагнитных суспензий / Н.А. Алейников, П.А. Усачев, П.И. Зеленев. - Л.: Наука, 1974. - 119 с.
2. Усачев, П.А., Магнитно-гравитационное обогащение руд / П.А. Усачев, А.С. Опалев. - Апатиты: КНЦ РАН, 1993. - 92с.
3. Пат. 2387483 Российская Федерация, МПК В ОЗС 1/02. Способ обогащения дисперсных ферромагнитных материалов /Н.Н. Мельников, А.Ш. Гершенкоп, В.Ф. Скороходов, В.В. Бирюков; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Горный институт Кольского научного центра РАН. - №2008108110/03; Заяв. 03.03.2008; опубл. 27.04.2010, бюл. №12.
4. Нигматулин, Р. И. Основы механики гетерогенных сред. / Р.И. Нигматулин. - М.: Наука. - 1978. - 337 с.
5. Нигматулин, Р. Динамика многофазных сред / Р.И. Нигматулин. - М.: Наука. -Ч.1. -1987. - 464 с.
6. Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер //В 2 х томах: Пер. с англ. -М.: Мир, 1990. -1100 с.
7. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей / К. Флетчер // В 2 х томах: Пер. с англ. - М.: Мир, 1991. - 1045 с.
8. Дудников, Е.Г. Построение математических моделей химико-технологических объектов / Е.Г. Дудников, В.С. Балакирев и др. - М.: Химия, 1970. - 312 с.
9. Дворецкий, С.И. Разработка энерго- и ресурсосберегающих технологических установок непрерывного действия / С.И. Дворецкий, В.В. Карнишев, Д.С. Дворецкий // Химическое и нефтегазовое оборудование, 1998. - № 4. -С.4–7.
10. Дворецкий, С.И. Основы проектирования химических производств: Учеб. пособие для студентов вузов / С.И. Дворецкий, Г.С. Кормильцин, Е.М. Королькова. -Тамбов: Изд-во Тамб. госуд. техн. ун-та, 1999. - 184 с.
11. Белоглазов, И.Н. Методы расчета обогатительно-гидрометаллургических аппаратов и комбинированных схем / И.Н. Белоглазов, О.Н. Тихонов, В.В. Хайдов. - М.: Metallurgia, 1995. - 297 с.
12. Тихонов, О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. / О.Н. Тихонов. - М.: Недра, 1984. - 208 с.
13. Аэров, М.Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М.Э. Аэров, О.М. Годес. - Ленинград: Химия, 1968. - 512 с.

14. Псевдооживление / Под ред. И.Ф. Дэвидсона, Д. Харрисона. -М.: Изд-во Химия, 1974. - 728 с.
15. Муштаев, В.И. Конструирование и расчет аппаратов со взвешенным слоем / В.И. Муштаев, А.С. Тимонин, В.Я. Лебедев. - М.: Химия, 1991. - 344 с.
16. Эйнштейн А., Смолуховский М., Броуновское движение // Пер. с нем. - М.Л., 1936.
17. Abberger, T. Population Balance Modelling of Granulation / T. Abberger // Handbook of Powder Technology, vol. 11, 2007. - P.1109-1186.
18. Ramkrishna D., Population Balances, Academic Press, London, 2000. – 355 p.
19. 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.
20. Кирко, И.М. Особенности взвешенного слоя ферромагнитных частиц в магнитном поле / И.М. Кирко, М. В. Филиппов // Журнал техн. физики. - 1960. - Т.30, № 9. - С.1081-1084.
21. Rosensweig R.E. Magnetic stabilization of the state of uniform fluidization // Ind. Eng. Chem. Fundam. - 1979. - Vol. 18, №3. - P.260-269.
22. Rosensweig R. E. Fluidization: Hydrodynamic stabilization with a magnetic field // Science. - 1979. - Vol. 204. - P.57-60.

Сведения об авторах

Бирюков Валерий Валентинович - научный сотрудник,

e-mail: birukov@goi.kolasc.net.ru

Valeri V. Birukov – researcher

Олейник Андрей Григорьевич - д.т.н., зам. директора института,

e-mail: oleynik@iimm.ru

Andrey G. Oleynik - Dr. of Sci. (Tech), deputy director

Научное издание

ТРУДЫ
КОЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ВЫПУСК 7

Технический редактор Мигулян С.И.
Редактор Малыгина С.Н.

Подписано к печати 15.12.2016 г.
Формат бумаги 70x108 1/16
Гарнитура Times New Roman
Усл. печ. л. 14.87/ Заказ № 45. Тираж 80 экз.

Российская Академия Наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Кольский научный центр центра Российской академии наук

Отпечатано подразделением оперативной полиграфии
ФГБОУ ВО «Мурманский арктический государственный
университет»
184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Лесная, 29