

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ВЕСТНИК
ПОВОЛЖЬЯ**

№9 2019

Направления:

**05.13.01 – СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ (технические науки)**

**05.13.06 – АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ
(технические науки)**

**05.13.11 – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ
СЕТЕЙ (физико-математические науки)**

**05.13.11 – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ
СЕТЕЙ (технические науки)**

**05.13.18 – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫЕ
МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ (технические науки)**

**05.13.19 – МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ,
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
(физико-математические науки)**

**Казань
2019**

УДК 60

ББК 30-1

Н-66

Н-66 Научно-технический вестник Поволжья. №9 2019г. – Казань: ООО «Рашин Сайнс», 2019. – 132 с.

ISSN 2079-5920

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (реестровая запись от 08.05.2019 серия ПИ № ФС 77 -75732).

Журнал размещен в открытом бесплатном доступе на сайте www.ntvr.ru, и в Научной электронной библиотеке (участвует в программе по формированию РИНЦ).

Журнал включен ВАК РФ в перечень научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» № E12025.

Главный редактор Р.Х. Шагимуллин

Редакционная коллегия

*С.В. Анаников – д.т.н., проф.; Т.Р. Дебердеев – д.т.н., проф.; Б.Н. Иванов – д.т.н., проф.;
В.А. Жихарев – д.ф.-м.н., проф.; В.С. Минкин – д.х.н., проф.; А.Н. Николаев – д.т.н., проф.;
В.К. Половняк – д.х.н., проф.; П.П. Суханов – д.х.н., проф.; В.Ф. Тарасов – д.ф.-м.н., проф.;
Х.Э. Харлампиди – д.х.н., проф.*

В журнале отражены материалы по теории и практике технических, физико-математических и химических наук.

Материалы журнала будут полезны преподавателям, научным работникам, специалистам научных предприятий, организаций и учреждений, а также аспирантам, магистрантам и студентам.

УДК 60

ББК 30-1

ISSN 2079-5920

© Рашин Сайнс, 2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

В.В. Харьков, А.Н. Николаев ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СУХОГО ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ЗЕРНОБОБОВОГО СЫРЬЯ 7

05.13.01 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

А.П. Буйносов, К.Г. Шумаков СПОСОБ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОКОПРИЕМНИКА ЭЛЕКТРОВОЗА 15

И.В. Грубрин, И.Ю. Лыгина ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ СО СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕМ 19

С.М. Зраенко АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗАБОЛОЧЕННЫХ ЛЕСНЫХ УЧАСТКОВ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ 23

С.М. Зраенко ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАЖЕНИЯ ОТ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО СНИМКАМ LANDSAT 7 26

Ю.Н. Кондрашов РАЗВИТИЕ ХРАНИЛИЩ ДАННЫХ ДЛЯ РАБОТЫ С BIG DATA В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ 30

Н.И. Красовская, А.В. Сычева, В.Н. Красовский КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА 33

Д.А. Охотников, Буй Ши Хань АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦ ДОРОГИ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛОЖЕНИЯ РАДИОЛОКАТОРА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ 37

А.В. Самсонова, Л.Л. Ципин, И.Э. Барникова ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВА В ИНФОРМАЦИОННОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ АНАЛИЗА СПОРТИВНЫХ ДВИЖЕНИЙ 40

Э.С. Соколова, О.П. Тимофеева, С.Н. Капранов РАЗМЕЩЕНИЕ ОБЪЕКТОВ НА СЕТЕВОЙ АРХИТЕКТУРЕ С ПОМОЩЬЮ ЭВРИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ 44

05.13.06 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

И.В. Афанасьева ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ПРОЦЕССА СПИРАЛЬНОГО ОРЕБРЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКОЙ И ЛАЗЕРОМ 49

Е.П. Зеленецкая, А.Г. Горюнов МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСТРАКЦИОННЫМ БЛОКОМ АФФИНАЖНОГО СТЕНДА 54

А.А. Медведев, Н.Е. Конева АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ТВЭЛОВ 59

М.В. Овечкин КОНЦЕПЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ РЕНТГЕНОГРАММ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ 64

В.Ф. Пегашкин, Г.А. Осипенкова, М.В. Миронова УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ В ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ДЕТАЛИ 67

С.В. Прохоров АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА 71

05.13.11 — ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

<i>С.Ю. Городецкий</i> МЕТОДЫ УЧЕТА МНОГОЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОДНОМЕРНОЙ ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И ИХ ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НА ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ КЛАССАХ ГЛАДКИХ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ	76
<i>В.Д. Петелина</i> О РЕШЕНИИ РЕГУЛЯРИЗИРОВАННЫХ УРАВНЕНИЙ ВОЗМУЩЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА	85

05.13.18 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

<i>Т.Н. Бобылева</i> ЭФФЕКТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЛОИСТОГО УПРУГО-ПОЛЗУЧЕГО МАССИВА С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ШАХТОЙ	91
<i>Г.М. Гузаиров</i> ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУНКЦИЙ НА С ТИПА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОПЕРАТОРОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ГРУППЫ $GL(2, C)$ В СМЕШАННЫХ БАЗИСАХ	95
<i>А.Е. Лебедев, И.С. Гуданов, А.Б. Капранова, А.А. Ватагин, Д.Д. Бахаева</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ РАЗРЕЖЕННОГО ПОТОКА ЩЕТОЧНЫМ РАСПЫЛИТЕЛЕМ	99
<i>М.Г. Маликов, А.В. Жданов</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА С ОСТРЯКАМИ УВЕЛИЧЕННОЙ ДЛИНЫ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ	103
<i>Н.А. Мунасыпов, Г.М. Гузаиров</i> МОДЕЛЬ МАТРИЧНОЙ ИГРЫ В ЗАДАЧЕ ПОСТРОЕНИЯ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ РЕСУРСНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ И ВНЕШНИХ СРЕДСТВ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ	107
<i>М.К. Хасанов</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ИНЖЕКЦИИ СЕРОВОДОРОДА В ПОРИСТУЮ СРЕДУ, НАСЫЩЕННУЮ НЕФТЬЮ И ВОДОЙ	111
<i>А.Г. Шляхова, А.Т. Шляхов, О.А. Штилова, М.Ю. Филимонова</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ	114

05.13.19 — ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Н.П. Мошуров, Ю.Д. Фот</i> ЗАЩИТА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ОТ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	119
---	-----

АННОТАЦИИ	124
------------------	-----

THE RELEASE MAINTENANCE

V.V. Kharkov, A.N. Nikolaev MODELLING FEATURES OF GRAINS AND LEGUMES DRY FRACTIONATION 7

05.13.01 — TECHNICAL SCIENCES — SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT AND INFORMATION PROCESSING

A.P. Buinosov, K.G. Shumakov METHOD FOR ESTIMATING THE TECHNICAL CONDITION OF ELECTRIC TRUCK RECEIVER 15

I.V. Grubrin, I.U. Lygina IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF SIGNALS WITH SUPERRESOLUTION 19

S.M. Zraenko ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF DETECTING WATERFORGED FOREST SECTIONS BY SPACE IMAGES 23

S.M. Zraenko STUDY OF STATISTICAL CHARACTERISTICS OF REFLECTION FROM FOREST VEGETATION BY PICTURES OF LANDSAT 7 26

Y.N. Kondrashov DEVELOPMENT OF DATA WAREHOUSES FOR WORKING WITH BIG DATA IN DECISION SUPPORT SYSTEMS 30

N.I. Krasovskaya, A.V. Sycheva, V.N. Krasovsky CRITERIA FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEMS 33

D.A. Okhotnikov, Bui Sy Hanh BOUNDARY LOCATION CALCULATION ALGORITHM THE ROAD RELATIVE TO THE POSITION OF THE RADAR COLLISION AVOIDANCE OF VEHICLES 37

A.V. Samsonova, L.L. Tsipin, I.E. Barnikova PERSPECTIVE OF APPLYING A PHASE SPACE IN THE INFORMATION SUPPORT TO THE ANALYSIS OF SPORTS MOVEMENTS 40

E.S. Sokolova, O.P. Timofeeva, S.N. Kapranov OBJECTS PLACEMENT ON NETWORK ARCHITECTURE USING HEURISTIC METHODS 44

05.13.06 — TECHNICAL SCIENCES — AUTOMATION AND MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTION

I.V. Afanasyeva TECHNICAL AND ECONOMIC COMPARISON OF THE PROCESS OF SPIRAL FINNING WITH HIGH-FREQUENCY WELDING AND LASER 49

E.P. Zelenetskaya, A.G. Goryunov COMPUTER-AIDED MODEL OF EXTRUCTION UNIT MANAGEMENT SYSTEM OF REFINERY PLANT 54

A.A. Medvedev, N.E. Koneva ANALYSIS OF METHODS FOR THE CONTROL OF THE TIGHTNESS OF TVELS 59

M.V. Ovechkin THE CONCEPT OF USING A NEURAL NETWORK MODEL OF AUTOMATED RECOGNITION OF RADIOGRAPHS OF WELDED JOINTS 64

V.F. Pegashkin, G.A. Osipenkova, M.V. Mironova HARDENING HOLES WITH PLASTIC DEFORMATION IN OSCILLATING PARTS 67

S.V. Prokhorov AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY TO IMPROVE PRODUCTION EFFICIENCY 71

05.13.11 — PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES — MATHEMATICAL AND SOFTWARE OF COMPUTERS, COMPLEXES AND COMPUTER NETWORKS

S.Yu. Gorodetsky MULTIEXTREMAL CONSTRAINTS ACCOUNTING METHODS IN THE UNIVARIATE GLOBAL OPTIMIZATION PROBLEMS AND THEIR NUMERICAL RESEARCH USING REPRESENTATIVE CLASSES OF CONTINUALLY DIFFERENTIABLE TEST PROBLEMS 76

V.D. Petelina ABOUT THE DECISION REGULARIZED EQUATIONS OF PERTURBED MOTION BODY. 85

05.13.18 — TECHNICAL SCIENCES — MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

<i>T.N. Bobyleva</i> EFFECTIVE CHARACTERISTICS OF A STRESSED-DEFORMED STATE OF A LAYERED ELASTIC-CREEPING ARRAY WITH A VERTICAL CYLINDRICAL SHAFT	91
<i>G.M. Guzairov</i> INTEGRAL TRANSFORMATIONS OF FUNCTIONS ON C TYPE OF INTEGRAL REPRESENTATION OPERATORS OF GL (2, C) IN MIXED BASES	95
<i>A.E. Lebedev, I.S. Gudanov, A.B. Kapranova, A.A. Vatagin, D.D. Bahaeva</i> MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF FORMING A SPARED FLOW WITH A BRUSH SPRAY	99
<i>M.G. Malikov, A.V. Zhdanov</i> MATHEMATICAL MODEL OF RAILROAD SWITCH WITH THE INCREASED LENGTH OF POINTS FOR HIGH-SPEED RAILWAYS	103
<i>N.A. Munasyrov, G.M. Guzairov</i> MATRIX GAME MODEL IN THE PROBLEM OF CONSTRUCTING A TARGET SPACE OF A RECOGNITION SYSTEM WITH RESOURCE RESTRICTIONS AND EXTERNAL MEASURES AVAILABLE	107
<i>M.K. Khasanov</i> THE MATHEMATICAL MODEL OF HYDRATE FORMATION AT HYDROGEN SODIUM INJECTION IN A POROUS MEDIUM SATURATED WITH OIL AND WATER	111
<i>A.G. Shlyakhova, A.T. Shlyakhov, O.A. Shipilova, M.Y. Filimonova</i> MATHEMATICAL MODELING OF PROBLEMS USING DIFFERENTIAL EQUATIONS	114

05.13.19 — PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES — METHODS AND SYSTEMS OF INFORMATION SECURITY, INFORMATION SECURITY

<i>N.P. Moshurov, Yu.D. Fot</i> PROTECTION OF AUTOMATED SYSTEMS FROM DELIBERATE ELECTROMAGNETIC EFFECTS	119
ABSTRACTS	124

05.13.18

В.В. Харьков, А.Н. Николаев д-р техн. наук

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
факультет пищевой инженерии,
кафедра оборудования пищевых производств,
Казань, v.v.kharkov@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СУХОГО ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ЗЕРНОБОБОВОГО СЫРЬЯ

Рассматриваются современные сухие способы классификации зерновых и бобовых культур на крахмальную и белковую фракции. Выделены преимущества и недостатки воздушной и электростатической сепараций измельченного крахмалобелкового сырья по сравнению с традиционными (мокрыми) способами. Проведен анализ количественных подходов к моделированию основополагающих физических параметров, лежащих в основе рассматриваемых сухих способов переработки, таких как степень измельчения, сыпучесть порошка, заряд частиц.

Ключевые слова: *воздушная классификация, электростатическая сепарация, измельчение, крахмал, белки.*

В условиях современного рынка глубокая переработка сельскохозяйственных культур на компоненты является актуальной задачей [1; 2]. Извлеченные растительный белок и крахмал, благодаря своим уникальным свойствам, широко используются в пищевой, химической и других отраслях промышленности.

На сегодняшний день фракционирование зернобобовых культур в промышленных масштабах осуществляется двумя способам (рис. 1). При мокром фракционировании традиционно белок, крахмал и клетчатка извлекаются с использованием различных растворителей. Способ может обеспечить получение белковых изолятов с чистотой более 90%, но жесткие режимные условия обработки (рН и температура) вызывают денатурацию белка и потерю функциональных свойств [3; 4]. Кроме того, этот способ характеризуется большим расходом воды и энергии, а кислотные сточные воды (часто содержащие протеин), снижают экологичность производств.

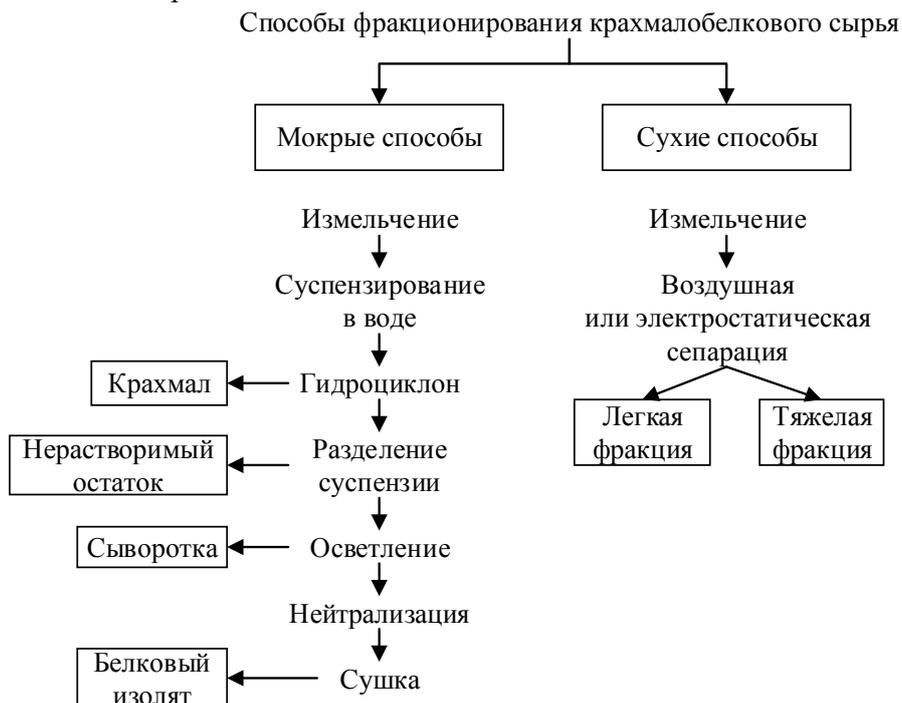


Рис. 1 – Принципиальные схемы глубокого разделения растительного сырья

Ввиду вышеуказанных недостатков мокрого извлечения предпочтительным вариантом разделения белка и крахмала из растительного сырья является сухое фракционирование. Этот способ является менее энерго- и ресурсозатратным, а также не требует применения химических растворителей, что позволяет сохранить естественную структуру и первичные функции макромолекул растений. Согласно последним исследованиям, наиболее привлекательными способами сухой классификации растительного сырья на крахмальную и белковую фракции являются воздушная сепарация (пневмокласификация) и электростатическая сепарация.

В последнее время в связи с развитием информационных технологий для расчета и оптимизации процессов сухого разделения, а также последующего анализа состава обогащенного продукта, используются методы CFD-моделирования и хемометрики. При экспериментальных исследованиях быстро определить массовое содержание белка и крахмала в обогащенном продукте возможно на основе данных флуоресцентной и инфракрасной спектроскопии.

Целью данной работы является изучение современных сухих способов классификации крахмалобелкового растительного сырья. При проведении теоретических исследований ставились задачи:

- анализ использования воздушной и электростатической сепараций для разделения компонентов сырья с учетом их достоинств и недостатков;
- выявление ключевых физических параметров, положенных в основу моделирования процесса сухого фракционирования.

В табл. 1 приведен питательный состав различных агрокультур, которые могут быть использованы для сухого способа классификации. Так, злаковые культуры предпочтительны для получения продуктов богатых углеводами, так как они имеют высокое содержание свободных сахаров и крахмала, а бобовые культуры, соответственно, для получения протеинсодержащих продуктов.

Общий сбор продукции и объем реализации растительного сырья по данным Росстата за 2018 г. представлены в табл. 2, которые свидетельствуют о достаточном резерве целевого сырья для переработки на крахмал и белки.

Воздушная сепарация позволяет разделять зерновое и бобовое измельченное сырье (муку) на фракции, различающиеся по размеру и пищевой ценности. При этом способе воздух подается в рабочую камеру классификатора, где создается поле центробежных и гравитационных сил, под действием которых мука разделяется на мелкие и крупные частицы в зависимости от плотности [6–8].

Таблица 1 – Средний химический состав основных зернобобовых сельскохозяйственных культур [5]

Наименование	Белки	Углеводы	Клетчатка	Жиры
Пшеница мягкая	10,69	75,36	12,7	1,99
Пшеница твердая	11,31	75,90	12,2	1,71
Рожь	10,34	75,86	15,1	1,63
Тритикале	13,80	73,14	14,6	1,81
Картофель	2,57	12,44	2,5	0,10
Кукуруза	9,42	74,26	7,3	4,74
Ячмень	12,48	73,48	17,3	2,30
Рис круглозерный	6,61	79,34	1,4	1,40
Люпин (семена)	36,17	40,37	18,9	9,74
Горох	23,12	61,63	22,2	3,89

Таблица 2 – Объемы валовой продукции основных зернобобовых сельскохозяйственных культур

Наименование	Валовый сбор, т	Объем реализованного сырья, т
Пшеница озимая	52 914 090	31 101 777
Пшеница яровая	19 222 056	
Рожь озимая	1 914 510	608 504
Рожь яровая	1 540	
Тритикале озимая	368 110	–
Тритикале яровая	32 540	
Картофель	22 394 960	1 370 113
Кукуруза (на зерно)	11 419 020	–
Ячмень озимый	1 841 840	5 414 618
Ячмень яровой	15 150 070	
Рис	1 038 220	618 465
Люпин кормовой (сладкий)	136 350	–
Горох	2 304 430	953 332

На эффективность процесса пневмокласификации, т.е. на получение максимального процентного содержания преобладающего компонента муки во фракции, влияют следующие аспекты:

- 1) не допускается агрегированное состояние частиц, они должны быть разобщены;
- 2) чрезмерный размол помимо снижения выхода конечного продукта вследствие потерь из-за адгезии к стенкам и рабочим органам мельницы вызывает повреждение зерен крахмала, что приводит к «засорению» протеинсодержащей фракции;
- 3) скорость ротора классификатора;
- 4) химический состав, в частности, высокое содержание жиров в бобовых культурах и кукурузе предотвращает свободную дисперсию частиц в воздухе. Также низкое влагосодержание соответствует более высокому выходу протеинсодержащей фракции, так как сухие частицы более хрупкие и образуют более тонкий помол.

Помимо сохранения нативной структуры и функциональных свойств выделяют несколько существенных преимуществ воздушной классификации. Во-первых, при реализации этого способа не используются химические реагенты, которые делают сырье несъедобным. Во-вторых, операции измельчения и пневмосепарации более энерго- и ресурсоэффективны, чем соответствующие совокупные затраты для мокрого способа (рис. 1). В-третьих, существует реальная возможность эффективного масштабирования до опытно-промышленных установок на базе имеющегося технологического оборудования. Например, легкодоступным промышленным вариантом для воздушной сепарации является использование ситового оборудования.

При пневмокласификации необходимо учитывать такую специфичность как бимодальная фракционная дисперсность зерен крахмала. Увеличение мелкозернистой фракции с размерами частиц порядка 10 мкм, что соответствует размерам частиц белка, снижает эффективность воздушной сепарации. Также существенным недостатком метода является то, что вследствие случайных физических явлений (турбулентность потока, взаимодействие частиц) некоторые частицы могут отклоняться от рассчитанной траектории, попадая в неправильный сход. Более того, так как разделение базируется на разнице в размерах и плотности, этот способ может оказаться неэффективным для частиц со сходными физическими свойствами. Еще необходимо отметить, что для сырья с высоким содержанием жира требуется предварительное обезжиривание.

Электростатическая сепарация – это сравнительно новый способ разделения твердых частиц, основанный на разнице в их диэлектрических свойствах. Принцип этой сепарации для измельченных зернобобовых злаков заключается в том, что белки по сравнению с углеводами приобретают более высокий заряд из-за наличия в аминокислотных остатках

ионизируемых групп. Соответственно, углеводы (крахмал и клетчатка) по своей химической природе, не включая подобных групп, характеризуются более низкой ионизацией. Таким образом, в поле электрических сил доступно разделение частиц, обогащенных крахмалом и белком, по величине заряда.

Исходные частицы приобретают положительные или отрицательные заряды трением (трибоэлектрический эффект) за счет многочисленных взаимных столкновений и контакта со стенками рабочего канала, а затем сепарируются. Типичный электростатический сепаратор в электростатическом поле (трибоэлектрический сепаратор) включает питатель кипящего слоя, зарядное устройство, электрод и закрытую рабочую камеру [9]. Способность к электризации трением измельченного сырья зависит от ее вида, так как протеинсодержащие частицы разных составных частей имеют различную форму, размер и поверхностные свойства. Например, в пшеничных отрубях протеинсодержащие частицы алейронового слоя и эндосперма принимают положительный заряд, тогда как околоплодник – отрицательный [10].

Аналогично воздушной сепарации главным преимуществом электростатического метода переработки является неиспользование химических реагентов (растворителей), что делает продукт полностью безопасным для использования в пищевых целях и не вызывает изменения в его функциональном назначении. Кроме того, в первую очередь частицы сепарируются не по размеру и плотности как при воздушной сепарации или просеивании, а в зависимости от электрических свойств, что обуславливает применимость сепарации этого типа для разделения смесей со средним размером частиц белков и протеинов порядка 10 мкм [11]. Этот способ также является энерго- и ресурсосберегающим.

Одним из ограничений данного способа является то, что различные компоненты сырья при определенных условиях могут приобретать одинаковый заряд, что уменьшает концентрацию целевого вещества. К примеру, если сырье получает избыток трибоэлектрических зарядов, частицы богатые углеводами могут показывать более высокую плотность заряда чем в нормальном состоянии, и, следовательно, «засоряют» протеинсодержащую фракцию. К другим недостаткам относится то, что под действием силы гравитации, переносимые воздухом частицы, могут не достигнуть электродов.

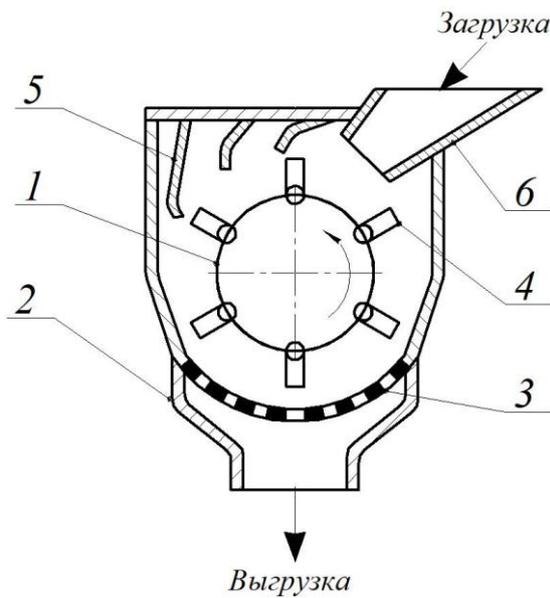
Для построения физико-математической модели процесса классификации по сухому способу необходимо оценить следующие параметры:

1. *Степень измельчения.* Измельчение проводится для уменьшения размера частиц зерновых и бобовых культур, что приводит к увеличению соотношения величины поверхности к объему и разрушению клеточной структуры исходного сырья [12].

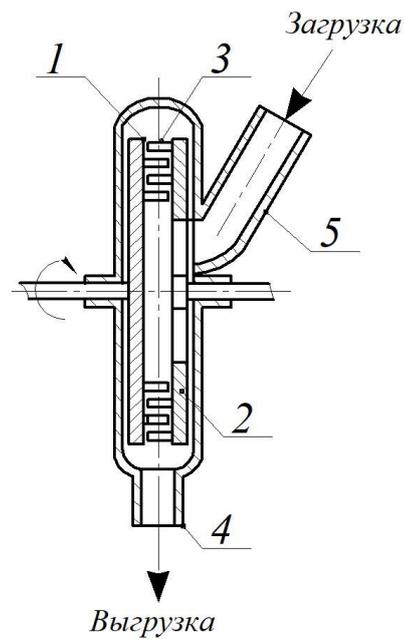
Для сухих способов классификации крайне необходимо, чтобы частицы должны быть не агрегированы и достаточно малы. Поэтому для увеличения эффективности сепарации предварительно проводят операцию измельчения (рис. 2). Среди многообразия современных машин для дробления и измельчения наиболее распространенными для зернобобовых культур являются молотковые и конусные дробилки, истирающие и струйные мельницы, дезинтеграторы и дисмембраторы (рис. 2).

Молотковые и стержневые измельчители являются устройствами ударного типа и используются для мелкого дробления зерна и бобов. В молотковой дробилке сырье подается сверху и подвергается измельчению на лету молотками, закрепленными к вращающемуся ротору. Молотки отбрасывают материал на периферию, в результате чего он разбивается о броневые плиты корпуса. В стержневых (или ударно-дисковых) мельницах измельчение зернобобового материала осуществляется за счет круглых пальцев, которые насажены на диски.

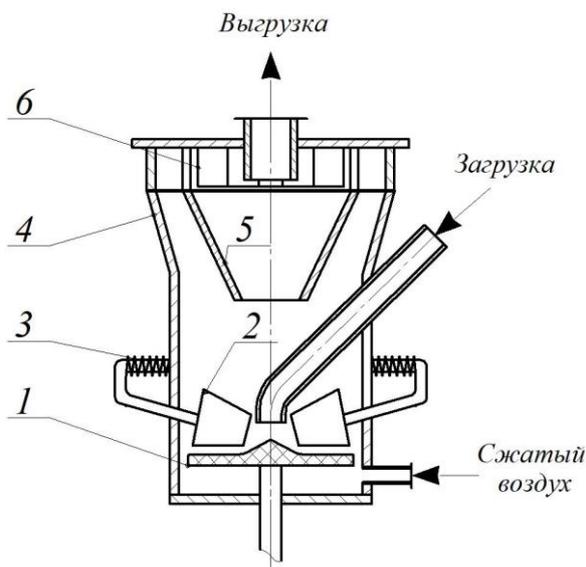
Истирающие и струйные мельницы относятся к устройствам сверхтонкого измельчения сырья. В истирающих мельницах измельчение материала осуществляется за счет его многократного сильного сжатия и истирания обкатными элементами, находящимися во вращающейся чаше. Струйное измельчение – это недавно разработанный способ, при котором исходные частицы, попадая в камеру на высокой относительной скорости, сталкиваются там с мощным спиральным потоком воздуха или газа, а также со стенкой корпуса, разбиваются на мельчайшие частички.



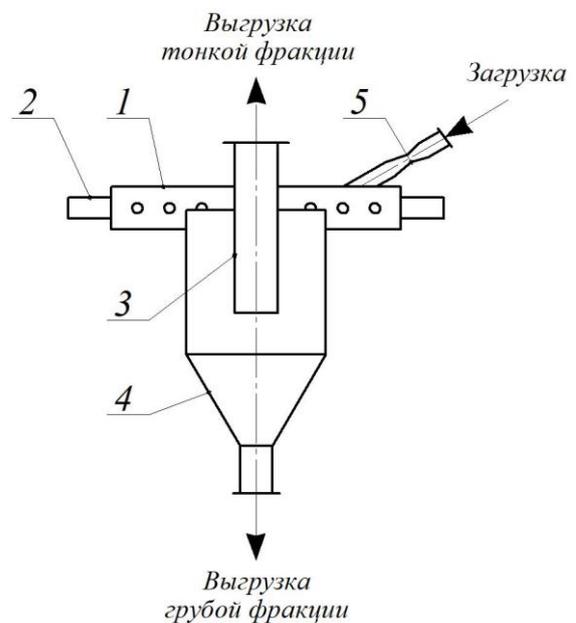
Молотковая дробилка:
1 – ротор; 2 – корпус; 3 – сетка;
4 – молотки; 5 – броневые плиты;
6 – загрузочный корпус



Стержневая мельница:
1 – вращающийся диск;
2 – неподвижный диск; 3 – стержни;
4, 5 – разгрузочный и загрузочный
патрубки



Истирающая мельница:
1 – чаша; 2 – бегунок;
3 – прижимная пружина; 4 – корпус;
5 – внутренний корпус; 6 – лопатки



Струйная мельница:
1 – размольная камера; 2 – наклонные
сопла; 3 – отводная труба;
4 – приемник; 5 – инжектор

Рис. 2 – Устройство и принцип работы мельниц и дробилок для измельчения крахмалобелкового сырья

Выбор установки зависит от физико-механических свойств сырья и необходимого размера частиц [13]. Например, при измельчении истиранием наблюдается меньшая потеря крахмала исходного материала по сравнению с полученным в стержневой мельнице порошком. Также использование струйной мельницы способствует более эффективной сепарации компонентов муки из мягких и твердых сортов пшеницы.

Выделяют следующие факторы, влияющие на качество размола зернобобового сырья:

- 1) размер крахмальных зерен;
- 2) адгезию маленьких частиц белка к крахмальным зернам;
- 3) твердость материала и характер излома;
- 4) химический состав сырья;

При разделении на фракции следует иметь в виду, что в эндосперме часть белка, имеющая форму пластинок различного очертания, прикреплена к шарообразным крахмальным зернам (рис. 3). Это может быть объяснено адгезией небольших частиц белка к более крупным гладким зернам крахмала вследствие различного химического состава. Следствием данного явления является снижения выхода протеиновой фракции и чистоты крахмальной фракции.

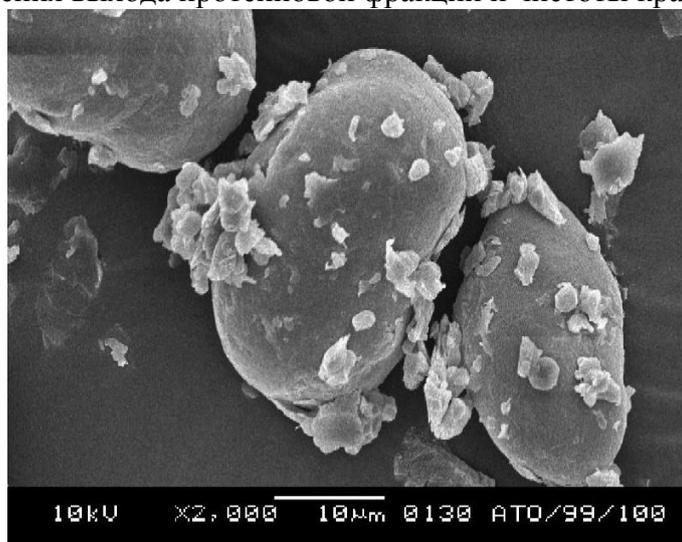


Рис. 3 – Микроскопическое изображение измельченного гороха [14]

Для описания эмпирических распределений частиц по размерам в настоящее время существует несколько популярных функций: распределение Розина-Раммлера, распределение Вейбулла, распределение Кумарасвами, функция логарифмически-нормального распределения.

Функция распределения Розина-Раммлера имеет следующий вид:

$$1 - Y(d) = \exp\left(-\frac{d}{\bar{d}}\right)^n, \quad (1)$$

где $Y(d)$ – массовая доля частиц, размеры которых меньше чем диаметр d ; \bar{d} – средний диаметр частиц (диаметр Розина-Раммлера); n – коэффициент распределения частиц по фракциям.

Функция плотности распределения Вейбулла

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right], \quad (2)$$

где x – размер частицы; α – коэффициент формы ($\alpha > 0$); β – коэффициент масштаба ($\beta > 0$).

Функция плотности вероятности Кумарасвами записывается так [15]:

$$f(x) = \frac{\alpha_1 \alpha_2 z^{\alpha_1-1} (1-z)^{\alpha_2-1}}{b-a}, \quad (3)$$

где

$$z = \frac{x - a}{b - a},$$

x – размер частицы; α_1, α_2 – коэффициенты формы ($\alpha_1, \alpha_2 > 0$); a, b – границы интервала ($a < b$).

Логарифмически нормальное распределение (Гаусса)

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (4)$$

где x – размер частицы; σ^2 – среднее квадратичное отклонение; μ – средний размер частицы.

Как правило, выбор функции распределения осуществляется исходя из проведенных экспериментальных исследований. Например, нормализованная функция Кумарасвами хорошо описывает распределение частиц по размерам измельчения мягкой пшеницы. Для твердых сортов пшеницы более подходят функции распределения Вейбулла и Гаусса. Причем для всех распределений величина относительного отклонения уменьшается при увеличении времени посева. Это объясняется снижением действия сил сцепления между частицами, по мере того как увеличенная продолжительность просеивания способствует разрушению связей между частицами и снижает их средний размер.

2. *Сыпучесть (текучесть) порошка.* При воздушной и электростатической сепарациях измельченное сырье взвешивается в газовом потоке. Сыпучесть позволяет количественно определить силу когезии (сцепления) порошка, которая должна быть преодолена чтобы вызвать движение частиц.

Существует методика [16] определения сыпучести порошка, основанная на измерении касательных напряжений:

$$\left(\frac{\tau}{C}\right)^n = \frac{\sigma + T}{T}, \quad (5)$$

где τ , T – касательные напряжения; C – силы когезии порошка; σ – нормальные напряжения.

На базе этой методики было количественно доказано, что для различных сыпучих материалов наблюдается снижение текучести при увеличении их относительной влажности. Это указывает на важность контроля влажности при сухих способах фракционирования на крахмал и белки.

3. *Заряд частиц.* Сепарации в поле электростатических сил предшествует получение частицами трибоэлектрических зарядов. Заряд относится к рабочим функциям контактирующих материалов. Рабочая функция отражает энергию необходимую для удаления электрона с поверхности материала.

Авторы [9] связали величину заряда частицы длиной стенки электризующего элемента в виде:

$$\Delta q = k_c CV, \quad (6)$$

где Δq – изменение заряда; k_c – эффективность электризации; C – емкостное сопротивление

$$C = \varepsilon_0 S / z_0,$$

V – полная разность потенциалов; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость газа; S – площадь соприкосновения; z_0 – критический интервал, включающий геометрические факторы между контактирующими телами.

В итоге, общим недостатком сухих способов является сравнительно низкий выход (менее 40 %) и чистота готовой продукции по сравнению с мокрым (более 90%). Однако, эти способы потребляют меньше энергии и воды, проводятся без химических растворителей (по

сравнению с мокрыми способами), что способствует проведению процесса переработки в щадящем режиме с сохранением нативной структуры и их функциональных свойств. Моделирование процесса сухого фракционирования с учетом вышерассмотренных факторов, таких как степень измельчения, сыпучесть порошка и заряд частиц, позволяет увеличить чистоту компонентов.

Список литературы

1. Павлова, О.Ю. Перспективы производства в России агропродукции глубокой переработки / О. Ю. Павлова, А. П. Лаврова // Известия Международной академии аграрного образования. – 2018. – № 39. – С. 142–145.
2. Гольдштейн, В.Г. Перспективы глубокой переработки зерна пшеницы / В. Г. Гольдштейн, Д. С. Куликов, С. А. Страхова // Пищевая промышленность. – 2018. – № 7. – С. 14–19.
3. Харьков, В.В. Особенности кинетики реакций термического разложения материала при концентрировании во взвешенном слое / В. В. Харьков, А. Н. Николаев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 5. – С. 33-37.
4. Харьков, В.В. Инженерная методика расчета вихревой камеры со взвешенным капельным слоем / В. В. Харьков, А. Н. Николаев // Химическая промышленность сегодня. – 2017. – № 1. – С. 16-21.
5. National Nutrient Database for Standard Reference Legacy Release [Электронный ресурс] / United States Department of Agriculture, 2019. URL: <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/11226?n1>.
6. Андреев, Н.Р. Разделение зерновой муки на крахмалистую и белковую фракции пневмокласификацией / Н. Р. Андреев, Л. П. Носовская, Л. В. Адикаева, Т. Р. Карпенко // Достижения науки и техники АПК. – 2015. – Т. 29. – № 11. – С. 108–111.
7. Andersson, A.A. M. Air Classification of Barley Flours / A. A. M. Andersson, R. Andersson, P. Åman // Cereal Chemistry. – 2000. – Vol. 77. – № 4. – P. 463-467.
8. Silventoinen, P. Use of air classification technology to produce protein-enriched barley ingredients / P. Silventoinen [et al.] // Journal of Food Engineering. – 2018. – Vol. 222. – P. 169-177.
9. Matsusaka, S. Triboelectric charging of powders: A review / S. Matsusaka [et al.] // Chemical Engineering Science. – 2010. – № 65. – P. 5781-5807.
10. Wang, J. Arabinoxylans concentrates from wheat bran by electrostatic separation / J. Wang [et al.] // Journal of Food Engineering. – 2015. – Vol. 155. – P. 29-36.
11. Landauer, J. Triboelectric separation of a starch-protein mixture – Impact of electric field strength and flow rate / J. Landauer, P. Foerst // Advanced Powder Technology. – 2018. – № 29. – P. 117-123.
12. Кузнецов, М.Г. Математическое моделирование конической установки для мокрого измельчения / М. Г. Кузнецов, В. В. Харьков, Н. З. Дубкова // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 20. – С. 164-166.
13. Kharkov, V.V. Mathematical modelling of thermolabile solutions concentration in vortex chamber // Journal of Physics: Conf. Ser. 2018. Vol. 980. P. 012006. doi: 10.1088/1742-6596/980/1/012006.
14. Dijkink, B.H. Air dispersion of starch-protein mixtures: A predictive tool for air classification performance / B. H. Dijkink [et al.] // Powder Technology. – 2007. – № 172. – P. 113-119.
15. Mateos-Salvador, F. The normalised Kumaraswamy breakage function: A simple model for wheat roller milling / F. Mateos-Salvador, J. Sadhukhan, G. M. Campbell // Powder Technology. – 2011. – № 208. – P. 144-157.
16. Jenike, A.W. Storage and flow of solids / A. W. Jenike // Bulletin of the University of Utah. – 1964. – Vol. 53. – P. 1-198.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ (05.13.01)**

05.13.01

А.П. Буйнов д-р техн. наук, К.Г. Шумаков канд. техн. наук

Уральский государственный университет путей сообщения,
кафедра «Электрическая тяга»,
Екатеринбург, byinosov@mail.ru, KShumakov@usurt.ru

**СПОСОБ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ТОКОПРИЕМНИКА ЭЛЕКТРОВОЗА**

В статье приводятся результаты отказов оборудования электровоза. Приведены полученные полиномиальные зависимости достижения заданной высоты от временного интервала, использование которых можно оценить техническое состояние токоприемника. Установлен критерий оценки исправности токоприемника, отличающийся от существующего в настоящее время (снятия статической характеристики).

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, электровоз, токоприемник, техническое состояние, диагностика, оценка, способ.

Важнейшим элементом анализа, направленного на безопасность движения поездов в локомотивном комплексе ОАО «РЖД» – выявление ненадежно функционирующих деталей или узлов электровоза. Отказ деталей (узлов) приводит к длительной задержке железнодорожного состава на станции или межстанционном участке, что приводит к следованию локомотива (или электровоза со вспомогательным локомотивом) до ближайшего сервисного локомотивного депо для ремонта [1].

Собранные в сервисных локомотивных депо Зауралье и Пермь в 2017–2018 гг. статистический материал об отказах деталей и узлов электровозов ВЛ10 и ВЛ11, позволит определить оборудование электровозов, требующее ремонта (рис. 1).

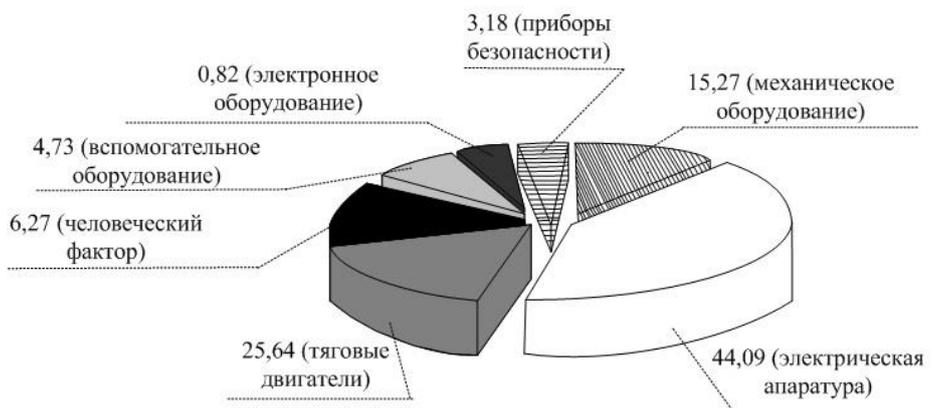


Рис. 1. Распределение отказов деталей и узлов электровоза, %

Из рис. 1 видно, что наиболее часто отказывает электрическая аппаратура (44,09 %) электровоза (неплановые ремонты – 20–22 % от всех неплановых ремонтов), в том числе 21–24 % – отказы токоприемников [2]. Из всех деталей и узлов электроаппаратуры токоприемники работают в сложных условиях. Они воспринимают динамические перегрузки. Отказы первой категории токоприемников приводят к повышенному износу контактного провода, снижению качества токосъема, ухудшению состояния поверхности трения контактного провода и токосъемных пластин [3].

$$S_0^2 = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n (h^{**}(t_i) - h_i)^2; \tag{4}$$

где $h^{**}(t_i)$ – значения аппроксимированной зависимости значений высоты подъема от времени, заданных статистической выборкой; h_i – заданные исходной выборкой детерминированные значения высоты подъема токоприемника.

Степень полинома m должна быть выбрана так, чтобы величина остаточной дисперсии S_0^2 исходной выборки от полученной полиномиальной зависимости была минимальной:

$$S_0^2(m) \rightarrow \min. \tag{5}$$

Таким образом, в качестве искомой зависимости выбирается полином, удовлетворяющий условиям (3) и (5). Полученные результаты аппроксимации зависимости $h(t)$ полиномом второго порядка сведены в таблицу, а на рис. 3 – полученные полиномиальные зависимости. Приведенная на рис. 3 зависимость 1 отображает зависимость, характерную для неисправной пневматической системы токоприемника, при которой скорость его движения в начале фазы опускания, у контактного провода, небольшая, что может привести к возникновению электрической дуги. Зависимость 2 отображает зависимость, характерную для исправного токоприемника. Скорость движения в начале фазы опускания максимальна, что не позволяет возникнуть электрической дуге при отрыве лыжи токоприемника от контактного провода, скорость движения в конце фазы опускания минимальна, что позволяет токоприемнику плавно опуститься на упоры без возникновения ударных повреждений. Зависимость 3 отображает зависимость, характерную для неисправного редукционного клапана токоприемника, при которой скорость его движения в конце фазы опускания чрезмерно большая, что может привести к ударным повреждениям механизма токоприемника при опускании на упоры.

Таблица

Коэффициенты уравнений полиномиальных (нелинейной) зависимостей и соответствующее им состояния токоприемника

Коэффициенты уравнения регрессии $h = a_1 \cdot t^2 + a_2 \cdot t + a_3$			Коэффициент корреляции, R_{ht}	Остаточная дисперсия, S_0^2, c^2	Техническое состояние токоприемника
$a_1, м/с^2$	$a_2, м/с$	$a_3, м$			
0,008	0,082	-0,011	0,948	0,128	1) неисправность пневмосистемы
0,014	0,146	-0,031	0,986	0,251	2) исправное состояние
0,021	0,252	-0,002	0,986	0,184	3) неисправность редукторного клапана

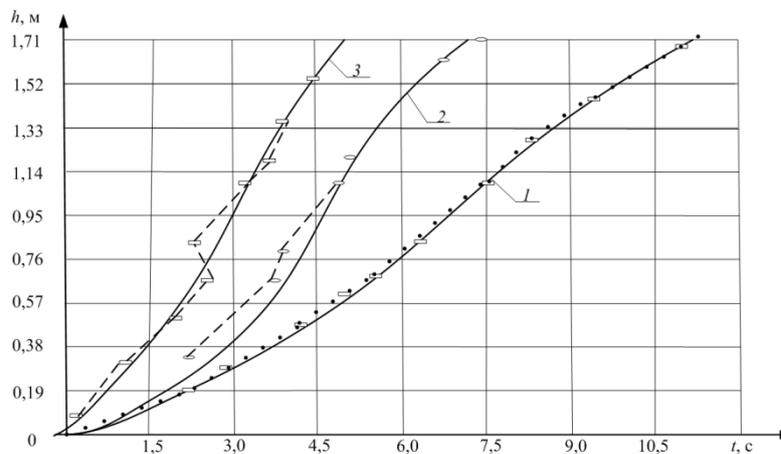


Рис.3. Зависимости высоты от среднего значения времени подъема токоприемника

По величине и соотношению коэффициентов уравнения регрессии $h = a_1 \cdot t^2 + a_2 \cdot t + a_3$ судят о форме зависимости и о конкретных неисправностях токоприемника (см. таблицу).

Таким образом, полученные на рис. 3 зависимости иллюстрирует новые возможности диагностирования технического состояния токоприемника по форме данных кривых, т. е. в депо необходимо определять не только общее время подъема и опускания токоприемника, но и определять временные интервалы достижения им заданных промежуточных высот. И если после 5 с подъема отношение t к h составляет 3,7–5,5 – токоприемник исправен, если отношение t к h меньше или больше установленного диапазона, значит токоприемник – неисправен.

Список литературы

1. Буйносов А.П., Цихалевский И.С., Лаптев С.И. Организация эксплуатации, обслуживания и ремонта газотурбовозов ГТ1h // Вестник УрГУПС. 2018. № 3 (39). С. 41-55.
2. Галкин А.Г., Титов С.С., Штин А.Н., Шумаков К.Г. Методика определения показателей надежности сложных электрических систем // Транспорт Урала. 2010. № 2 (25). С. 88-90.
3. Батрашов А.Б., Паранин А.В., Шумаков К.Г. Совершенствование математической модели расчета электротепловых процессов в контактной подвеске постоянного тока // Транспорт Урала. 2019. № 1 (60). С. 90-96.
4. Буйносов А.П., Наговицын В.С., Марулин С.Л. Методология развития систем мониторинга, диагностирования, обслуживания и ремонта подвижного состава // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 11. С. 110-113.
5. ГОСТ 32204-2013 Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия. М. Стандартинформ, 2014. 19 с.
6. Буйносов А.П., Марулин С.Л., Яковлев К.Н., Хваловский А.В. Алгоритм построения уравнений вращательной динамики колесной пары подвижного состава в рельсовой колее // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань, 2019. № 6. С. 92-94.

05.13.01

И.В. Грубрин канд. техн. наук, И.Ю. Лыгина канд. техн. наук

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
кафедра 410 «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование»,
Москва, GIV.52@mail.ru

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ СО СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕМ

В работе предложен комбинированный метод оценки параметров сигналов (мощности, углов прихода), позволяющий преодолеть рэлеевский предел разрешения в многоканальных информационно-измерительных системах.

Ключевые слова: информация, сверхразрешение, оценивание, сигнал.

Как известно, при обычном сканировании лучом антенной решетки (АР), измерении мощности источников сигналов в соответствии с положением главного луча (т.е. формировании т.н. «пеленгационного портрета»), потенциальная точность разрешения по угловым координатам двух источников сигналов определяется шириной диаграммы направленности (ДН) АР и не превышает половины ее ширины (рэлеевский предел).

Разработка эффективных методов, позволяющих с высокой точностью оценивать параметры (углы прихода, мощности и т. д.) множества радиосигналов, одновременно воздействующих на антенную решетку (АР) остается актуальной задачей [1, 2]. Известные в настоящее время методы решения подобной задачи требуют предварительной оценки корреляционной матрицы входных сигналов АР [1, 2]. Корреляционная матрица в большинстве случаев содержит достаточную информацию для решения поставленной задачи. Из большого многообразия известных в настоящее время методов сверхразрешения, можно выделить два наиболее популярных и известных и во многом равноценных. Это методы MUSIC и Кейпона [1 - 3]. Широкое применение этих методов на практике позволяет утверждать, что их помощью можно добиться наибольшего эффекта сверхразрешения источников сигналов по угловым координатам (несмотря на определенную условность этого утверждения).

Тем не менее, известные методы сверхразрешения естественно тоже обладают рядом недостатков. Так, при наличии коррелированных источников сигналов, близко расположенных источников разной мощности, «слабых» источников и т. п. их разрешение часто оказывается неудовлетворительным. Другим недостатком упомянутых выше методов является отсутствие обратной связи (рекурсии) в вычислительных алгоритмах, реализующих данные методы. Это может привести к накоплению вычислительных ошибок и, как следствие, к искажению истинной картины пеленгационного портрета. Кроме того, ряд известных методов [1-3] обеспечивает лишь последовательное определение угловых координат источников сигналов, т. е. переносит процесс сканирования лучом в цифровой процессор.

Ниже предлагается комбинированный метод оценивания, сочетающий достоинства известных алгоритмов сверхразрешения и рекуррентного оценивания с обратной связью, позволяющего параллельно во времени оценивать параметры многих источников сигналов, воздействующих на АР [4]. Предложенный подход оказывается справедливым и для коррелированных источников, а также АР различных конфигураций, в том числе и неэквидистантных. Важным преимуществом метода является использование предложенного показателя качества, что обеспечивает построение алгоритмов по рекуррентной схеме с обратной связью. Последнее позволяет повысить точность оценивания за счет компенсации вычислительных ошибок.

Сформулируем в сжатом виде основные выражения для метода MUSIC [3]. Сигналы на выходах элементов АР представляются в виде

$$x(t) = \sum_{i=1}^m S_i \cdot a_i(t) + n(t) = S a(t) + n(t),$$

где $S = [S_1, S_2, \dots, S_m]^T$; $a(t) = [a_1(t), a_2(t), \dots, a_m(t)]^T$ представляют собой смесь m -сигналов и шума $n(t)$. Отсюда корреляционная матрица входных сигналов и шума:

$$R_{xx} = \overline{X(t) \cdot X^{m*}(t)} = \overline{S a(t) a^{T*}(t)} S^{T*} = S \cdot A \cdot S^{T*} + R_{nn}$$

Диагонализируем R_{xx} ортогональным преобразованием U :

$$R_{xx} = U \Lambda U^{T*} = U \begin{bmatrix} \lambda_1 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \\ & \dots & \lambda_m & \\ 0 & & & \lambda_{m+1} \\ & & & & \dots & \lambda_n \end{bmatrix} \cdot U^{T*} \quad (1)$$

Предполагая, что число источников сигналов m известно, выделим в (1) m наибольших собственных значений, а остальные $n-m$ принадлежат шуму и отбрасываются. Получаем новую матрицу R вида:

$$R = U \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \\ & \dots & \lambda_m & \\ 0 & & & 0 \end{bmatrix} \cdot U^{T*} = S \cdot A \cdot S^{T*} \quad (2)$$

Вычислим теперь вспомогательную матрицу Q по выражению:

$$Q = (I - R \cdot R^+)^+ = U \cdot \begin{bmatrix} 0 & & 0 \\ & 1 & \\ 0 & & 1 \end{bmatrix} \cdot U^{T*} = \sum u_i u_i^{T*},$$

где «+» - символ операции псевдоинверсии матрицы.

Для определенной таким образом матрицы Q имеют место соотношения:

$$Q \cdot S_i = 0; \quad Q^2 = Q; \quad S_i^{T*} \cdot Q \cdot S_i = 0$$

В соответствии с методом MUSIC распределение мощности в пространстве определяется из выражения:

$$P(u_i) = 1 / S^{T*}(u) Q S(u). \quad (3)$$

В отсутствии ошибок, при u , совпадающим с истинным положением источника, знаменатель (3) обращается в нуль, а $P(u_i)$ стремится к бесконечности. Таким образом, истинное угловое положение источников сигналов определяется последовательно (или с использованием параллельных вычислений) в цифровом процессоре и в идеале, при отсутствии ошибок оценивания и вычислительных ошибок (что не возможно на практике) дает бесконечно большие «пики» на пеленгационном портрете, совпадающие с истинными направлениями на источники сигналов. Заметим, что задача существенно усложняется например, при наличии коррелированных источников сигналов или широкополосных сигналов. В этом случае одному источнику сигналов может соответствовать не одно собственное значение корреляционной матрицы R_{xx} .

В то же время в [4] был предложен метод оценивания параметров сигналов, пригодный как для случая некоррелированных источников сигналов, так и для коррелированных.

Известно, что корреляционную матрицу входных сигналов AP в случае воздействия M плоских волновых фронтов можно представить в виде

$$R_{xx} = \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^M p_{kl} X_k X_l^{*T} + \sigma^2 I = X P X^{*T} + \sigma^2 I, \quad (4)$$

где p_{kl} — элемент, стоящий в k -й строке l -м столбце матрицы P взаимных корреляций входных сигналов размера $M \times M$; $*$ — комплексное сопряжение; σ^2 — дисперсия собственного шума AP (независимый по каналам гауссов процесс с нулевым средним значением); I — единичная матрица размера $n \times n$; X — матрица размера $n \times M$; k -й столбец которой есть

$$X_k = [1, \exp(iu_k), \exp(i2u_k), \dots, \exp i(n-1)u_k]^T$$

— вектор фазового распределения, создаваемого k -м источником сигнала по апертуре АР (предварительно предполагается эквидистантной); $k = 1, 2, \dots, M$; n — число элементов АР, которые предполагаются изотропными для упрощения рассмотрения; $u_k = 2\pi/\lambda d \sin \theta_k$ — обобщенная угловая координата k -го источника сигнала.

Далее предположим, что сигналы некоррелированы (ниже это ограничение будет снято). Тогда матрица P становится диагональной с элементами $p_{kk} = p_k$, которые представляют собой мощности сигналов. Выражение (4) при этом приобретает вид

$$R_{xx} = \sum_{k=1}^M p_k X_k X_k^{*T} + \sigma^2 I = X \text{diag} P X^{*T} + \sigma^2 I. \quad (5)$$

Пусть матрица R_{xx} оценена любым известным в теории адаптивных АР методом. Наша задача состоит в том, чтобы по известной (оцененной) корреляционной матрице R_{xx} с учетом ее структуры (выбранной модели (4) или позднее (5), а также других возможных моделей) определить все неизвестные параметры: число сигналов M , их мощности p_k и обобщенные угловые координаты u_k (а значит, и углы прихода θ_k). Выбрав в качестве модели образования корреляционной матрицы выражение (5) для некоррелированных сигналов, составим оценочную матрицу S размера $n \times n$, причем ее элемент, стоящий в k -й строке, l -м столбце равен $s_{kl} = \sqrt{\rho_l} \exp i(k-1)v_l$. Точная оценка матрицы S должна включать в себя матрицу X . Таким образом, точная оценка матрицы X возможна лишь при условии того, что число источников сигналов M не превышает числа элементов АР n . При точной оценке $\rho_l = p_l$, $v_l = u_l$ и $S_l = \sqrt{p_l} X_l$, где S_l — l -й вектор-столбец матрицы S , и $SS^{*T} = X \text{diag} P X^{*T}$.

Заметим, что поскольку матрица R_{xx} теплицева, то для полного совпадения матрицы SS^{*T} с R_{xx} достаточно обеспечить совпадение любой, например, первой строки. Здесь пренебрегаем мощностью собственного шума АР σ^2 , входящего в диагональ матрицы R_{xx} . Его влияние можно исключить разными путями: расчетом собственных значений матрицы R_{xx} и выделением наименьшего (которое равно σ^2 при $M < n$), оценкой в предлагаемом методе, алгоритм которой будет дан ниже. Введем в рассмотрение следующий показатель качества:

$$J = \sum_{j=1}^n \left| r_{1j} - \sum_{k=1}^n s_{1k} s_{jk}^* \right|^2, \quad (6)$$

который представляет собой норму вектора разности первых строк матриц R_{xx} и S^{*T} . Не зная априори числа сигналов, рассчитываем на максимально возможное для оценивания число параметров. Этим определяется верхний предел второй суммы в (6). Заметим, что $r_{1j} = \sum_{k=1}^M p_k \exp[i(1-j)u_k]$. В то же время $s_{1k} s_{jk}^* = \sqrt{\rho_k} \sqrt{\rho_k} \exp[i(1-j)v_k]$. Учитывая последнее выражение, из (6) получим

$$J = \sum_{j=1}^n \left| r_{1j} - \sum_{k=1}^n \rho_k \exp[i(1-j)v_k] \right|^2. \quad (7)$$

Минимум показателя качества (7) очевиден — он равен нулю (при идеально оцененной матрице R_{xx}): $\min J = 0$. Обеспечивается он при выполнении системы равенств

$$\sum_{k=1}^M p_k \exp[i(1-j)u_k] = \sum_{l=1}^n \rho_l \exp[i(1-j)v_l], \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

Решение (8) очевидно: $\rho_k = p_k$, $v_k = u_k$, $k = 1, 2, \dots, M$; $\rho_k = 0$ при $k = M + 1, \dots, n$.

Возможны и другие решения (8) (например, при $M = 1$ решение может содержать n сигналов разной мощности, сумма которых равна p_1), однако все они являются эквивалентными по физическому смыслу (с одинаковыми обобщенными угловыми координатами либо отличающимися на $2\pi m$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$). Это объясняется тем, что число сигналов в решении не может отличаться от их действительного числа, так как иначе будет различаться ранг матриц $X \text{diag} P X^{*T}$ и SS^{*T} , что невозможно, ибо при $J = 0$ совпадают как первые строки матриц $X \text{diag} P X^{*T}$ и SS^{*T} , так и сами матрицы (см. выше).

При оценке матрицы R_{xx} по конечному числу выборок задача сводится к нахождению минимума показателя качества (6), в общем случае не равного нулю. К сожалению, в силу нелинейности, он оказывается многоэкстремальным — искомый минимум оказывается глобальным. Известно, что нахождение глобального экстремума многоэкстремальной функции является сложной задачей.

Чтобы обойти эту сложность, предлагается использовать в качестве начальной точки поиска данные, полученные, например, по методу MUSIC.

В связи с тем, что метод, предложенный в [4], использует показатель качества оценивания, то его применение может лишь улучшить результаты оценивания, полученные известными методами.

Основная идея метода: определение оценивающих переменных из условия минимизации нормы разности оцененной корреляционной матрицы R_{xx} и оценочной (либо лишь некоторых их элементов, например, первой строки), вид которой (модель) определяется априорными сведениями о матрице R_{xx} (сигналов, подлежащих оценке, а также имеющейся в распоряжении системы обработки), допускает естественное обобщение на многие важные практические случаи. Отметим два из них.

Для модели коррелированных сигналов, аналогично описанному, можно построить итеративные процедуры оценивания всех неизвестных. Причем, показатель качества, аналогичный (6), но использующий другую модель сигналов (4), должен содержать столько слагаемых, сколько необходимо для обеспечения совпадения матриц R_{xx} и

$$\hat{R}_{xx} = \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m \rho_{kl} S_k S_l^{*T} + \hat{\sigma}^2 I \text{ (для некоррелированных сигналов достаточно было}$$

обеспечить совпадение первых строк).

Максимально возможное число оцениваемых сигналов m зависит от числа элементов АР n . Так, определение параметров трех коррелированных сигналов требует использования 6 степеней свободы для определения коэффициентов p_{kl} матрицы P (4), 3-х — для определения θ_k и 1 — для определения σ^2 . Те же величины для 4-х сигналов составляют 10, 4 и 1. Соответственно требуются, как минимум, 6- и 8-элементные антенные решетки.

Список литературы

1. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2003 г.- 198 с.
2. Караваев В.В., Сазонов В.В. Статистическая теория пассивной локации. М.: Радио и связь, 1987 г.- 240 с.
3. Самойленко В.И., Грубрин И.В., Кибернетические методы в задачах РЭП (обработка сигналов в ФАР). М.: МАИ, 1993 г.- 36 с.
4. Грубрин И.В., Самойленко В.И. Оценивание мощности и угловых координат источников сигналов в многоканальных системах. М.: Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1986, № 3, с. 64-71.

05.13.01

С.М. Зраенко канд. техн. наук

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, z_sm@mail.ru

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗАБОЛОЧЕННЫХ ЛЕСНЫХ УЧАСТКОВ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

В работе представлены результаты исследования алгоритмов обнаружения заболоченных лесных участков по космическим снимкам спутника Landsat. Получено, что погрешности выделения болот для алгоритмов контролируемой классификации методами параллелепипеда и минимального расстояния составляют приблизительно от 1,9% до 5,4%. Для методов кластеризации ISODATA и k-means при этом получены одинаковые ошибки 10,3%, что свидетельствует об их меньшей эффективности при решении данной задачи.

Ключевые слова: *данные дистанционного зондирования Landsat 8, обнаружение болот, алгоритмы контролируемой и неконтролируемой классификации.*

Введение

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко используются для решения задач сельского и лесного хозяйства, экологии и многих других. Целью настоящей работы является исследование алгоритмов выделения заболоченных участков местности по космическим снимкам.

Поставленная задача решается с использованием алгоритмов контролируемой и неконтролируемой классификации (кластеризации), реализованных в пакете прикладных программ ENVI 4.8 [1], предназначенном для анализа цифровых космических изображений. Сравнительный анализ алгоритмов осуществлён по снимку спутника Landsat 8 [2]. На данном спутнике установлены датчики Operational Land Imager (OLI) и Thermal InfraRed Sensor (TIRS) позволяющие получать снимки Земной поверхности с разрешением от 15 до 100 метров на пиксель. Первый из этих датчиков формирует изображения в девяти каналах охватывающих видимые и ближние ИК спектральные диапазоны, второй – в двух каналах дальнего (теплого) ИК диапазона.

В качестве источника данных об анализируемой местности используется векторная карта лесной территории, составленная в 2006 году, на которой указаны типы природных объектов и их площадь. Согласно имеющейся атрибутивной информации площадь имеющегося на ней заболоченного участка составляет 4209896 м². При его выделении использовался снимок 22 июня 2013 года (рисунок 1) на котором слева в виде большого светлого вытянутого вертикально пятна расположен исследуемый участок.



Рис. 1 – Изображение болота в 7 канале спутника Landsat 8

В результате анализа данных Landsat 8 отобраны наиболее информативные с точки зрения выделения болота спектральные каналы. Ими оказались четыре канала датчика OLI с разрешением 30 метров на пиксель: 2 канал (0,45-0,51 мкм) – Синий (Blue), 3 канал (0,53-0,59 мкм) – Зеленый (Green), 4 канал (0,64-0,67 мкм) – Красный (Red), 7 канал (2,11-2,29 мкм) – Ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 2). При этом наилучшие результаты были получены для 7 канала, на котором заболоченные участки выделяются наиболее контрастно, а облачная дымка минимально искажает изображение.

1. Использование алгоритмов контролируемой классификации

Для выделения болота алгоритмами контролируемой классификации использовались алгоритмы, основанные на параметрических (минимального расстояния – Евклидова метрика) и непараметрических (параллелепипеда) решающих правилах.

В применяемых алгоритмах осуществляется сравнение значения яркости каждого пикселя изображения с эталонами, которые задаются оператором выполняющим дешифрирование снимков. В результате этого каждый пиксель относится к наиболее подходящему классу объектов. При этом на этапе обучения алгоритма задается объект к классу которого нужно отнести объекты, находящиеся на изображении и задаются эталонные обучающие выборки (типичные фрагменты изображений выделяемого объекта). На этапе классификации с яркостью выбранных эталонов сравнивается яркость каждого пикселя для определения, к какому классу объектов он принадлежит. На следующем этапе осуществляется постклассификационная обработка – генерализация изображения. Для этого использовался реализованный в ENVI алгоритм Majority/Minority Analysis объединяющий участки в более цельные, а также исключаящий мелкие классифицированные области, являющиеся незначительными. По результатам выполнения описанной процедуры для 7 спектрального канала формировалась векторная карта выделяемого объекта (болота) по которой определялась его площадь (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты контролируемой классификации

Метод классификации	Постклассификационная обработка	Площадь болота, м ²	Ошибка определения площади
Минимального расстояния	-	4034700	4,16%
	+	4038300	4,08%
Параллелепипеда	-	4291200	1,93%
	+	3983400	5,38%

Как следует из результатов анализа при использовании метода параллелепипеда без постклассификационной обработки площадь выделенного болота наиболее близка к фактической. Однако в этом случае на сформированном векторном изображении имеется слишком много мелких объектов отнесенных к выделяемому классу. При использовании же постклассификационной обработки удастся существенно уменьшить количество таких объектов.

2. Использование алгоритмов неконтролируемой классификации

При решении задачи алгоритмами неконтролируемой классификации (кластеризации) использовались итеративные процедуры ISODATA [3] и k-means [4]. В качестве исходных данных использовался также 7 канал того же снимка Landsat 8. Опытным путем установлено, что при решении задачи обнаружения известного болота на снимке для обоих методов кластеризации наиболее подходящее количество задаваемых классов равно трем. В этом случае один из выделяемых классов непосредственно соответствует объектам водно-болотного типа. Кроме этого оказалось достаточным ограничиться пятью итерациями при кластеризации обоими алгоритмами.

Результаты сравнительного анализа данных алгоритмов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты неконтролируемой классификации

Метод классификации	Площадь болота, м ²	Ошибка определения площади
ISODATA	3775500	10,32%
k-means	3775500	10,32%

3. Заключение

В результате проведенного исследования получено, что погрешности определения площади заболоченного участка в зависимости от применяемого метода для контролируемой классификации и наличия постклассификационной обработки варьируются от 1,93% до 5,38%. Для методов неконтролируемой классификации получены одинаковые ошибки (10,32%), что свидетельствует о меньшей эффективности их использования при решении задачи выделения болота по космическому снимку. В общем случае необходимо также отметить, что полученные значения погрешностей отчасти можно объяснить также и тем, что между составлением векторной карты и анализируемым снимком прошло более 5 лет и, следовательно, болото могло измениться вследствие зарастания растительностью. Вместе с этим на состояние болота на снимке могли также повлиять погодные условия (количество осадков) как года, так и даты съемки. Таким образом, необходимо отметить, что задача мониторинга болот требует анализа нескольких снимков ряда лет близких по времени съемки и погодным условиям. Дополнительным фактором повышения адекватности анализа может стать объединение результатов получаемых по снимкам разных спектральных диапазонов, как было предложено нами при решении задачи обнаружения лесных пожаров [5].

Список литературы

1. ENVI – image analysis software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI> (дата обращения 10.08.2019).
2. NASA. Landsat 8 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ldcm.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 10.08.2019).
3. ISODATA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nimar.narod.ru/algorytm/isodata/isodata.htm> (дата обращения 10.08.2019).
4. k-means [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/K-means> (дата обращения 10.08.2019).
5. Zraenko S., Mymrina M., Ganzha V. Development of trained algorithm detection of fires for multispectral systems remote monitoring // CEUR-Workshop. 2015. Vol. 1452, P. 187-195.

05.13.01

С.М. Зраенко канд. техн. наук

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, z_sm@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАЖЕНИЯ ОТ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО СНИМКАМ LANDSAT 7

В работе представлены результаты определения статистических характеристик отражения от лесной растительности по космическим снимкам спутника Landsat 7 на примере территории заповедника «Денежкин камень». Экспериментально доказана стационарность изображений при незначительной облачности на снимке и статистическая независимость пикселей для различных видов растительности. Показана нормальность отражения при различных значениях математического ожидания и дисперсии, зависящих от номера спектрального канала и состава растительного покрова. Определено существенное перекрытие гистограмм яркостей анализируемых объектов. Предложено при кластеризации лесной растительности объединять информацию, используя снимки разных сезонов года, а также нескольких спектральных каналов.

Ключевые слова: *космические снимки спутника Landsat 7, привязка снимков к карте, лесная растительность, статистические характеристики отражения.*

Введение

Построение моделей отражения от растительного покрова по космическим снимкам необходимо для моделирования изображений растительности. Такие модели далее могут эффективно использоваться для анализа алгоритмов её классификации. Целью настоящей работы является определение статистических характеристик отражения от лесной растительности по снимкам территории заповедника «Денежкин камень».

Для проведения исследований были выбраны два космических снимка спутника Landsat 7 [1] 13.06.2002 г. и 22.07.2008 г. информация о которых хранится в разработанном нами специализированном каталоге подспутниковых данных и космоснимков «ПоДиКС» [2]. Кроме этого использовалась карта заповедника с нанесенными на нее трансектами (длинными прямоугольными площадками шириной порядка 30 метров) для которых специалистами составлено геоботаническое описание. Работа с данными проводилась с использованием ГИС ArcGIS 9.3 [3] и программного комплекса по работе с данными дистанционного зондирования ENVI 4.8 [4].

1. Привязка снимков к растровой карте

На первом этапе проводимых исследований осуществлено выделение пикселей изображений, соответствующих известным элементам поверхности. При этом фотография растровой карты заповедника совмещалась со спутниковыми снимками. Совмещение изображения с картой осуществлялось посредством выбора контрольных точек, соответствующих одинаковым для них объектам. В качестве таких характерных участков выбирались элементы русел рек – слияния, излуцины и т.п. Вследствие этого, на участках, где подобные характерные точки отсутствуют, наблюдались искажения растровой карты (рисунок 1).

Далее на привязанный к карте снимок наносились векторные слои соответствующие расположению трансектов снабженных геоботаническим описанием вида «5П2ЕЗК»- 50% пихта, 20% ель и 30% кедр.

Следует отметить, что ширина трансектов (приблизительно 30 метров) является явно недостаточной по отношению к размеру пикселя используемых изображений Landsat (составляет также 30 метров). При этом возникают вопросы не только к малому количеству

пикселей, соответствующих различным породам растительности, но и с точностью привязки трансектов к изображению.

На следующем этапе произведена выборка элементов изображения вдоль наложенных на него трансектов. В результате этого сформированы фрагменты изображений для произрастающей там растительности.

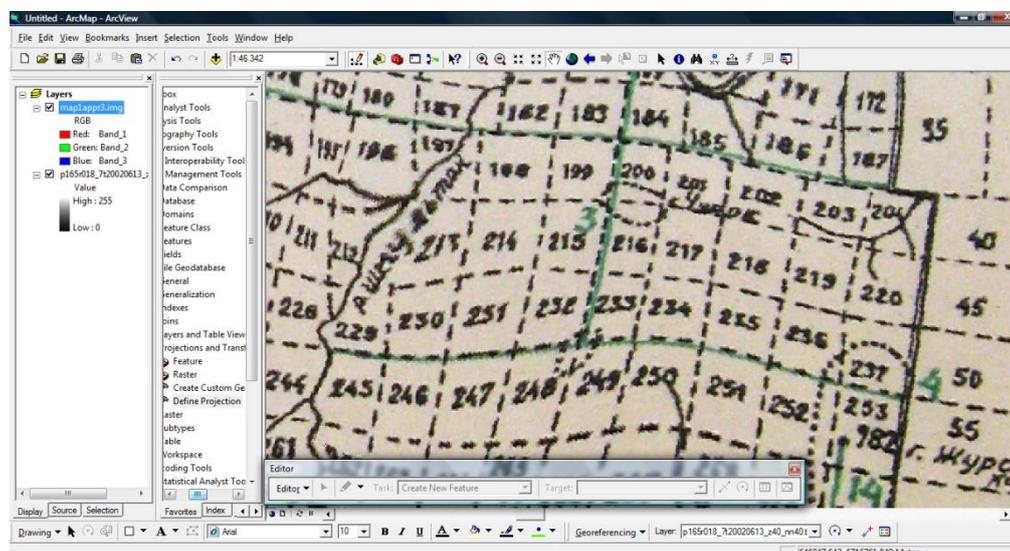


Рис. 1 – Искажения карты вследствие неравномерного расположения контрольных точек

2. Определение статистических характеристик изображений

На основании сформированных фрагментов проведены исследования статистических характеристик отражения от них. При этом экспериментально доказана стационарность изображений при отсутствии существенной облачности на снимке, а также статистическая независимость пикселей при наблюдении различных видов растительности. Определение вида распределения отраженного сигнала выполнено с использованием критерия хи-квадрат. С этой целью построены гистограммы отражения от различных видов лесной растительности. В качестве примера на рисунке 2 приведена гистограмма распределения яркости изображения для участка сосны (10С, снимок 22.07.2008 г.).

По результатам проверки гипотезы о виде распределения для данного изображения при выборочных оценочных значениях математического ожидания $\mu_x = 55.479$ и дисперсии $\sigma_x^2 = 1.759$ показано, что начиная с 1%-ного уровня значимости оно соответствует нормальному.

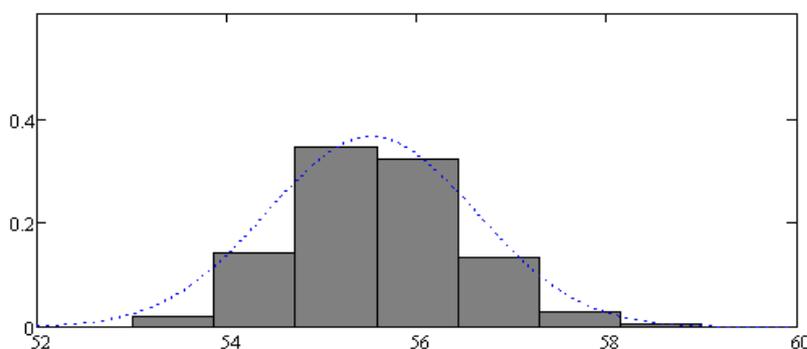


Рис. 2 – Гистограмма распределения яркости

Далее проведены исследования по влиянию длины волны (номера спектрального канала) на статистические характеристики яркости отраженного сигнала. На рисунке 3 представлены гистограммы яркости для хвойной растительности 5ПЗЕ2К состоящей из пихты, ели и кедра для снимка 22.07.2008 г. На этом рисунке красным цветом выделена гистограмма отражения в первом спектральном канале, синим – во втором, салатovým – в третьем, голубым – в четвертом, пурпурным – в пятом, коричневым – в седьмом.

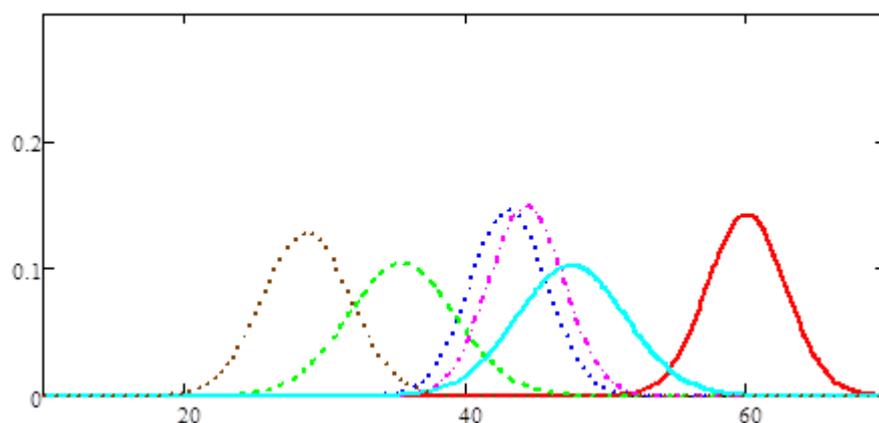


Рис. 3 – Гистограммы яркостей для хвойной растительности 5ПЗЕ2К

Следующий эксперимент был посвящен исследованию отличий между изображениями разных групп растительности. Для того же снимка построены гистограммы яркостей для 4-го спектрального канала - рисунок 4 (а) для следующих видов растительного покрова: 5ПЗЕ2К – салатовый график; 5Б5О – пурпурный; 6КЗЕ1Б – голубой; 7ЕЗБ – синий; 10С – красный.

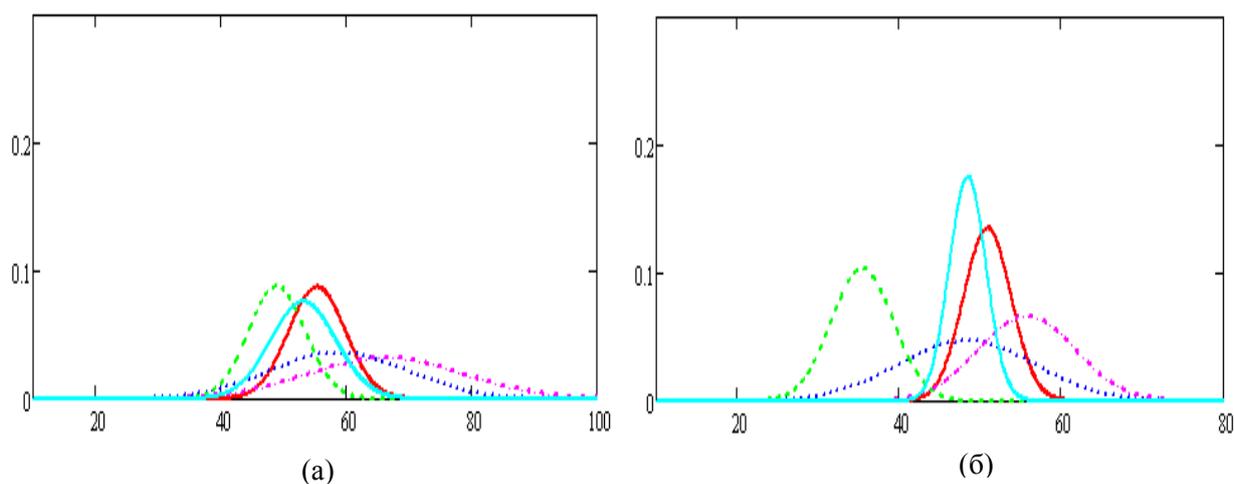


Рис. 4 – Гистограммы яркостей растительности в 4-м спектральном канале
(а) - снимок 22 июля 2008 г., (б) - снимок 13 июня 2002 г.

Как следует из полученных результатов, наблюдается существенное перекрытие яркостей анализируемых объектов растительности, что не позволяет выполнять их уверенную кластеризацию даже при использовании разнообразных алгоритмов обработки данных дистанционного зондирования [5]. В этой ситуации можно предложить комплексирование одновременных снимков (лучше для разных сезонов года) а также полученных в нескольких спектральных каналах. Так, например, построение гистограмм по 4-му спектральному каналу для исследуемых объектов по снимку 13 июня 2002 года полностью подтверждает высказанное предположение - рисунок 4 (б). Однако следует иметь в виду, что отличия здесь зависят не только от фенологических изменений растительности, но и от облачной дымки в момент съёмки.

Заключение

В работе представлены результаты определения статистических характеристик отражения от лесной растительности по космическим снимкам спутника Landsat 7 для территории заповедника «Денежкин камень». Осуществлено выделение пикселей изображений, соответствующих известным элементам поверхности по результатам совмещения растровой карты заповедника со спутниковыми снимками. После привязки снимков к карте сформированы фрагменты изображений, соответствующие разным лесным породам и определены их статистические характеристики. Экспериментально доказана стационарность изображений при незначительной облачности на снимке и статистическая независимость

пикселей при наблюдении различных видов растительности. Показана нормальность отражения при различных значениях математического ожидания и дисперсии, зависящих от номера спектрального канала и состава растительного покрова. По результатам исследования определено существенное перекрытие гистограмм яркостей анализируемых объектов растительности, что при выполнении процедуры их кластеризации требует комплексирования информации использованием снимков разных сезонов года, а также нескольких спектральных каналов и учёта облачной дымки.

Список литературы

1. NASA. Landsat 7 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-7/> (дата обращения 10.08.2019).
2. Зраенко С.М., Ганжа В.В., Мырина М.А. Каталогизация подспутниковой информации и космоснимков для исследования алгоритмов обнаружения природных объектов по данным дистанционного зондирования // Современные фундаментальные и прикладные исследования. - 2016. - № 4 (23). - С. 44-51.
3. ArcGIS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.esri.com/ru-ru/home> (дата обращения 10.08.2019).
4. ENVI [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI> (дата обращения 10.08.2019).
5. Обработка данных дистанционного зондирования Земли: практические аспекты : Учебное пособие / [В.Г. Коберниченко и др.] ; Под ред. В.Г. Коберниченко. - Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 168 с. : ил. – ISBN 978-5-7996-0867-5.

05.13.01

Ю.Н. Кондрашов д-р техн. наук

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, kondrashovyn609@mai.ru, jkondr@yandex.ru

РАЗВИТИЕ ХРАНИЛИЩ ДАННЫХ ДЛЯ РАБОТЫ С BIG DATA В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

В работе рассматривается развитие хранилищ данных (ХД) для работы с большими данными (Big data) в системах поддержки принятия решений. Рассматриваются причины необходимости изменения классической концепции построения ХД при работе с большими данными, описывается модернизированная архитектура на основе модели Data Vault, её основные компоненты и принципы физической реализации на платформе Hadoop.

Ключевые слова: *хранилище данных, большие данные, Data Vault, Hadoop.*

В работе [1] рассматривалось использование аналитических технологий в системах поддержки принятия решений и показывалась их высокая эффективность. Ключевым компонентом аналитических технологий являются хранилища данных (ХД), накапливающие и структурирующие информацию для поддержки принятия решений и обеспечивающие OLAP-анализ и Data Mining.

Ключевая роль ХД обусловила их развитие и широкое применение в системах поддержки принятия решений. Реализации базируются на архитектурах Corporate Information Factory (CIF), Data Warehouse Bus (DWB), их комбинаций (гибридная архитектура) и виртуального хранилища. Используются канонические физические модели для хранения данных «Звезда» и «Снежинка» с различными уровнями нормализации данных, многомерные кубы для OLAP-анализа с вариантами архитектуры (MOLAP, ROLAP, HOLAP). Имеются развитые сервисы интеграции, обеспечивающие извлечение, преобразование и загрузку данных в хранилище из различных источников информации (средства ETL). Разработаны методы трансформации «медленно» и «быстро» меняющихся измерений. СУБД всех ведущих производителей являются многофункциональными платформами для эффективной реализации возможных архитектур ХД.

Однако появление «больших данных (Big data)» требует изменения традиционной архитектуры ХД и использования соответствующих технических и программных средств при разработке и поддержке. Необходима массовая параллельная обработка, обеспечивающая горизонтальную масштабируемость и гибкость ресурсов вычислений и хранения.

Понятие больших данных является развивающимся и определяет архитектуру хранилища. Если совсем недавно для описания и определения «больших данных» использовалось 3 признака (так называемые три «V»): «Volume» - объем, «Velocity» - скорость, «Variety» – многообразие, то сейчас используется уже 7 признаков. Добавились «veracity» — достоверность, «viability» — жизнеспособность, «value» — ценность, «variability» — переменчивость, и «visualization»-визуализация. В этих признаках подчёркивается, что определяющей характеристикой для больших данных является не только их физический объём, но другие категории, существенные для представления о сложности задачи обработки и анализа и определяющие архитектуру ХД [2].

Архитектура ХД также во многом определяется свойствами базовых систем, над которыми строится хранилище. Определяющими свойствами являются множественность и распределённость функционирующих баз данных, наличие отличающихся форматами неструктурированных или полуструктурированных данных.

Традиционный процесс интеграции данных ETL в ХД для больших данных трансформируется в процесс извлечения, загрузки и преобразования (ELT – процесс), с

помощью которого данные извлекаются из исходной системы, загружаются в хранилище данных, а затем преобразовываются (все данные из источников перемещаются в единый централизованный репозиторий данных). Таким образом создается централизованное хранилище для всех потенциально релевантных данных, доступных из разных источников, которые затем могут быть организованы, обнаружены и проанализированы. Такая концепция получила название Data Lake (Озеро данных) [3].

В архитектуре ХД для больших данных выделяются уровни получения данных, интегрированного ядра, доступа, использования. Уровень получения данных взаимодействует с источниками данных и предназначен для обеспечения потребности (нужности) данных. На этом уровне загружаются сырые данные абсолютно разных форматов (tsv, csv, xml, syslog, json и др.). Интегрированное ядро обеспечивает преобразование, обобщение, создание внутренней структуры взаимосвязей для многофункционального использования данных. Данные поступают в формате приближенном к реляционному в результате преобразования на уровне получения данных и собираются в консолидированную модель. Информация интегрируется в целостную структуру на уровне ключа, атрибута, на описательном, структурном уровне и др. Уровень доступа обеспечивает ввод аналитических запросов, их эффективное выполнение и отображение результатов. Фактически на этом уровне находятся прикладные витрины данных.

Использование канонических моделей для ХД данных с такой архитектурой является неудобным с точки зрения масштабируемости и гибкости. Для рассматриваемой архитектуры разработана специальная модель данных (Data Vault), являющаяся комбинацией канонической схемы «звезды» и 3-ей нормальной формы [4].

В модели Data Vault выделяются три основных компонента — Хаб (Hub), Ссылка (Link) и Сателлит (Satellite). Таблица-Хаб содержит одно или несколько полей, отражающих сущность в понятиях бизнес-анализа («бизнес ключ», который всегда должен быть уникальным и неизменным, а также содержит мета-поля, в которых хранятся время первоначальной загрузки сущности в хранилище и ее источник). Таблицы-Ссылки связывают несколько Хабов связью многие-ко-многим. Они содержат те же метаданные, что и Хаб. Все описательные атрибуты Хаба или Ссылки (контекст) помещаются в таблицы-Сателлиты. Помимо контекста Сателлит содержит стандартный набор метаданных и один и только один ключ «родителя». В течение времени информация будет изменяться, поэтому структура данной сущности должна позволять хранить как измененную, так и новую информацию. Таким образом в Сателлитах хранится история изменения контекста. Одним из главных преимуществ модели Data Vault является динамическое представление взаимосвязей предметной области хранилища данных. Взаимосвязи определяются через бизнес-ключи Хаб и фиксируются в сущностях Ссылка. Они существуют во времени, и их история сохраняется в Сателлит.

Все поступившие подробные данные разбиваются на Хабы, Ссылки и Сателлиты. Такую же структуру имеют и переработанные данные (агрегаты и вычисляемые значения). При загрузке данных сначала загружаются Хабы, потом Ссылки и затем Сателлиты, а сама загрузка каждого из них может быть распараллелена.

Для повышения эффективности работы в рассмотренную модель могут добавляться дополнительные сущности. В частности, для удобства аналитики используются таблица различных справочников, таблица перечня версий для записей с датой начала актуальности, специальные таблицы фактов, в которых для показателей не предусмотрены изменения или история (такие факты считаются мгновенными и неизменными).

Такое максимально полное хранилище «сырых» данных и удобная структура их хранения позволяют сформировать витрину данных для практически любых аналитических запросов в системе поддержки принятия решений. Гибкость архитектуры, заложенная в модель Data Vault, позволяет создавать хранилище данных итерационно, без существенных изменений созданной структуры.

Физически хранилище больших данных рассматриваемой архитектуры - это распределенная система с параллельной обработкой данных на серверах. Наиболее

подходящей и используемой платформой для реализации является Hadoop (в частности версия Apache Hadoop). Платформа обеспечивает эффективное горизонтальное масштабирование в рамках вычислительной парадигмы MapReduce, по которой приложение разделяется на большое количество одинаковых элементарных заданий, выполнимых на узлах кластера (функция Map), и естественным образом собираемых в конечный результат (функция Reduce) [5].

Может применяться и как хранилище файлов, способное вместить петабайты данных (что и используется в рассматриваемой архитектуре ХД). Поддерживается распределённой файловой системой (Hadoop Distributed File System (HDFS)), позволяющей хранить информацию практически неограниченного объёма. Обеспечивается высокая надёжность всей системы за счет возможности предвидеть отказ отдельных узлов и восстанавливаться, когда такой отказ имеет место.

В состав платформы входит фреймворк Hadoop YARN для управления ресурсами кластера и менеджмента задач (в него и входит фреймворк MapReduce).

С платформой Hadoop интегрируются дополнительные инструменты, обеспечивающие эффективное хранение, обработку и анализ данных в ХД. Это прежде всего СУБД Hbase (относится к классу BigTable), СУБД Cassandra (относится к классу распределённых key-value баз данных), инструмент Hive для SQL-like запросов над большими данными (превращает SQL-запросы в серию MapReduce-задач), язык программирования Pig для анализа данных на высоком уровне, библиотека и движок машинного обучения на больших данных (Mahout).

Интеграция OLAP-анализа и методов Data Mining в ХД для больших данных основывается на возможности распараллеливания алгоритмов анализа, так как архитектура ХД определяет параллельную обработку, а реализующие алгоритмы должны укладываться в парадигму MapReduce.

Существующие подходы для многомерного анализа могут хорошо масштабироваться и допускают распределённую параллельную обработку информации. Технология Kyvos Insights позволяет проводить OLAP-анализ на платформе Hadoop (масштабируемая технология «cubes on Hadoop», которая поддерживает многомерную аналитику на основе OLAP). Возможна обработка структурированных и неструктурированных данных. Имеются встроенные средства анализа и визуализации, а также поддерживаются Microsoft Excel и другие приложения визуализации данных. OLAP - запросы автоматически генерируют задания MapReduce [6].

Алгоритмы анализа данных, к которым относятся регрессия, классификация, кластеризация и поиск закономерностей, также допускают параллельную обработку. Программные продукты (например, SAP HANA, Greenplum Chorus, Aster Data nCluster) позволяют запускать эти алгоритмы на Больших Данных.

Список литературы

1. *Кондрашов Ю.Н.* Использование аналитические технологии в системах поддержки принятия решений на этапах жизненного цикла аэрокосмических изделий. *Научно-технический вестник Поволжья.* №5 2019г. –Казань.
2. Большие данные (Big Data) [Электронный ресурс] <http://www.tadviser.ru/index.php//> Определение, методика, теория и практика в отраслях.
3. What is a data lake? (англ.) [Электронный ресурс] <https://aws.amazon.com/ru/big-data/datalakes-and-analytics/what-is-a-data-lake/> // Определение «озера данных», сравнение с реляционным хранилищем данных.
4. *Злобина А.В.* Обзор методологии и архитектуры Data Vault // *Наука, техника и образование.* 2016. №9 (27).
5. Apache Hadoop [Электронный ресурс] https://ru.bmstu.wiki/Apache_Hadoop // Описание, история, возможности Hadoop.
6. Fast Big Data (англ.) [Электронный ресурс] <https://www.jenunderwood.com/2017/05/17/big-data-analytics-olap-hadoop/>

05.13.01

Н.И. Красовская канд. техн. наук, А.В. Сычева, В.Н. Красовский канд. техн. наук

Тюменский индустриальный университет,
Строительный институт,
Институт транспорта,
Тюмень, krass51@mail.ru, krs2000@mail.ru, krass200552@mail.ru

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА

В процессе работы собрана информация о документообороте и программах, уменьшающих затраты времени на различные виды управленческой деятельности на предприятиях. Сделаны выводы, что не все показатели содержатся в единой информационной базе и не всегда фиксируются в явном виде. Поэтому для решения поставленной задачи важно провести детальный анализ информационных систем, определить источники необходимой информации и методы оценки.

Ключевые слова: *электронный документооборот, система, информация, прибыль, эффективность.*

В современном мире нас окружает множество информации. Её количество растет, а для ее анализа по-прежнему применяются человеческие ресурсы, рост аналитических возможностей которых не способен успевать за современным прогрессом. Решение этой проблемы на данном этапе является создание и внедрение особых информационных систем, призванных сократить объем обрабатываемой информации по определенным критериям. Внедрение системы электронного документооборота (СЭД) - это наиболее рациональный способ решить стоящие задачи по оптимизации производственного процесса, а также сократить затраты времени.

Организация документооборота должна отвечать следующим требованиям:

- прохождение документов должно быть оперативным и целенаправленно регулироваться;
- каждое перемещение документа должно быть оправданным;
- следует исключать или ограничивать возвратные перемещения документов, инстанции прохождения и действия с документами, не обусловленные деловой необходимостью;
- соблюдение единого порядка прохождения и обработки основных категорий документов.

Объем документооборота – это общее количество входящих, исходящих и внутренних документов за год. Учет документооборота необходим для определения загрузки подразделений, отдельных работников и организации в целом. Эти данные используются при разработке мероприятий по совершенствованию организации делопроизводства, при решении вопроса о внедрении средств механизации и автоматизации для обработки документов.

Автоматизация электронного документооборота должна проходить постепенно. Перед внедрением системы необходимо обязательно точно определить цели ее использования. Кроме того, обязательным условием эффективной эксплуатации является постоянный мониторинг результатов внедрения. Показателями эффективности как на этапе выбора подходящей СЭД, так и при ее анализе в процессе эксплуатации могут выступать: «зрелость» СЭД (количество ошибок в ее работе, обусловленных недостаточной проработкой программного обеспечения или отсутствием обновлений); соответствие отраслевым стандартам; соответствие ключевым требованиям компании и критическим факторам успеха;

уровень технической поддержки во время внедрения и эксплуатации; масштабируемость (возможность увеличения объемов работ и увеличения числа пользователей); доступность пользовательской документации, возможность изменения настроек системы; уровень безопасности и конфиденциальность данных; отказоустойчивость; стоимость владения (приобретение лицензий, администрирование, техническая поддержка, обновления, аппаратное обеспечение и т.д.)

В настоящее время в рамках государственной программы «Переход РФ на принятую в международной практике систему учета и статистики в соответствии с требованиями развития рыночной экономики» [1] разработаны и используются в практике работы автотранспортных предприятий унифицированные формы путевого и перевозочного документов первичного учета (путевой лист и транспортная накладная), позволяющие осуществлять любой утвержденный федеральным автотранспортным органом порядок взаиморасчетов между участниками провоза грузов.

Внедрение системы электронного документооборота обеспечивает экономию ресурсов компании, улучшение деловых коммуникаций и, кроме того, получение прибыли (либо уменьшение рисков получения убытков). При этом вполне возможно четкое определение ключевых показателей эффективности системы, в т. ч. их числовая оценка [2, 3].

Ключевые показатели эффективности системы должны оцениваться в течение всего срока ее использования со времени завершения опытной эксплуатации СЭД. Это позволяет не только понять эффективность внедрения СЭД, но и спланировать ее дальнейшее развитие.

Экономическая эффективность внедрения автоматизированных систем документационного обеспечения управления - это количественная стоимостная оценка эффекта от проведения мероприятий по автоматизации информационного обеспечения организации.

Эффект от внедрения СЭД состоит из поддающейся и не поддающейся количественным подсчетам частей:

- прямой эффект от внедрения системы, связанный с экономией рабочего времени сотрудников и средств на материалы - исчисляемые выгоды;

- эффект, обусловленный теми преимуществами функционирования организации, которые дает автоматизированная система (скорость и качество предоставления услуг, сокращение времени прохождения документов, повышение качества выпускаемых документов и контроля исполнительской дисциплины и т.д.) - неисчисляемые выгоды.

В данной работе в качестве обобщенного критерия оценки эффективности СЭД применен расчётный срок окупаемости автоматизированной системы документационного обеспечения управления на основе промышленной системы управления базами данных (СУБД) формальное выражение которого имеет вид (расшифровка параметров приведена в таблице):

$$T = C_0 / \Delta = [C_l + C_n + C_z + C_o + C_c \times (12-M) / 12 + C_b + C_k] / [(\Delta_{сд} + \Delta_{нд} + \Delta_{yd}) \times 12 \times N \times 8 + (\Delta_m + \Delta_a + \Delta_p) / 500 \times C].$$

Сбор исходных данных осуществлялся в период производственной практики на станциях технического обслуживания (СТО) различных фирм ООО «Автоград». Следует отметить, что на СТО «Автограда» в основном применяется СЭД на базе пакета «1С: Предприятие 8.2», поэтому данные для формирования исходных данных по другим СЭД выбирались из доступной документации других СТО. Расчет обобщенного параметра эффективности СЭД проводился по вышеприведённой формуле.

Значения параметров, оцениваемых СЭД приведены в таблице. Все численные показатели, по возможности, приведены к году.

Таблица - Исходные данные для расчета эффективности СЭД, применяемых на СТО

№ п/п	Наименование параметра	Наименование СЭД								
		Turbo Service	Автоприятие10 AutoSoft	AllCar Service	AutoИн-теллект	LSAvto	Инфо-Предприятие: Автосервис	IC:Приятие 8.2	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Расчет расходов:										
1	Стоимость закупаемых клиентских лицензий, C_n , тыс.руб.	3600	4890	2290	4570	2860	3500	4270		
2	Стоимость обеспечения дополнительными программно-техническими средствами, C_n , тыс.р.уб.	220	240	190	290	350	230	190		
3	Стоимость работ по запуску системы, C_2 тыс.руб.	300	370	290	330	300	380	460		
4	Стоимость обучения пользователей, администраторов системы, C_e , тыс.руб.	180	220	200	160	250	240	160		
5	Стоимость годового сопровождения системы компаний, C_e , тыс.руб.	450	378	246	417	378	456	469		
6	Стоимость однопроцессорного варианта СУБД, C_6 , тыс.руб.	223	246	332	365	477	521	516		
7	Стоимость конвертации данных, C_4 , тыс.руб.	34	28	43	33	29	26	16		
8	Количество месяцев для запуска системы, M	4	5	4	6	4	4	8		
Расчет доходов:										
9	Создание новых документов, $\mathcal{E}_{сб}$, тыс.руб.	448	512	378	467	587	376	225		
10	Поиск документа, $\mathcal{E}_{ю}$, тыс.руб.	212	187	114	175	232	120	96		
11	Согласование и утверждение документа, $\mathcal{E}_{ю}$, тыс.руб.	47	50	39	38	49	36	21		
12	Распечатано страниц текста, \mathcal{E}_m , тыс.руб.	26	33	22	35	35	33	42		
13	Сделано листов копий, \mathcal{E}_a , тыс.руб.	26	33	22	35	35	33	42		
14	Разослано единиц корреспонденции, \mathcal{E}_p , тыс.руб.	43	36	35	31	46	28	41		
15	Стоимость пачки бумаги, C , тыс.руб.	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5		
16	Количество мест в системе, N	2	3	3	3	4	3	7		
Расчетное значение срока окупаемости, $T, мес.$		5,0	4,0	3,6	4,3	1,9	4,8	3,6		

Из таблицы видно, что оценивая эффективность СЭД, применяемых для автоматизации ДОУ на СТО по обобщенному критерию – расчетному сроку окупаемости T , можно сделать вывод, что наиболее эффективной (применительно к тюменскому региону) можно считать СЭД LSAvto – $T = 1,9$ мес.

Выводы и рекомендации

1. Не следует задаваться целью просто «снизить бумажный документооборот», а сразу следует определить, какие именно документы печататься не будут (служебные записки, проекты договоров и т.п.). Тогда в конце можно будет проанализировать, действительно ли указанные документы больше не нуждаются в бумажной версии, и вычесть из затрат предприятия соответствующий объем расходных материалов.

2. Вместо общей цели «ускорения документооборота» следует определить наиболее критичные процессы, которые необходимо ускорить (например, сократить средний срок согласования договора с двух недель до двух дней). В итоге можно будет оценить средний срок прохождения задач на согласование договора и определить процент ускорения.

3. При наличии большого документооборота между удаленными офисами можно поставить цель сократить затраты на перемещение бумажных документов между офисами и определить, насколько снизилась потребность в курьерах и/или транспорте для доставки документов.

Выразить в денежном измерении эффект от внедрения информационных технологий (ИТ), — сложная задача. Более того, не имеющая изначально однозначного объективного решения. Т.е. решения для этой задачи какие-то есть, но все они носят частный, а главное — весьма субъективный характер. При этом экономические оценки нужно проводить, имея в виду относительность и субъективность таких оценок [4].

Имеются вполне объективные показатели результатов внедрения СЭД: скорость реализации бизнес-процессов, трудозатраты, число занятых сотрудников и пр. Эти показатели могут быть не главными в тех или иных проектах, но все же последить за ними можно [5].

Список литературы

1. <http://docs.cntd.ru/document/9003867>
2. *Теслер Г.С.* Новая кибернетика. Киев: Логос, 2008. – 401с.
3. *Круковский М.Ю.* Методология построения композитных систем документооборота // Математические машины и системы. - 2004. - №1.- С.101-114.
4. *Tapscott D., Castton C.* Paradigm shift: The new promise of Information technology.-New York: McGrawhill, 1993.-288p.
5. *Scott Morton M.* Information technology and organizational transformation- Oxford: Oxford University Press, 1991. -201p.

05.13.01

Д. А. Охотников канд. техн. наук, Буй Ши Хань

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
кафедра 410 «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование»,
Москва, denisoffice@ya.ru

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦ ДОРОГИ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛОЖЕНИЯ РАДИОЛОКАТОРА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Рассматриваются алгоритм и результаты вычисления местоположения дорожных границ относительно положения автомобильной радиолокационной системы (АРЛС) предупреждения столкновений (РПС). Приводятся результаты применения алгоритма при обработке радиолокационных изображений (РЛИ), полученных при натурных испытаниях прототипа АРЛС.

Ключевые слова: *автомобильная РЛС, радиолокационное изображение, дорожные границы.*

Введение

Современные автомобили оборудуются разными системами предупреждения столкновения: ультразвуковыми, инфракрасными, световыми, радиолокационными [1-3]. Радиолокационные системы предупреждения столкновения несут большое преимущество над другими в работоспособности при всепогодных условиях движения, большой дальностью наблюдения, широким сектором обзора. Поэтому на современных автомобилях постепенно устанавливаются АРЛС для сканирования местности, предоставляющем РЛ изображение дороги, ее границ, и других объектов оператору в режиме реального времени [3, 4].

В исследованиях АРЛС [2-5] рассматриваются вопросы формирования первичного РЛИ автомобильной дороги и дорожных объектов (ДО). В работе [4] был разработан алгоритм многоканального измерителя и оценен результат измерения расстояния до границ дороги, но полученный алгоритм не устойчиво работает при большой загруженности дороги объектами. Поэтому необходимо разрабатывать устойчивый алгоритм вычисления положения границ дороги, работающий независимо от степени загруженности дороги разными объектами.

Первичное радиолокационное изображение (РЛИ) формируется в полярной системе координат, поэтому прямые границы дороги показываются кривыми на экране и вызывают трудность в вычислении их положения. Представление РЛИ в прямоугольной системе приносит возможность статистического нахождения первоначального положения границ дороги с дальнейшим вычислением их местоположения.

Данное исследование было проведено на основе РЛ данных, полученных при натурных экспериментах прототипа панорамной АРЛС, разработанной на 410 кафедре, Московского Авиационного Института.

Алгоритм вычисления местоположения границ дороги

Алгоритм вычисления местоположения границ дорог показывается на рис. 1. Вычисление границ начинается со статистического нахождения первоначальной точки на границе дороги. Около первоначальной точки будут располагаться точки на границы дороги. Положения точек границ вычисляются построением горизонтальных сечений на РЛИ в прямоугольной системе координат и поиском точек границ на них по одному из известных методов нахождения положения радиолокационного объекта [6].

Точное положение точек границ осуществляется статистическим анализом определённой области горизонтальных сечений вблизи границы перехода. При анализе выполняется статистическое накопление характеристических точек линии границы, поэтому данный алгоритм определения границ не зависит от степени загруженности дороги объектами. После нахождения точек, расположенных на границах дороги необходимо определить их текущие положения эксплояционными методами и представить линии границ на экране водителя с РЛИ.

Экспериментальные результаты

Эксперименты были проведены на макете АРЛС Ка диапазона длин волн мобильного испытательного комплекса, разработанного на 410 кафедре, Московского Авиационного Института.



Рис. 1. Алгоритм вычисления положения границ дороги относительно АРЛС

Пример применения разработанного алгоритма построения границ проезжей части асфальтовой дороги с металлическими ограждениями для случая прямолинейного движения автомобиля с АРЛС показан на рис. 2. На рис. 3. показаны различные результаты применения данного алгоритма для разных типов переходов «дорожного полотна - обочины».

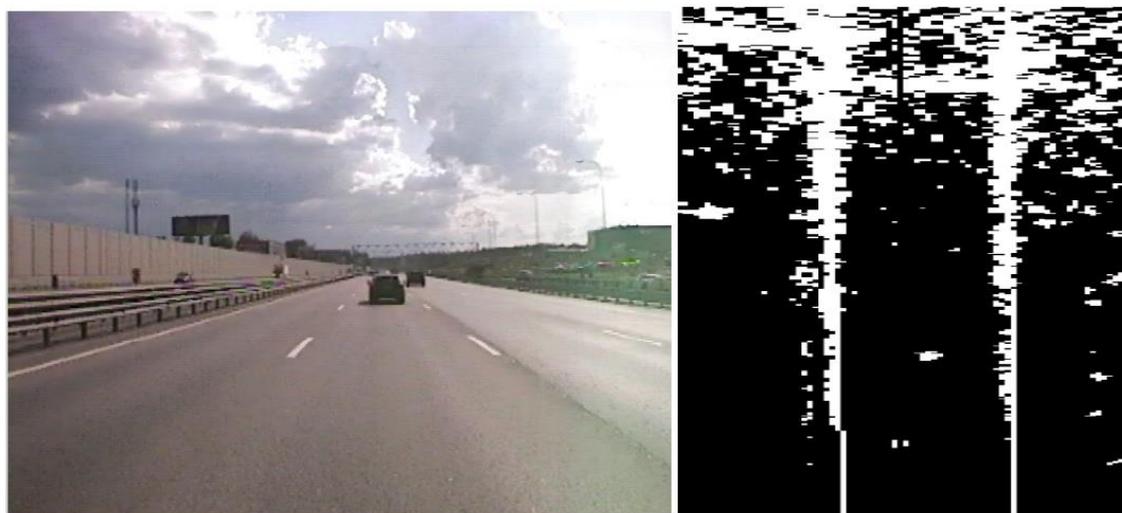


Рис.2. Оптическое и радиолокационное изображения участка асфальтовой дороги с металлическим ограждением с нанесёнными линиями обочин

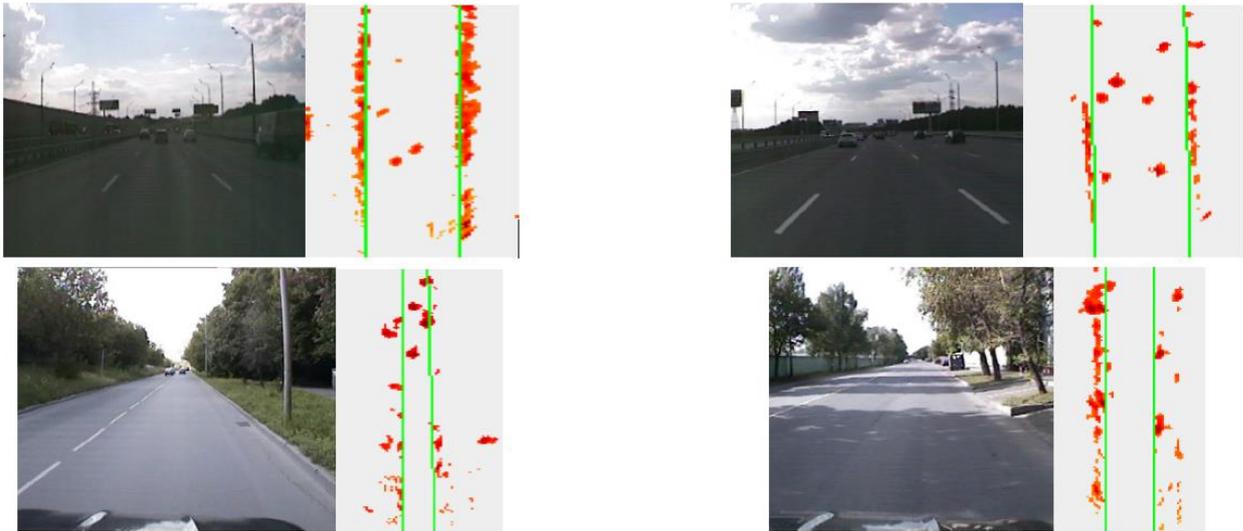


Рис. 3. Построение границ проезжей части для различных дорог

Заключение

Разработан устойчивый алгоритм вычисления положения дорожных границ, показывающий эффективность при обработке РЛИ дороги, оборудующей металлическими ограждениями. Данный алгоритм тоже работает при других обочинах и это приносит водителю возможность оценить положение автомобиля с АРЛС при движении на непривычной дороге в плохом условии видимости.

Обработка реальных сигналов показывает эффективность разработанных алгоритмов. Алгоритм определения дорожных границ поступает в работу по минимуму сразу на первом кадре РЛИ при металлических ограждениях на границах дороги.

Список литературы

1. Светлана Сысоева. Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем активной безопасности // Компоненты и технологии. 2006. № 8, 9, 10, 11. 2007. № 2, 3, 4, 8.
2. New Directions in Automotive Smarts. McConnell D., Continental Automotive Systems. Sensors, Apr 2006.
3. Нуждин, В.М. и др. Система радиовидения «Авторадар». Управление движением автомобиля // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2000. – № 5. – С. 48–51.
4. Ананенков А.Е., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., и др. Особенности радиолокационных образов в системах радиовидения ММ-диапазона // Инновации. –2005. –№ 6. – С. 98–104.
5. Шнайдер В.Б. Радиолокационная система обеспечения безопасности движения наземных транспортных средств// диссертация канд. тех. наук. Московский Авиационный Институт, 2014.
6. Жуковский А.П., Расторгуев В.В. Комплексные радиосистемы навигации и управления самолетов: Учеб. Пособие. – М.: Изд-во МАИ, 1988. – 268 с.: ил.

05.13.01

**А.В. Самсонова д-р педагог. наук, Л.Л. Ципин д-р педагог. наук,
И.Э. Барникова канд. педагог. наук**

Национальный государственный университет физической культуры, спорта и здоровья
имени П.Ф. Лесгафта,
кафедра биомеханики,

Санкт-Петербург, alla_samsonova@rambler.ru, l_tsipin@mail.ru, barnikova@mail.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВА В ИНФОРМАЦИОННОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ АНАЛИЗА СПОРТИВНЫХ ДВИЖЕНИЙ

Метод фазового пространства успешно применяется в информационном обеспечении исследований, связанных с изучением механизмов управления движениями и оценкой состояния здоровья человека. В спорте большой информативностью обладают фазовые траектории, построенные в координатах «текущая длина – скорость изменения длины мышцы». С их помощью произведена оценка эффективности упражнений в спринтерском и барьерном беге, педалировании, беге на средние дистанции, волейболе, атлетизме. Перспективными направлениями использования фазового пространства при анализе спортивных движений являются изучение механизмов активации мышц и их рецепторного аппарата, сравнение основного и специальных упражнений.

Ключевые слова: *информационное обеспечение анализа спортивных движений, фазовое пространство, фазовые траектории, спортивные движения, эффективность упражнений.*

Введение. Фазовое пространство – это пространство, в котором представлено множество всех возможных состояний динамической системы. Каждому ее состоянию (фазе) соответствует одна единственная точка, а изменение состояния системы характеризуется перемещением этой точки, которое называется фазовой траекторией. Для механических систем координатами фазового пространства являются пространственные координаты элементов системы и их импульсы. В случае двух координат фазового пространства X и X' анализ системы сводится к рассмотрению кривой на фазовой плоскости. Преимуществом этого метода является возможность судить о состоянии системы, не прибегая к решению дифференциальных уравнений. Цель настоящего исследования состоит в ретроспективном анализе использования метода фазового пространства при решении различных биологических задач и определении перспективных направлений его применения при изучении спортивных движений.

Методы исследования. Осуществлялся анализ отечественной и зарубежной специальной литературы по физиологическим, биомеханическим и спортивно-педагогическим аспектам проблемы применения метода фазового пространства за последние 50 лет. Кроме того, обобщены итоги деятельности в данном направлении научной школы кафедры биомеханики НГУ им. П.Ф. Лесгафта, Санкт-Петербург «Биомеханика силовых способностей».

Результаты. Основой для изучения возможностей метода фазового пространства при анализе спортивных движений послужили результаты его применения в биологии, в частности, в физиологии и биомеханике. В связи с этим уместно рассмотреть применение данного метода в указанных областях.

Использование метода фазового пространства в биологии. Большинство исследователей в России и за рубежом использовали анализ фазовых траекторий в координатах «межзвенный угол – угловая скорость». И.Б. Клочков и соавт. на основе сравнительной оценки в фазовом пространстве траекторий обобщенных импульсов и обобщенных координат исследовали качество протезов бедра и голени человека и рекомендовали конструкцию тренажеров с биологической обратной связью [1].

А.Г. Фельдман первым предложил использовать фазовые траектории в координатах «текущая длина – скорость изменения длины мышцы». Он проанализировал механизмы управления активностью мотонейронного пула при решении простейших двигательных задачах [2]. В.В. Александров и соавт. применили фазовые траектории для выявления вида взаимосвязи между различными признаками ЭКГ человека [3]. Использование метода фазового пространства и математического моделирования при изучении движений в суставах ног при ходьбе позволило В.А. Богданову проанализировать изоэнергетически дискретное управление движениями со стороны центральной нервной системы [4]. Впоследствии было показано, что использование фазовых траекторий для анализа ходьбы и бега может найти широкое применение в системах коррекции движений [5, 6, 7].

Цикл работ по использованию метода многомерных фазовых пространств при изучении физиологических функций человека был проведен сотрудниками Сургутского государственного университета. Так, В.А. Вишневский разработал комплексный подход к оценке состояния здоровья школьников на основе параметров квазиаттрактора вектора состояния организма (области фазового пространства, в котором вектор состояния системы непрерывно изменяется) [8]. Т.В. Гавриленко и соавт. применили метод фазовых пространств для анализа динамики тремора [9]. С.И. Логинов и соавт. изучили движение квазиаттракторов физической активности мужчин и женщин в 3-х мерном фазовом пространстве при оценке их локомоторной активности [10].

Использование фазового пространства в спорте. Впервые метод фазового пространства при изучении спортивных движений был применен для анализа работы мышц при спринтерском беге. I.M. Kozlov и A.V. Samsonova получили фазовые траектории в координатах «текущая длина – скорость изменения длины мышцы» с отмеченными периодами электрической активности мышцы [11]. Для анализа спортивных движений использование таких фазовых траекторий имело принципиальное значение, поскольку изменение длины двусуставных мышц невозможно оценить, используя координаты «межзвенный угол – угловая скорость».

Наиболее полно метод фазового пространства при изучении целостных двигательных действий представлен в работах А.В. Самсоновой. Ею впервые получены фазовые траектории мышц нижних конечностей человека при спринтерском и барьерном беге, а также педалировании в различном темпе. В дальнейшем этот подход был реализован при изучении двигательных действий в спринтерском беге, беге на средние дистанции, волейболе и атлетизме.

А.В. Самсонова и соавт. установили, что программы управления активностью одних и тех же мышц в беге и педалировании на велосипеде во многом схожи. Так, например, при повышении темпа движения активность двуглавой мышцы бедра возникает при меньших значениях длины мышцы. «Смещение» активности мышцы приводит к тому, что при максимальном темпе движения мышца активна только в уступающем режиме, т.е. максимально стимулированная мышца активно противодействует растягиванию [12]. Исследованиями И.М. Козлова с соавт. было показано, что при беге с различной скоростью и при выполнении специальных беговых упражнений используется одна двигательная программа, которая в каждом конкретном случае перестраивается в соответствии с двигательной задачей (масштабируется по амплитуде и по времени) [13].

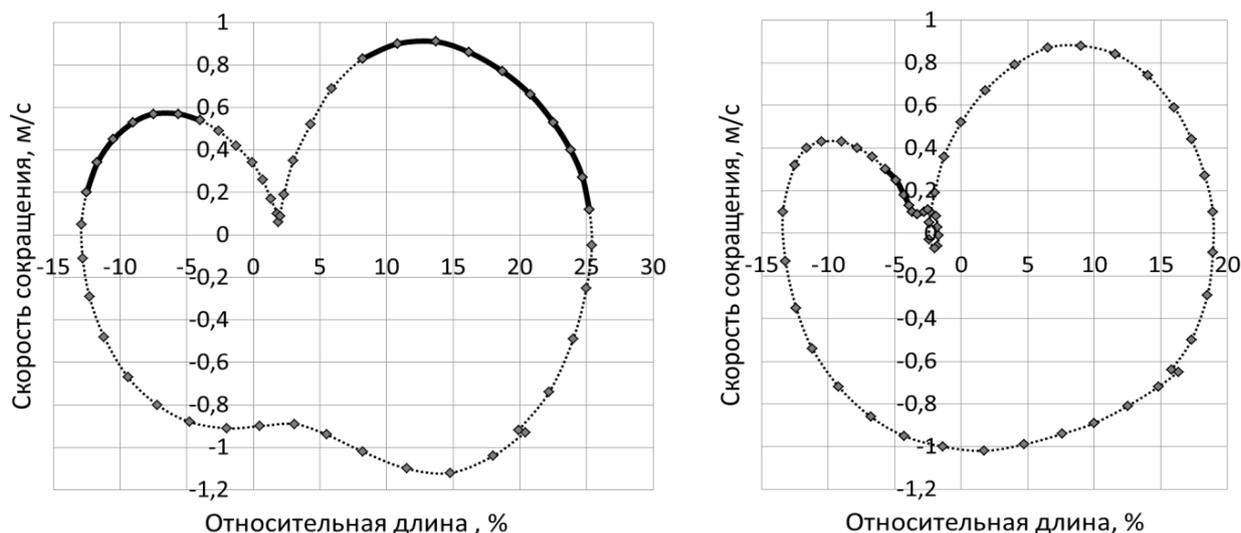


Рис. 1 – Фазовые траектории прямой мышцы бедра при беге на 800 м с соревновательной скоростью (слева) и при беге со скоростью 4.5 м/с в подъем с углом 4° (справа): жирные линии – периоды активности мышцы

На основе сравнения фазовых траекторий были введены критерии адекватности основного и специального упражнений в спринтерском и барьерном беге [12]. А.М. Доронин, используя эти критерии, провел сравнительный анализ ряда упражнений в пауэрлифтинге и волейболе [14]. Л.Л. Ципин в качестве одного из критериев эффективности специальных упражнений в беге на средние дистанции предложил коэффициент биомеханического соответствия, который находится путем сравнения положения периодов наибольшей активности мышц на фазовых траекториях при выполнении основного и специального упражнений (рис. 1) [15].

А.В. Воронов с соавт. получили фазовые траектории в координатах «межзвенный угол – угловая скорость» при ходьбе и беге в различном темпе на дорожках с различной жесткостью покрытия. Авторы заключили, что площадь фазовых траекторий служит различительным признаком, свидетельствующим об изменении локомоторной стратегии при изменении механических свойств опоры [16]. А.В. Воронов и Ю.С. Лемешева также исследовали фазовые траектории при беге на коньках со скоростью 10,5-12,8 м/с [17].

Заключение. Проведенный анализ позволяет выделить следующие перспективные направления использования фазового пространства при анализе спортивных движений: изучение механизмов активации мышц при различном темпе движений; сравнение основного и специальных упражнений; оценка состояния утомления мышц; оценка функционирования рецепторного аппарата мышц.

Список литературы

1. Клочков И.Б., Поветкин Ю.С., Жуков В.А., Соломонов Ю.Ф. Применение ЭВМ для анализа обобщенных фазовых портретов движения в тренажерах с биологической обратной связью // Биомеханика спорта: тез. докл. VI Всесоюз. конф. – Чернигов, 1989. – с. 88-89.
2. Фельдман А.Г. Центральные и рефлекторные механизмы управления движениями. – М.: Наука, 1979. – 184 с.
3. Александров В.В., Шеповальников А.Н., Шнейдеров В.С. Машинная графика физиологических данных. – Л.: Наука, 1981. – 111 с.
4. Богданов В.А. Особенности регуляции локомоторных движений человека // Биофизика. 1985. – Т.30, Вып.5. – с. 900-904.
5. Hamill J., Haddad J.M., Van Emmerik R.E.A. Using coordination measured for movement analysis // 23 International Symposium on Biomechanics in Sports. – Beijing, 2005. – pp. 33-38.
6. Jaworek, K. Application of phase diagrams to the analysis of human motion studies // Biology of Sport. – 1988. – Vol. 5, Suppl. 1. – pp. 47-54.
7. Richard E.A. van Emmerik Miller, R.H., Hamill J. Dynamical Systems Analysis of Coordination Research Methods // Research methods in biomechanics / D. Gordon E. Robertson, G.E. Caldwell, J. Hamill et al. (2nd edition). – Champaign, IL. – 2014. – P. 291-315.
8. Вишневецкий В.А. Метод многомерных фазовых пространств в управлении системой оздоровления школьников // Теория и практика физической культуры. – 2012. – № 10. – / с. 83-88.
9. Гавриленко Т.В., Баженова А.Е., Балтикова А.А., Башкатова Ю.В., Майстренко Е.В. Метод многомерных фазовых пространств в оценке хаотической динамики тремора // Вестник новых медицинских технологий – 2013. – №1. – с. 5
10. Логинов С.И., Ветошников А.Ю., Кинтюхин А.С., Снигирев А.С. Биомеханическое исследование локомоторной активности человека с помощью датчиков регистрации движений с позиции теории хаоса и самоорганизации сложных систем // Сложность. Разум. Постнеклассика. – Сургут, 2014. – № 1. – с. 4-13.
11. Kozlov I.M., Samsonova A.V. Muscles activity control when running // 6-th International Symposium on Biomechanics in Sport. – Bozeman, Montana: Montana State University. – 1988. – p. 22.
12. Самсонова А.В., Кичайкина Н.Б., Козлов И.М. Фазовые портреты мышц // Теория и практика физической культуры – 1993. – № 1. – с. 1-3.
13. Козлов И., Муравьев В. Мышцы и спринт // Легкая атлетика. – 1992. – № 5. – с. 8-11.
14. Доронин А.М. Физические упражнения как результат активности мышц в качестве двигателя и анализатора // – Вестник Адыгейского государственного университета. – 2005. – № 1. – с. 20-32.
15. Ципин Л.Л. Применение фазового пространства для анализа мышечной активности при беге // Российский журнал биомеханики. – 2015. – Т. 19, №4 (61). – с. 421-429.
16. Воронов А.В., Доценко В.И., Титаренко К.Е., Титаренко Н.Ю., Кузнецов Д.А., Лебедев Ю.А. Методические аспекты анализа локомоций с использованием аппаратно-программного комплекса «Видеоанализ движений». [Электронный ресурс]. Режим доступа: – <http://www.ordas.ru/articles/metodicheskie-aspekty-analiza-lokomociy-s-ispolzovaniem-apparatno-programmnogo-kompleksa> (дата обращения: 31.09.2019).
17. Воронов А.В., Лемешева Ю.С. Применение трехмерной методики регистрации локомоций в видах спорта с большой длиной шага (на примере бега на коньках) // Вестник спортивной науки. – 2012. – №2. – с. 30-38.

05.13.01

**Э.С. Соколова д-р техн. наук, О.П. Тимофеева канд. техн. наук,
С.Н. Капранов канд. техн. наук**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
институт радиоэлектроники и информационных технологий,
кафедра информатики и систем управления,
Нижний Новгород, essokolowa@gmail.com

РАЗМЕЩЕНИЕ ОБЪЕКТОВ НА СЕТЕВОЙ АРХИТЕКТУРЕ С ПОМОЩЬЮ ЭВРИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

В работе рассматривается задача размещения объектов (предприятий) на уже имеющейся сетевой архитектуре (сеть клиентов). Приводится ее решение эвристическими методами оптимизации - генетическим алгоритмом и алгоритмом гравитационного поиска.

Ключевые слова: размещение объектов на сетевой архитектуре, оптимизация, эвристические алгоритмы, генетический алгоритм, алгоритм гравитационного поиска.

Введение

Решение задачи оптимального размещения объектов на сетевой архитектуре является одной из наиболее актуальных проблем оптимизации. С ростом экономических и логистических потребностей общества и производства возрастает сложность и размерность задач, что приводит к невозможности использования точных методов решения. В работе рассматривается задача квазиоптимального размещения объектов применением эвристических методов.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу размещения объектов (предприятий/поставщиков услуг) на уже имеющейся сетевой архитектуре (сеть клиентов), в которой необходимо разместить на плоскости взаимосвязанные предприятия, производящие некоторую продукцию (услуги), и соединить их с клиентами, потребляющими эту продукцию (услуги). Задача сводится к классической задаче Вебера о размещении взаимосвязанных объектов – Multifacility Weber problem (MFW) - в которой требуется разместить несколько взаимосвязанных предприятий с целью минимизации суммарных транспортных затрат как между всеми предприятиями, так и между предприятиями и клиентами [1].

Математическая постановка задачи имеет следующий вид. Дана плоскость $L = \{x: x \in R^2\}$. Пусть $J = \{1, \dots, m\}$ – множество номеров фиксированных объектов на плоскости L , $V = \{1, \dots, n\}$ – множество номеров объектов, размещаемых на той же плоскости L . Координаты фиксированного объекта с номером j обозначим $A_j = (a_j, b_j)$, $A_j \in L$, а координаты размещаемого объекта с номером i – $X_i = (x_i, y_i)$, $X_i \in L$. Удельные стоимости связей между j -м фиксированным и i -м размещаемым объектами обозначим u_{ij} , а w_{ik} – удельные стоимости связей между размещаемыми объектами i и k . Считаем, что $w_{ik} = w_{ki}$, $k \neq i$.

Пусть $d(X_i, A_j)$ – расстояние между j -м фиксированным и i -м размещаемым объектами, а $g(X_i, X_k)$ – расстояние между i -м и k -м размещаемыми объектами. Требуется разместить предприятия так, чтобы суммарная стоимость связей между всеми объектами была минимальной:

$$\sum_{i \in V} \sum_{k \in V} w_{ik} \cdot g(X_i, X_k) + \sum_{i \in V} \sum_{j \in J} u_{ij} \cdot d(X_i, A_j) \rightarrow \min.$$

Для евклидовой метрики задача записывается следующим образом:

$$\sum_{i \in V} \sum_{k \in V} w_{ik} \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in J} u_{ij} \sqrt{(x_i - a_j)^2 + (y_i - b_j)^2} \rightarrow \min_{x, y}$$

Геометрическая интерпретация задачи представлена на рисунке 1.

Особенность эвристических алгоритмов состоит в получении более высокой средней приспособленности нового поколения по сравнению с приспособленностью предыдущего поколения. Приспособленность каждого агента (решения) популяции определяется фитнес-функцией алгоритма (значением целевой функции для данного решения).

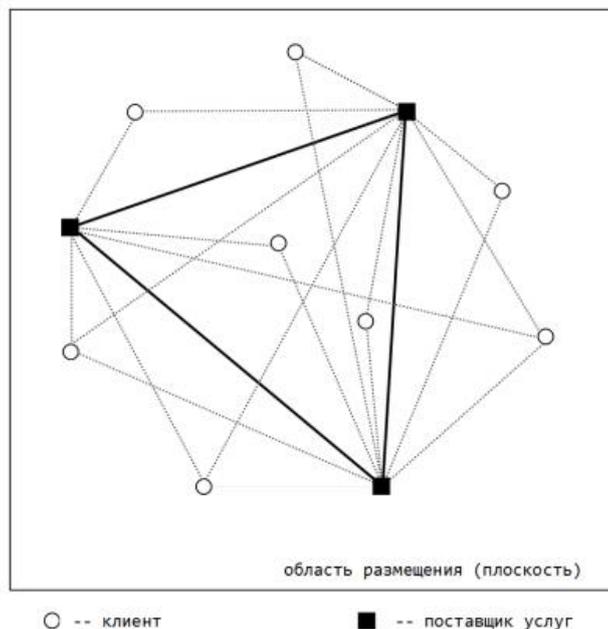


Рис. 1- Геометрическая интерпретация задачи

Общая схема применения эвристических алгоритмов имеет вид:

- Инициализация популяции в множестве допустимых решений. Каждый агент популяции представляет собой возможное решение задачи.
- Фитнес-оценка приспособленности каждого агента популяции – расчет целевой функции для каждого решения, определение агентов с наилучшими значениями фитнес-оценки.
- Перемещение агентов (создание новой популяции) в сторону улучшения показателей фитнес-функции до достижения требуемого критерия остановки алгоритма.

Для применения эвристических алгоритмов к решению задачи размещения объектов на сетевой архитектуре определим характеристики агента популяции. Для рассматриваемых алгоритмов координаты позиции агента будут соответствовать возможному решению из множества допустимых решений в заданной области поиска [2].

Координаты l -го агента популяции P_l представляют собой вектор размерности $n \cdot d$, где n – число размещаемых объектов (поставщиков), а d – размерность пространства ($d = 2$, т.к. решение производим на плоскости). Область поиска D по каждой координате вектора-решения ограничивается координатами фиксированных объектов: по каждой размерности пространства области размещения L_d минимальным и максимальным значением соответствующих координат фиксированных объектов.

$$\begin{aligned}
 P_l &= (p_l^1, \dots, p_l^n), \quad l = \overline{1, N}, \\
 p_l^h &= (g_1, \dots, g_d), \quad p_l^h \in L, \\
 \min(A^s) &\leq g_s \leq \max(A^s), \quad s = \overline{1, d},
 \end{aligned}$$

где P_l координаты l -го агента популяции; N – число агентов популяции; p_l^h – h -й элемент вектора P_l , представляет собой вектор из d координат h -го размещаемого объекта (поставщика); L – область размещения; g_s – s -й элемент вектора p_l^h – координата h -го размещаемого объекта (поставщика) в s -м измерении; A – множество координат фиксированных объектов (клиентов); $\min(A^s)$ и $\max(A^s)$ – минимальное и максимальное значения координаты s -й размерности среди элементов множества A .

Применение генетического алгоритма для задачи размещения

В основе генетического алгоритма (ГА) лежат механизмы, аналогичные процессам естественного отбора в природе: наследование, мутация, отбор и кроссинговер. Агент алгоритма представляется в виде «хромосомы» - структуры, содержащей информацию, характеризующую приспособленность данной особи и память о его предках [2].

Для решения задачи размещения объектов на сетевой архитектуре был выбран вещественный способ кодирования хромосомы. Вектор варьируемых параметров X (хромосому) соответствующего агента s обозначим следующим образом:

$$H = (H_i^g, i \in [1:|X|]),$$

где H_i^g – код компоненты x_i вектора X ; i – номер локуса (позиции, в которой находится ген). Аллель гена H_i^g является совокупностью всех возможных значений величины x_i . При вещественном кодировании гены представляются в виде вещественных чисел напрямую, т.е. каждый ген $H_i^g = x_i$. Размер такого вектора равен $(n \cdot dim)$, где n – число размещаемых предприятий, dim – число измерений пространства.

Операторы генетического алгоритма для решения рассматриваемой задачи были подобраны следующим образом:

– Оператор отбора - метод рулетки, заключается в генерации линии, состоящей из отрезков, характеризующих особей-родителей, длина такого отрезка пропорциональна приспособленности данной особи (её отмасштабированному значению). Вдоль такой линии осуществляются шаги равной длины. Родителем назначается особь, соответствующая отрезку, на котором остановился шаг.

– Оператор скрещивания – бинарный, производит обмен битами или аллелями между хромосомами-родителями, не учитывая их фенотип.

– Оператор мутации – вещественный, заменяет ген x_i на ген x_i' , $i \in [1:|X|]$.

Применение гравитационного алгоритма для задачи размещения

Алгоритм гравитационного поиска использует аналогию движения тяжелых тел вследствие их гравитационного взаимодействия [2]. Все агенты притягивают друг друга с помощью силы гравитации, вызывающей глобальное движение популяции к агентам с более тяжёлыми массами. Позиция агента с наибольшей массой соответствует оптимальному решению в пространстве поиска.

Популяцию агентов эвристического алгоритма можно представить как изолированную систему материальных точек, подчиняющихся законам физики. Для каждого агента определяются координаты его положения в пространстве. Фитнесс-оценку можно определить как массу данной точки: чем лучше показатель фитнесс-оценки, тем больше масса данного тела. Такие точки под воздействием сил притяжения перемещаются в пространстве. Суперпозиция такой силы вызывает глобальное перемещение всей популяции к агентам большей массы, соответствующим наилучшим решениям. Таким образом, агенты, обладающие большей массой, движутся медленнее, чем более лёгкие, соответствующие худшим решениям. Такое движение обеспечивает итеративность алгоритма. Масса агента представляет собой «сообщение» о значении целевой функции в данной точке пространства поиска, транслируемое другим агентам популяции через воздействие силы гравитации.

Каждый агент обладает 4-мя характеристиками: координатами положения в пространстве поиска и 3-мя видами масс (активная, пассивная и инертная). С каждой итерацией алгоритма агенты, обладающие большей массой, стягивают к себе агентов меньших масс, обеспечивая сходимость алгоритма. Для предотвращения преждевременной сходимости алгоритма и повышения качества диверсификации поиска производится регулирование скоростей перемещения агентов с помощью перерасчётов параметра G , путем сокращения скорости агентов с увеличением числа итераций, и добавления в вычисления случайной составляющей.

Координаты агента i , являющегося одним из возможных решений задачи, представляются вектором:

$$X_i = (x_i^1, \dots, x_i^k, \dots, x_i^n), \quad i = \overline{1, N},$$

где N – число агентов популяции, x_i^k – координата i -го агента в k -м измерении, n – размерность задачи.

Гравитационное взаимодействие между агентами i и j в k -м измерении рассчитывается по модифицированному закону всемирного тяготения:

$$F_{ij}^k(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \cdot M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} (x_j^k(t) - x_i^k(t)), \quad i, j \in [1: N], i \neq j, k \in [1: n],$$

где $G(t)$ – гравитационная постоянная в момент времени t ; M_{pi} – пассивная гравитационная масса агента i ; M_{aj} – активная гравитационная масса агента j ; ε - малая константа (машинный ноль); $R_{ij}(t)$ – евклидово расстояние между агентами i и j ; $x_i^k(t), x_j^k(t)$ – координаты агентов i и j по k -му измерению; N – число агентов популяции; n – размерность задачи, число измерений пространства.

Результаты решения задачи размещения

Для получения решения задачи размещения объектов на сетевой архитектуре была выполнена реализация рассмотренных эвристических алгоритмов на языке программирования *Matlab* и проведены экспериментальные вычисления для задачи размещения малой, средней и большой размерности [3]. Параметры задач приведены в таблице 1.

Таблица 1- Типы задач размещения

Тип задачи	Число объектов размещения (предприятий), n	Число фиксированных объектов (клиентов), m	Ограничения на область размещения, $d=2$
Малая размерность, 1	10	30	$0 \leq x \leq 50$ $0 \leq y \leq 50$
Средняя размерность, 2	100	300	$0 \leq x \leq 500$ $0 \leq y \leq 500$
Большая размерность, 3	1000	3000	$0 \leq x \leq 5000$ $0 \leq y \leq 5000$

Значения свободных параметров алгоритмов подбирались эмпирически. В таблице 2 приведены рекомендуемые значения размерности популяции и числа итераций, а также соответствующие им значения целевой функции и времени работы алгоритмов. Эти данные являются наилучшими результатами работы рассмотренных эвристических алгоритмов для задач указанной размерности.

Таблица 2- Результаты решения задачи размещения

Тип задачи	Генетический алгоритм				Алгоритм гравитационного поиска			
	Число агентов, N , шт	Число итераций, $ITER$	Знач. фитнес-функции, у.е.	Время работы, с	Число агентов, N , шт	Число итераций, $ITER$	Знач. фитнес-функции, у.е.	Время работы, с
1	70	200	$2,5 \cdot 10^5$	11,24	200	10	$2,5 \cdot 10^5$	12,51
2	500	1000	$3,1 \cdot 10^8$	190,17	1000	70	$2,9 \cdot 10^8$	325,14
3	5000	200	$4,3 \cdot 10^{11}$	3639,5	1000	20	$4,2 \cdot 10^{11}$	15400

Таким образом, ГА показывает лучшие по значению целевой функции результаты. Алгоритм гравитационного поиска подтверждает эффективность его применения, показывая лучшие результаты по точности решения по сравнению с ГА, но требует больших временных затрат.

Выводы

Решена задача размещения объектов на сетевой архитектуре, содержащей большое число фиксированных объектов эвристическими методами: генетическим алгоритмом и алгоритмом гравитационного поиска. Полученные результаты подтвердили целесообразность применения эвристических методов для решения задач размещения.

Список литературы

1. *Шангин Р.Э.* Разработка и анализ алгоритмов решения задачи размещения графа: дис.канд. физ.-мат. Наук. - Челябинск, 2015.- 116с.
2. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновлённые природой: учебное пособие / А. П. Карпенко. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 446 с., с.:ил.
3. *Тимофеева О.П., Кувшинова Е.А.* Сравнительный анализ эффективности применения эвристических алгоритмов для решения задачи Вебера // Информационные системы и технологии. ИСТ-2019: тезисы докл. Междунар.науч.-техн.конф. – Н. Новгород, 2019. – С.627-633.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ (05.13.06)**

05.13.06

И.В. Афанасьева

Казанский национальный технический университет им. А.Н. Туполева,
Кафедра лазерных технологий,
ООО «Ифин»,
Казань, irennjj@gmail.com

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ПРОЦЕССА СПИРАЛЬНОГО
ОРЕБРЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКОЙ И ЛАЗЕРОМ**

В работе осуществлено сравнение технических и экономических показателей процессов оребрения высокочастотной сваркой (токами высокой частоты) и лазером. Описано сравнение установки высокочастотной сварки и способ модернизации для лазерной сварки. Приведена оценка характеристик процесса привара с точки зрения скорости, постоянных и переменных издержек. Обоснован объем продукции и соответствующий срок окупаемости применения лазерной сварки относительно использования метода привара токами высокой частоты.

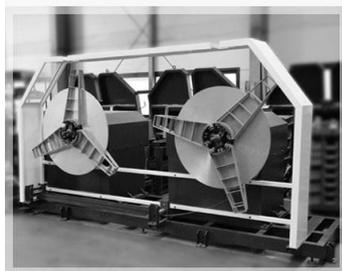
Ключевые слова: *высокочастотная сварка, лазер, оребрение.*

Технология оребрения теплообменных аппаратов токами высокой частоты приобрела наибольшую популярность среди остальных методов получения развитой поверхности. За счет массового спроса на такие теплообменные аппараты, многие производители начали задаваться вопросами о модернизации оборудования, интенсификации теплообмена, энергосбережения и уменьшения времени оребрения, затрачиваемого на единицу трубы. Решения, которых могут со временем привести к заметному энергетическому и экономическому эффекту.

Из-за потерь электроэнергии, а также долгого процесса сварки наиболее приоритетным является замена нескольких частей установки спирального оребрения труб токами высокой частоты (ТВЧ). В этой связи появляется вопрос об окупаемости такого плана действий. По этой причине ставится задача сопоставления технико-экономических параметров высокочастотной сварочной установки, Рис.1-3, и 3 кВт лазера. Поэтому в работе сравниваются потребляемая мощность (электроэнергия), экономические составляющие, берется во внимание стоимость, в которую обходится оребрение 1 метра теплообменного аппарата.

Оребрение высокочастотной сваркой является самым распространенным и универсальным методом интенсификации поверхности теплообменного аппарата. Используются два основных высокочастотных сварочных оборудования, реализующих спиральное оребрение теплообменных аппаратов, – это ACOT-2M и HANSUNG корейского происхождения.

Рассмотрим краткое описание основных блоков HANSUNG сварочного оборудования спирального оребрения [1], представленного на Рис.1-3:



а



б



в



г



д



е

Рис. 1– Подготовительные модули сварочной установки для спирального оребрения труб: а – устройство размотки, б – стяжатель, в – входной рольганг, г – высекатель зубчиков, д – шлифовальный станок, е – вытягивающее устройство [1]

Металлическая лента с устройства размотки (Рис.1а) направляется в основную линию установки, пройдя через направляющие ролики, систему натяжения ленты (Рис.1б) и шлифовальный станок (Рис.1д) для зачистки и подготовки поверхности перед сваркой.

Несущая труба подается на входной рольганг (Рис.1в), и направляется в вытягивающее устройство (Рис.1е), при помощи которого настраивают заданный шаг оребрения, и регулируют вращение трубы. При необходимости лента проходит через высекатель (Рис.1г) для ее просечки [2]. Далее лента заправляется в прижимной ролик и механически прикрепляется к трубе.

В сварочном модуле (Рис.2) к трубе и ленте подводят контактные токопроводы.

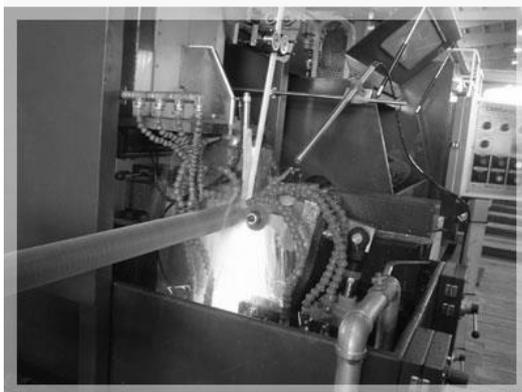


Рис. 2– Сварочный модуль с высокочастотным индукционным сварочным агрегатом 450 кГц [1]

С помощью токопроводов подключаются привод вращения трубы и высокочастотный трансформатор. Затем начинается процесс спирального оребрения. Процесс сварки в данной компоновке [1] сопровождается системой охлаждения и системой стабилизации.



а



б



в

Рис. 3– Постсварочные модули установки: а – функциональный блок, б – выходной рольганг, в – антикоррозионная система [1]

После завершения сварки лента автоматически отрезается, и оребренная труба сбрасывается на выходной рольганг (Рис.3б), затем, полученный теплообменный аппарат, проходит антикоррозионную систему обработки (Рис.3в). Стоит отметить, что сварочная установка для спирального оребрения труб настраивается через функциональный блок (Рис.3а), который представляет собой сенсорную панель, отображающую сообщения об ошибках и данные, о процессах.

В качестве лазерной системы приведем в пример непрерывный иттербиевый лазер YLS-3000-SM производства IPG Photonics [3], мощностью 3 кВт, длиной волны 1070 нм и с частотой модуляции 0-5 кГц.

При спиральном оребрении теплообменных аппаратов лазером в сварочной установке необходимо заменить центральный блок – сварочный модуль с высокочастотным индукционным агрегатом, Рис.2. Остальные подготовительные и постсварочные модули в составе сварочной установки для спирального оребрения труб следует использовать по-прежнему.

Анализ технико-экономических составляющих высокочастотной и лазерной установок

Для анализа необходимо рассчитать стоимость получаемого шва при помощи ТВЧ и лазерной установок. Для этого необходимы значения подаваемой и затрачиваемой мощности установки для производства 1 метра трубы. Наряду с этим, могут применяться различные материалы и технические параметры.

Для начала рассчитаем скорость оребрения по шву:

$$V_{\text{ореб.по шву}} = 2\pi RN_{\text{сек}} \tag{1}$$

Где N – количество оборотов трубы, R – радиус трубы.

За шаг оребрения I возьмем среднее значение между 2.8 мм и 25.4 мм.

Затем рассчитаем скорость оребрения одного шага:

$$V_L = I * N_{\text{сек}} \tag{2}$$

Затрачиваемую мощность P на 1 метр трубы рассчитываем по формуле:

$$P = \frac{N}{I * N_{\text{мин}} * 60} \tag{3}$$

Далее можно перейти к оценке стоимости шва. За основу взяты среднестатистические данные на затраченную электроэнергию [4], для юридических лиц за 1 кВт/час по одноставочному тарифу в Республике Татарстан. Пересчитав данные, получили количество потребляемой электроэнергии при использовании метода ТВЧ на единицу длины по шву (или на 1 метр трубы).

Расчетные данные представлены в Таблице 1.

Таблица 1– Техничко-экономические составляющие установки ТВЧ и лазера

	Установка ТВЧ	Лазер
N час, обор./минуту		300 об./мин
N сек, обор./сек		5 об./сек
R трубы, m		0.02 м
V ореб. по шву		0.63 м/сек
V ореб. по шву, в мин		37.68 м/мин
I шаг оребрения		0.0141 м
V_L ореб. сек		0.0705 м/сек
V_L ореб мин		4.23 м/мин
V_L ореб час		253.8 м/час
P , потребляемая мощность	264 кВт/час	3 кВт/час
Потребляемая мощность на 1 м трубы	1.04018 кВт	0.01182 кВт
Тариф за 1 кВт/час		3.75 руб./кВт*ч
Цена за электроэнергию на 1 м трубы	3.90067 руб.	0.04432 руб.

Отталкиваясь от произведенных расчетов, видим, что потребляемая мощность орбления одного метра трубы высокочастотной установкой на порядок больше, чем при использовании лазера.

Далее в Таблице 2 представлены постоянные и переменные издержки в части обслуживания и замены блоков сварки для ТВЧ и лазерного орбления.

Таблица 2– Характеристики оборудования

№ п/п	Наименование показателей	ТВЧ	Лазер
1.	Гарантийный срок	3 года	10 лет
2	Срок службы модуля сварки	Не менее 10 лет	Не менее 15 лет
3	Стоимость обслуживания		
	Постоянные, в \$ тыс.	4 000	11 000
	Постоянные издержки, в руб.	260 000	715 000
	Переменные издержки, в руб./м	3.90067	0.04432
	Скорость орбления, м/час	253.8	

Для того чтобы рассчитать разницу в стоимости между установкой ТВЧ и лазера, использовали сумму затрачиваемых средств. С этой целью на каждые 500 метров орбренной трубы суммировали постоянные и переменные издержки для ТВЧ. Аналогичным образом получили данные для лазера. При этом, остальные затраты считали равными для ТВЧ и лазера. Затем, построили график зависимости разности затраченных средств между ТВЧ и лазером к метражу орбренной трубы, Рис.4.

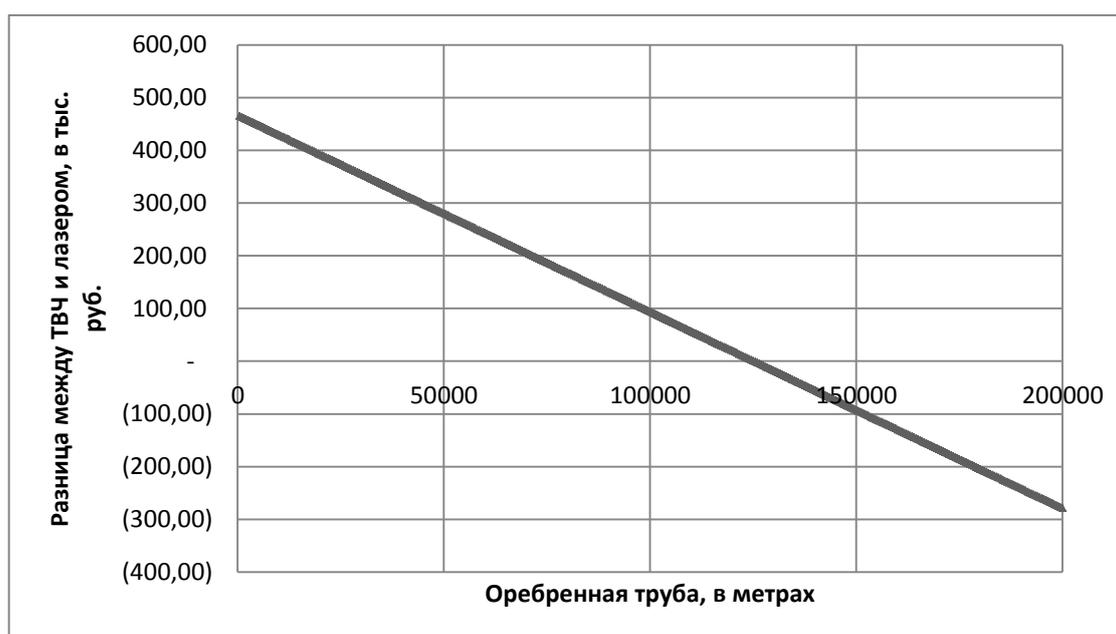


Рис. 4– График зависимости разности издержек между ТВЧ и лазером к метражу орбренной трубы

Затраты с использованием ТВЧ и лазера сравниваются при орбрении 125 000 метров трубы. Исходя из скорости в 253.8 метров в час, это составляет 492.51 часа непрерывной работы обоих типов процессов. Если взять режим работы в 3 смены, то эта величина времени равна 20 дням работы, что составляет менее 1 стандартного рабочего месяца.

Выводы

1. Определены технические параметры процессов оребрения с помощью установки ТВЧ и лазера. Полученные данные говорят о большом влиянии использованной электроэнергии на себестоимость оребренной трубы.

2. При использовании лазера значительно увеличиваются основные затраты, относительно переменных. Однако при использовании сварочного модуля увеличиваются переменные издержки. По этой причине замена сварочного модуля лазером уменьшит затраты на единицу оребренной длины.

Таким образом, при одинаковых технических параметрах в начальных условиях, экономически целесообразнее использовать лазер, окупаемость измеряется на уровне порядка 500 машино-часов. При этом появляется принципиальная возможность оребрять разнородные материалы, использование лазера имеет потенциал увеличения скорости оребрения, а качество шва оценивается на высоком уровне.

Благодарности

Данная работа выполнена в рамках Государственного контракта №3003ГС1/45342 от 02.04.2019 г. с Фондом Содействия Инновациям и Договора целевого финансирования № N13/81/2019 от 24.04.2019 г. с НО «ИВФ РТ»

Список литературы

1. *Hunsung H.F* URL: www.hshf.co.kr/welding-part.html.
2. *Афанасьева И.В.* Перспективные методы оребрения теплообменных аппаратов. Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 7 – С. 114-121. URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=37599>
3. Иттербиевые одномодовые непрерывные системы / [Электронный ресурс] URL: www.ipgphotonics.com/ru/products/lasers/neprieryvnye-lazery-vysokoymoshchnosti/1-mikron/yls-sm-110-kvt.
4. Постановление Государственного комитета Республики Татарстан по тарифам от 14.12.2018 №3-11/э «Об установлении цен (тарифов) на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей Республики Татарстан на 2019 год».

05.13.06

Е.П. Зеленецкая, А.Г. Горюнов д-р техн. наук

Томский политехнический университет,
инженерная школа ядерных технологий,
отделение ядерно-топливного цикла,
Томск, zeka@tpu.ru

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСТРАКЦИОННЫМ БЛОКОМ АФФИНАЖНОГО СТЕНДА

В работе рассмотрены результаты исследования работы систем управления экстракционным блоком посредством компьютерного моделирования. Приведено скорректированное математическое описание узлов, входящих в экстракционный блок аффинажного стенда. Представлены результаты, подтверждающие возможность распределения системы управления на часть экстракционного блока без снижения качества извлекаемых ядерных материалов.

Ключевые слова: *экстракционный блок, система управления, математическая модель, ядерная безопасность, компьютерная модель.*

В рамках проекта «ПРОРЫВ», направленного на замыкание ядерного топливного цикла, на площадке ОАО «СХК» реализуется аффинажный стенд по пристанционной переработке отработанного уран-плутониевого ядерного топлива (ОЯТ) с реакторных установок на быстрых нейтронах (БН). Несмотря на отработанность технологических процессов жидкостной экстракции, переработка высокоактивного ОЯТ с установок БН привела к необходимости выполнения работ по созданию экстракционных технологий нового поколения с последующим их внедрением на аффинажном стенде. В силу ядерной опасности производства, экспериментальные исследования необходимо проводить на моделях, в том числе с привлечением аппарата математического и компьютерного моделирования.

Одним из значимых технологических узлов реализуемого аффинажного стенда являются экстракционные каскады, объединённые в технологические узлы – экстракционные блоки (БЭ), обеспечивающие очистку целевых компонентов, таких как уран, плутоний, нептуний и др. от осколков деления. Элементарной единицей каскадов являются центробежные экстракторы (ЦЭ) ядерно-безопасного исполнения, которые обеспечивают малое время контакта фаз, что обеспечивает значительное снижение радиационной нагрузки на экстрагенты. Но при этом возникает необходимость в контроле и управлении потоков с микрорасходами, что весьма затруднительно.

В настоящей момент существуют различные схемы экстракционного аффинажа, представленные специалистами НПО «Радиевый институт им Хлопина» и ОАО «ВНИИНМ» им. Бочвара [1–3]. В связи с этим было принято решение разработать универсальный БЭ позволяющей без вмешательства в программный код, оперативно вносить изменения в параметры технологических процессов, структуры технологических узлов и потоков, и осуществлять синтез промышленных систем автоматического управления, в целях обеспечения высокой степени извлечения целевых компонентов из растворов, содержащих делящиеся материалы.

В основу модели имитирующей работу БЭ была заложена математическая модель, описывающая работу каждой элементарной единицы каскада в динамическом режиме. Структура, математическое описание и допущения, имеющиеся в модели, подробно представлены в работе [4]. В процессе исследований, а также основываясь на подходах, представленных в [5 – 7], разработанная модель была скорректирована. Так в модели выполняется оценка влияния изменения параметров образующегося эмульсионного слоя на

процесс массопереноса в БЭ. На основе результатов исследований, представленных в работе [8], был выбран оптимальный режим работы ЦЭ в рамках обеспечения устойчивости эмульсионного слоя и, как следствии обеспечения высокой степени извлечения целевых компонент. Помимо этого, был произведён учет возможного захвата целевых компонент какой-либо из фаз в виде:

$$\begin{cases} \frac{d[C_i^x(t)]}{dt} = \frac{k^2 \cdot V_s \cdot (C_{in,i}^x(t) - C_{f,i}^x(t))}{(Q_{s,f}^x + Q_{s,f}^y)} \pm g \frac{\Delta C_i^y(t)}{T_p^x} \\ \frac{d[C_i^y(t)]}{dt} = \frac{k^2 \cdot V_s \cdot (C_{in,i}^y(t) - C_{f,i}^y(t))}{(Q_{s,f}^x + Q_{s,f}^y)} \mp g \frac{\Delta C_i^x(t)}{T_p^x} \end{cases} \quad (1)$$

где $C_{in,i}^x$ и $C_{in,i}^y$ – концентрации i-го компонента в дисперсной и сплошной фазе соответственно, на входе в камеру разделения; $C_{f,i}^x$ и $C_{f,i}^y$ – концентрации i-го компонента в дисперсной и сплошной фазе соответственно, на выходе камеры разделения; k – поправочный коэффициент, $Q_{s,f}^x$ и $Q_{s,f}^y$ – объемные расходы дисперсной и сплошной фазы на выходе камеры смешения соответственно, g – коэффициент уноса. Помимо этого, в усовершенствованной модели происходит перерасчет значений равновесных концентраций целевых компонент на каждом шаге вычислений. Целесообразность в оценке возможного захвата целевых компонент одной из фаз подтверждается исследованиями, проводимыми НПО «Радиевый институт им. Хлопина» [1, 2].

Максимальная концентрация целевых компонент в конечном продукте является ключевым моментом в процессе экстракционного аффинажа, поэтому необходимо разработать такую систему автоматического управления (САУ), функционирование которой позволяла бы обеспечить стабильное извлечение целевых компонент из растворов по всему БЭ. Учитывая требования, накладываемые на контрольно-измерительные приборы, системы диагностики и контроля, особенности и опасность производства, приняли решение использовать подход, применяемый в технологических процессах, построенных на колонных экстракторах. То есть САУ проектируется лишь на один или группу аппаратов, входящих в технологическую цепочку, таким образом, чтоб синтезируемый алгоритм управления обеспечивал требуемое качество всего технологического узла. Для этого выделим в диагностируемой экстракционной схеме, состоящей из 9 ступеней, три точки контроля, условно разделив БЭ на три равные части, получая тем самым три независимых объекта управления. Проведя идентификацию, каждого из объектов, получили параметры, данные которых представлены в таблице 1, где σ – среднеквадратичное отклонение.

Таблица 1 – Параметры объектов управления

№ точки контроля	$K_{об}$	T_1, c	T_2, c	τ, c	$\sigma, \%$
1	0.045	460	50	45	3
2	32.2	480	50	18	5
3	355	460	40	4	0.45

Для управления БЭ предложена одноконтурная САУ для каждой из точек контроля, функциональная схема которой представлена на рисунке 1.

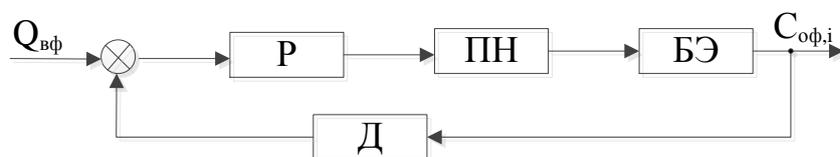


Рис. 1 – Функциональная схема САУ: Р – регулятор, ПН – перистальтический насос, БЭ – экстракционный блок, Д – датчик

При синтезе регуляторов для каждой из точек контроля, настройки параметров регуляторов рассчитывали по методам Номура, Жуана и Атертона, а также Мурила [9, 10]. Основываясь на анализе переходных процессов, синтезированных САУ, получили, что наилучшими показателями качества для первой точки контроля обеспечит ПИД-регулятор, для второй и третьей точек – ПИ-регулятор параметры, настройки которых определены по методу Жуана и Атертона.

Проводя диагностику синтезированных САУ на полной модели БЭ, варьировали значения расхода органической фазы и значений концентрации целевых компонент в пределах –10% от исходного значения. Реакции системы представлены на рисунках 2 и 3 соответственно.

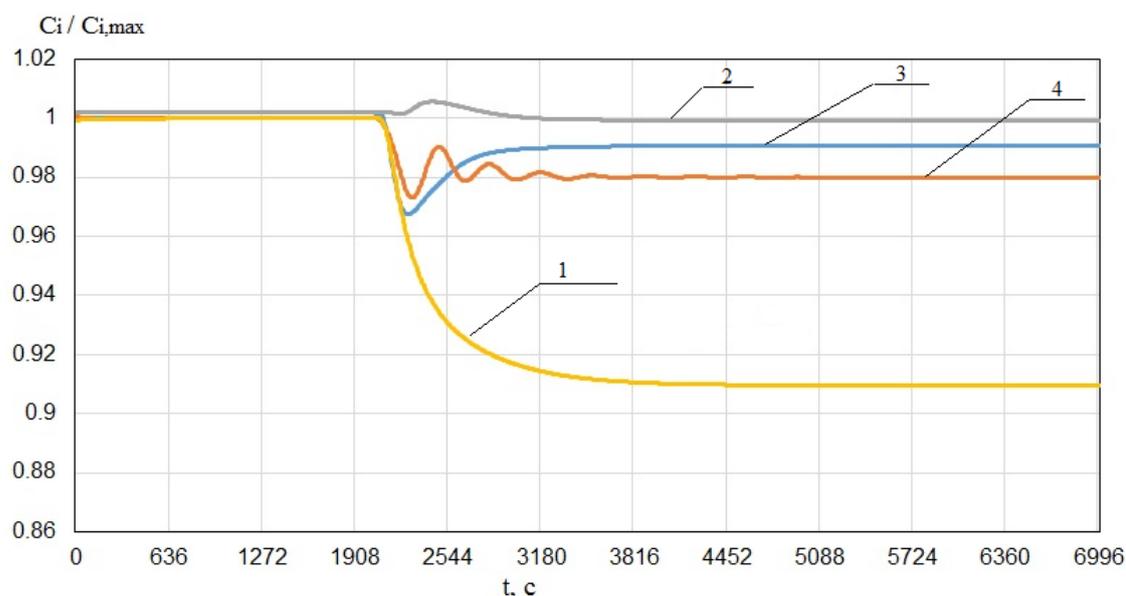


Рис. 2 – Переходные процессы БЭ при изменении значения расхода органической фазы на –10%: 1 – система без САУ, 2 – по второй точке контроля, 3 – по первой точке контроля, 4 – по третьей точке контроля

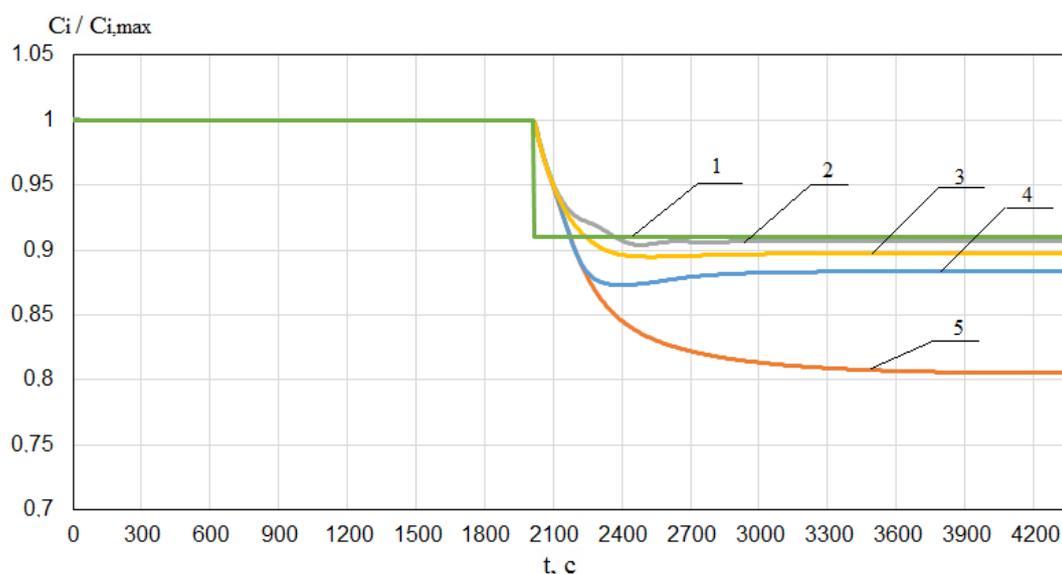


Рис. 3 – Переходные процессы БЭ при изменении значения концентрации целевого компонента на –10%: 1 – концентрация целевого компонента в растворе, 2 – по второй точке контроля, 3 – по третьей точке контроля, 4 – по первой точке контроля, 5 – система без САУ

Так же в ходе диагностики работы системы проведена оценка влияния вносимых возмущений на профиль концентрационного распределения по блоку, результаты которой представлены на рисунке 4.

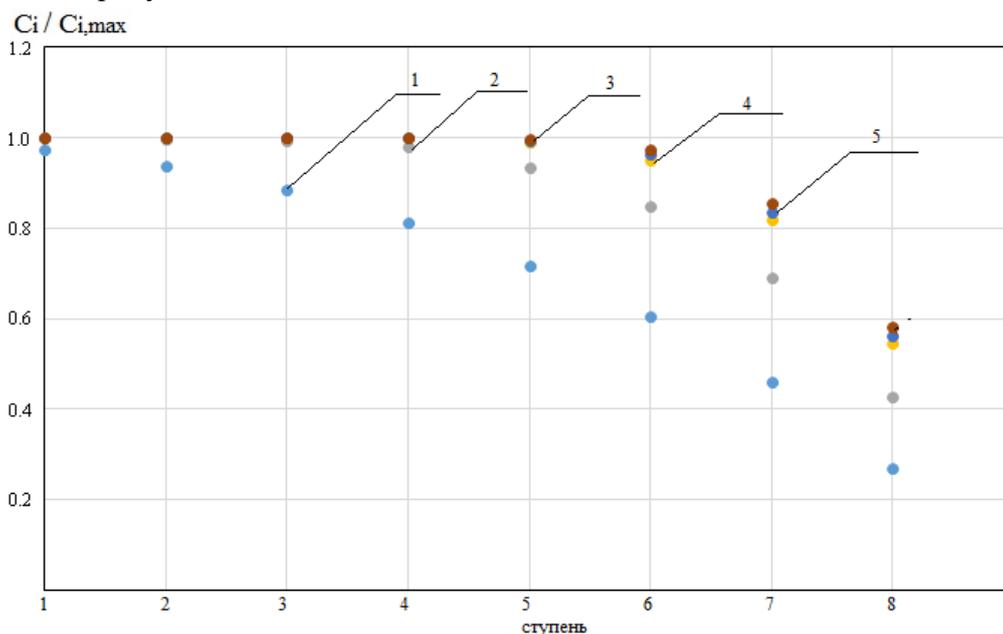


Рис. 4 – Профиль распределения концентрации по ступеням БЭ: 1 – система без САУ, 2 – по первой точке контроля, 3 – исходное значение концентрации, 4 – по второй точке контроля, 5 – по третьей точке контроля

Из вышеприведённых данных видно, что САУ, охватывающая две третьих каскада (вторая точка контроля) обеспечивает требуемое качество извлечения целевых компонент из высокоактивных растворов.

Выполняя те же самые действия применительно к БЭ реализующему процесс резэкстракции плутония, получили схожие результаты. Выравнивание профиля концентрационного распределения целевого компонента по БЭ с учетом требуемых показателей качества, обеспечивается введением точки контроля, начиная с середины каскада. При реализации САУ в середине БЭ значение приведённой погрешности по каналу управления и возмущения составила 4% и 3% соответственно.

Компьютерные модели БЭ и системы управления внедрены в программное обеспечение «КОД ТП», используемый научными коллективами разработчиков новых экстракционных технологий, для диагностики и оптимизации экспериментального оборудования.

Список литературы

1. Зильберман Б.Я. [и др.] Исследование запредельного режима экстракции в Пурекс-процессе. 2. Эксперименты по распределению Pu и U в запредельном режиме работы головного экстрактора // *Радиохимия*. – 2001. – Т. 43. – №6. – С. 501-505.
2. Puzikov E.A. [et al.] Mathematical modeling of extraction of nitric acid, actinides, and fission products into 30% TBP in halogenated diluents using A.M. Rozen's model // *Radiochemistry*. – 2017. – Vol. 59. – P. 143-151.
3. Shmidt O.V. [et al.] Simulation of closed nuclear fuel cycle processes as a tool for the development and optimization of radiochemical technologies // *Radiochemistry*. – 2016. – Vol. 58. – P. 366-373.
4. Zelenetskaya E.P., Goryunov A.G., Daneikina N.V. Model of mass transfer processes in the cascade of centrifugal extractors // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 135: – doi:10.1088/1757-899X/135/1/012053.
5. Горюнов А.Г. Динамическая модель неравновесного многокомпонентного экстракционного процесса в смесительной камере центробежного экстрактора // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2011. – №4. – С. 129-132.
6. Кузнецов Г.И., Пушков А.А., Косогоров А.В., *Центробежные Экстракторы Центрэк*, М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2013. – 214 с.
7. Ганджа Т.В., Формализованное представление обобщенного технически сложного объекта с компьютерной моделью в контуре управления // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2012. – № 2. – С. 29-35.
8. Серенко А.А., Зеленецкая Е.П., Исследование процесса образования эмульсионного слоя в центробежном экстракторе // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2018. – № 5(71). – С. 32-37. – ISSN 2227-6017
9. O'Dwyer A., *Handbook of PI and PID controller tuning rules*. – World Scientific, 2006. – 360 p.
10. Zhuang M., Atherton D.P., *Automatic tuning of optimum PID controllers* // *IEE Proceedings D (Control Theory and Applications)*. – IET Digital Library, 1993. – Vol. 140. – №. 3. – P. 216–224.

05.13.06

А.А. Медведев, Н.Е. Конева канд. техн. наук

Московский политехнический университет,
кафедра «Автоматика и управление»,
Москва, nikus032003@rambler.ru, n.koneva21@mail.ru

АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ТВЭЛОВ

В статье рассмотрены известные методы контроля герметичности изделий и рекомендован оптимальный метод для проверки ТВЭЛОВ (тепловыделяющих элементов), используемых в качестве топлива для ядерных реакторов. Указывается, что в ядерной отрасли к безопасности предъявляются высокие требования, поэтому метод течеискания должен иметь наибольшую чувствительность, при этом контролируемая среда должна иметь необходимые параметры.

Ключевые слова: герметичность, ТВЭЛ, целостность изделий, течеискание, методы контроля целостности, ядерная безопасность.

Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ) — главный конструктивный элемент активной зоны гетерогенного ядерного реактора, содержащий ядерное топливо. В ТВЭЛах происходит деление тяжелых ядер ^{235}U , ^{239}Pu или ^{233}U , сопровождающееся выделением тепловой энергии, которая затем передается теплоносителю. ТВЭЛы состоят из топливного сердечника, оболочки и концевых деталей. Модель ТВЭЛа определяется типом и назначением реактора, параметрами теплоносителя. ТВЭЛ должен обеспечить надежный отвод тепла от топлива к теплоносителю [2]. На рисунке 1 представлена конструктивная схема ТВЭЛа.

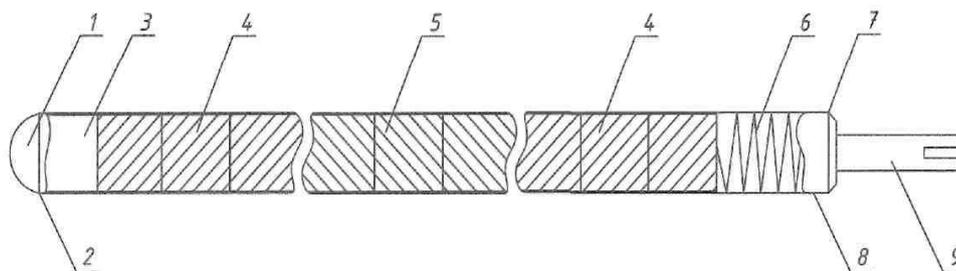


Рис. 1- Конструктивная схема ТВЭЛ

1, 9 - заглушка; 2 - первый сварочный шов; 3 - проставка; 4 - обедненная зона;
5 - обогащенная зона; 6 - фиксатор; 7 - второй сварочный шов; 8 - оболочка.

Материал оболочки ТВЭЛОВ должен обладать высокой коррозионной, эрозионной и термической стойкостью. При этом он не должен существенно изменять характер поглощения нейтронов в реакторе.

Оболочки ТВЭЛОВ в настоящее время изготавливают из сплавов алюминия, циркония, нержавеющей стали.

Для проверки на герметичность внутренняя полость ТВЭЛа заполняется контрольной средой, дополнительной функцией которой так же является улучшение теплоотвода от топлива к оболочке. Чаще всего для этого используется гелий.

В свою очередь контролируемая среда должна соответствовать следующим требованиям:

- «прозрачность» для нейтронов;
- малый коэффициент температурного расширения;
- хорошая теплопроводность.

При высокой температуре контрольная среда не должна вступать в реакцию с топливом и оболочкой ТВЭЛа.

Для учета различных коэффициентов теплового расширения материалов между керамическими сердечниками топлива и оболочкой оставляют небольшой зазор (примерно 100 мкм по радиусу), который в процессе работы в ядерном реакторе уменьшается, вплоть до полного исчезновения.

Наибольшее распространение получили цилиндрические ТВЭЛы, в которых сердечники представляют собой цилиндры диаметром порядка нескольких миллиметров и длиной до нескольких метров, внутри которых размещаются таблетки топлива.

Хорошая герметизация оболочки ТВЭЛов необходима для исключения попадания продуктов деления топлива в теплоноситель, что может повлечь распространение радиоактивных элементов за пределы активной зоны. Также, в связи с тем, что уран, плутоний и их соединения крайне химически активны, их химическая реакция с водой может привести к деформации ТВЭЛа и другим неприятным последствиям.

Для загрузки в реактор ТВЭЛы объединяются в так называемые тепловыделяющие сборки (ТВС), которые в случае твердого замедлителя размещают в специальных каналах. По этим каналам протекает теплоноситель. В реакторах с жидким замедлителем ТВС размещаются непосредственно в его объеме и направляют поток жидкости.

Герметичность ТВЭЛов

В рабочем реакторе нет возможности произвести контроль герметичности ТВЭЛа и осуществить оперативную замену. О нарушении целостности можно сказать только по косвенным признакам, таким как появление продуктов деления в теплоносителе. При этом число негерметичных ТВЭЛов связывают с активностью теплоносителя.

Количество негерметичных ТВЭЛов в реакторе ограничено правилами ядерной безопасности.

Для водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР) и реактора большой мощности канального (РБМК) дефекты типа газовой неплотности должны быть менее, чем в 1% от общего числа ТВЭЛов, а прямой контакт топлива с теплоносителем допустим менее, чем для 0.1 % от общего числа ТВЭЛов.

Для реактора на быстрых нейтронах БН эти цифры еще в пять раз меньше.

При превышении этих значений реактор необходимо остановить и устранить проблему.

После остановки реактора возможно два решения:

1. Найти дефектные ТВС без разбора реактора.
2. Найти дефектные ТВС в тракте перегрузки или бассейне выдержки (БВ) при извлечении топлива из реактора.

Первый способ предпочтительнее, т.к. выгрузкаборок без дефектов несет дополнительную экономическую нагрузку.

На работающем реакторе периодический контроль осуществляется отбором проб раз в месяц, при возникновении подозрения о негерметичности – контроль осуществляется раз в сутки.

К первому виду дефектов относятся микродефекты, газовые неплотности и маленькие трещины, через которые выходят газообразные продукты (Xe, Kr, J, Cs). Ко второму виду дефектов относятся те, при которых оболочка повреждена значительно и теплоноситель непосредственно омывает топливо.

Эти типы дефектов отличаются составом продуктов деления в теплоносителе. За время прохождения теплоносителя по контуру все короткоживущие продукты деления распадутся, а останутся только долгоживущие. При наличии непосредственного контакта топлива с теплоносителем в контур охлаждения реактора поступают как коротко живущие, так и долго живущие продукты деления. Поэтому по соотношению короткоживущих и долгоживущих продуктов судят о характере дефекта.

Радиохимический контроль производится по нескольким изотопам, которые удобно определять (обычно самый большой $T_{1/2} \sim 8$ суток для ^{131}J). Этот метод не очень хорош, так как много мелких дефектов могут создать такую же картину, как один большой [3].

Методы проверки на герметичность

Методы течеискания весьма разнообразны и существенно различаются по чувствительности, избирательной реакции на пробное вещество, принципам обнаружения утечки этого вещества, по виду используемых при реализации метода пробных веществ и т.д. [4].

Методы контроля герметичности разделяются на три группы в зависимости от вида применяемых пробных веществ:

а) газовые, при которых в качестве пробного вещества используется какой-либо газ (гелий, аргон, воздух и др.);

б) газо-гидравлические, когда в качестве пробного вещества используется газ (например, воздух), а жидкость играет роль вспомогательной среды при определении факта и места утечки газа;

в) гидравлические, при которых в качестве пробного вещества используется жидкость (например, вода, масло).

Рассмотрим более подробно методы, которые могут подойти для проверки ТВЭЛов – тепловыделяющих элементов, применяемых в качестве топлива для ядерных реакторов [1].

1. Масс-спектрометрический.

Этот метод является наилучшим по чувствительности ($1 \cdot 10^{-13}$ Па/с), активно применяется в атомной промышленности для проверки различных изделий на герметичность. Построен на принципе разделения ионов смеси газов по отношению их массы к заряду и регистрации содержания пробного газа в этой смеси. К недостаткам этого метода можно отнести необходимость создания вакуума для работы масс-спектрометрической камеры [5].

2. Галогенный.

Этот метод реализуется на базе галогенных течеискателей. Действие этих приборов основано на свойстве накаленной от 800 до 900°C пластины резко увеличивать эмиссию положительных ионов в присутствии галогеносодержащих веществ [6]. К недостаткам можно отнести более низкую чувствительность по сравнению с масс-спектрометрическим методом ($1 \cdot 10^{-8}$ Па/с).

3. Электронно-захватный.

Этот метод основан на способности молекул некоторых газов захватывать электроны, превращаясь при этом в электроотрицательные ионы. Это свойство веществ называют сродством к электрону. Оно характеризуется энергией, выделяющейся при образовании отрицательно заряженного иона. Например, сродство к электрону атомов кислорода равно 1,46 эВ, чувствительность метода ($1 \cdot 10^{-10}$ Па/с).

4. Катаро-метрический.

В данном методе используется принцип отличия теплопроводности контролируемой среды (гелий, водород, метан, хлор, углекислый газ) от теплопроводности воздуха, чувствительность метода ($1 \cdot 10^{-6}$ Па/с).

5. Оптико-акустический.

Этот метод основан на регистрации пробных веществ, молекулы которых состоят не менее, чем из двух различных атомов, избирательно поглощающих инфракрасное излучение, чувствительность метода ($1 \cdot 10^{-7}$ Па/с).

6. Акустический.

В этом методе при истечении из течи газ создает акустические колебания, которые и регистрируются оборудованием. Недостатком этого метода является необходимость большой величины потока для регистрации на уровне молекул газа. Данный метод характеризуется низкой чувствительностью ($1 \cdot 10^{-2}$ Па/с).

7. Химический.

В этом методе регистрация пробной среды осуществляется за счет химической реакции, чувствительность метода ($1 \cdot 10^{-9}$ Па/с).

8. Манометрический.

В данном методе производится измерение давления и по интенсивности его уменьшения судят о величине утечки, чувствительность метода ($1 \cdot 10^{-8}$ Па/с).

9. Пузырьковый.

Метод основан на визуальном контроле наличия пузырьков газа или жидкости при утечке. Недостатком является сложность автоматизации данного метода.

9.1. Опрессовка изделий в жидкостной ванне, чувствительность ($1,7 \cdot 10^{-6}$ Па/с).

9.2. Погружение изделий в нагретую жидкость, чувствительность ($1,5 \cdot 10^{-6}$ Па/с).

9.3. Вакуумно-жидкостный. Полый объект помещается в камеру контроля, в которой создается разрежение, внутренняя полость объекта заполняется жидкостью. В случае наличия повреждений наблюдается выделение капелек жидкости, которые хорошо видно через смотровое окно, чувствительность метода ($1,5 \cdot 10^{-7}$ Па/с).

9.4. Опрессовка с обмыливанием, чувствительность ($5 \cdot 10^{-5}$ Па/с).

10. Опрессовочный.

Метод основан на заполнении изделий жидкостью под давлением и регистрации, вытекающих через течи канала струек воды, спирта или масла. Метод мало эффективен из-за крайне малого порога чувствительности $1 \cdot 10^{-1}$ Па/с.

11. Люминесцентный.

Достаточно специфичный метод, основанный на обследовании изделия, предварительно смоченного в растворе люминофора, в лучах ртутно-кварцевой лампы и наблюдение светящихся точек в предполагаемых местах утечки жидкости, находящейся внутри объекта под избыточным давлением. В качестве рабочего вещества используется люмоген. По чувствительности ($1 \cdot 10^{-10}$ Па/с) метод близок к масс-спектрометрическому, но предполагает визуальный контроль, что делает данный метод не эффективным в автоматизированной поточной линии.

Сравнительный анализ различных методов чувствительности представлен на рисунке 2.

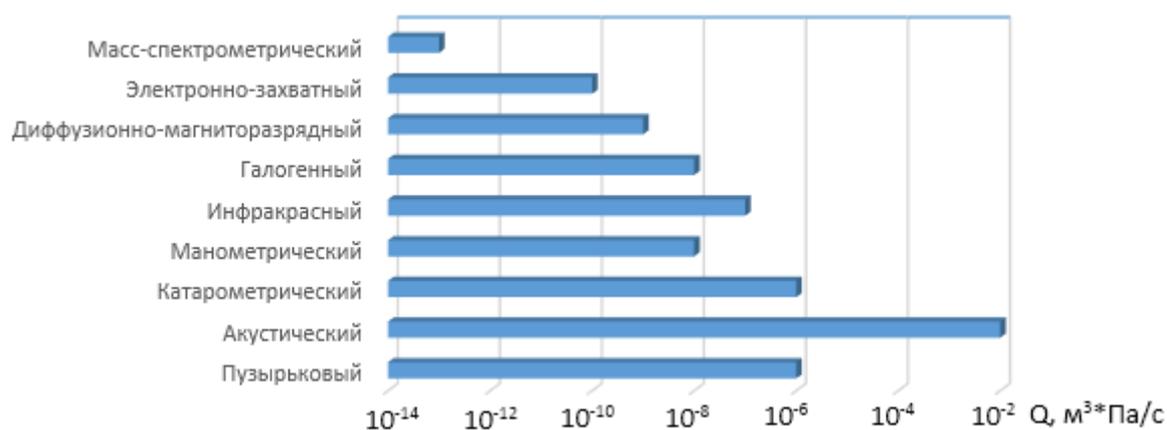


Рис. 2- Диаграмма чувствительности различных методов

Выводы

Анализ различных методов контроля герметичности ТВЭЛов позволяет выбрать в качестве наилучшего масс-спектрометрический метод, обладающий наилучшей чувствительностью ($1 \cdot 10^{-13}$ Па/с) и отвечающий всем параметрам контрольной среды.

Список литературы

1. Тюленев Л.Н., Шушерин В.В., Кузнецов А.Ю. Методы и средства измерений, испытаний и контроля. - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ УПИ, 2005 г. Ч.3.
2. Владимиров В.И. Физика ядерных реакторов: Практические задачи по их эксплуатации. - Москва: Книжный дом «Либроком», 2009 г.
3. Ансэ В.А., Колдобский А.Б., Крючков Э.Ф. и др. Физико-технические основы современной ядерной энергетики. Перспективы и экологические аспекты. - Москва: Издательский дом «Интеллект», 2014 г.
4. Методы испытания на герметичность [Электронный текст]. Вактрон - научно-производственная организация. URL: <https://vactron.ru/index.php/library/lecture/102-metody> (дата обращения: 10.05.19)
5. Гелиевый течеискатель для проверки герметичности вакуумных систем [Электронный текст]. Вакуум тест – дистрибьютор вакуумного оборудования. URL: <https://vakuumtest.ru/gelievuj-techeiskatel/> (дата обращения: 15.05.19)
6. Практика течеискания в газосветном производстве (неон) [Электронный текст]. PROFAS – продукция для наружной рекламы. URL: http://www.profas.info/index-file_id1012.htm (дата обращения: 18.05.19)

05.13.06

М.В. Овечкин канд. техн. наук

Оренбургский государственный университет,
Аэрокосмический институт,
кафедра систем автоматизации производства,
Оренбург, maхов-1@mail.ru

КОНЦЕПЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ РЕНТГЕНОГРАММ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В работе представлена концепция использования искусственной нейронной сети в рамках процесса неразрушающего контроля сварных соединений электромагнитными методами. Автоматизированное распознавание результатов контроля позволит избежать наиболее сложной и монотонной задачи – распознавания полученных рентгенограмм. В статье представлены диаграмма использования нейросетевой модели и диаграмма деятельности программиста при работе с искусственной нейронной сетью.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, радиография, распознавание рентгенограмм, диаграмма использования.

В современных условиях задачи эффективного неразрушающего контроля неразъемных соединений является важной составляющей процесса обеспечения быстрого выпуска качественной продукции машиностроительных производств. При этом, среди методов неразрушающего контроля сварных соединений, одну из лидирующих позиций занимают радиографические методы [1]. Однако, сложность эффективного применения данных методов обусловлена необходимостью адекватного распознавания результатов рентген-съемки изделий.

Наиболее широко применяемый подход к распознаванию образов – использование искусственных нейронных сетей (ИНС), поскольку задачи распознавания образов представляют собой, по существу, дискретные аналоги задач поиска оптимальных решений (дискретного программирования). К ним относится широкий класс задач, в которых по некоторой, обычно весьма разнородной, неполной, нечеткой, искаженной и косвенной информации требуется установить, обладают ли изучаемые объекты, ситуации или явления фиксированным конечным набором свойств, позволяющим отнести их к определенному классу [2].

Особенностью применения ИНС является и то, что при построении ИИС не требуется заранее знать абсолютно обо всех закономерностях исследуемой области, но необходимо располагать достаточным количеством примеров для настройки разрабатываемой системы, которая после обучения будет способна получать требуемые результаты с определенной степенью достоверности.

Таким образом, имея верно составленную и обученную сеть оператору контроля представится возможность автоматизации наиболее сложной и монотонной задачи – распознавания полученных рентгенограмм.

Представим диаграмму использования нейросетевой модели автоматизированного распознавания рентгенограмм сварных соединений излучения в виде UML-диаграммы прецедентов (рисунок 1). Так же данную диаграмму называют диаграммой использования. Для построения диаграммы использован online-сервис Creately.

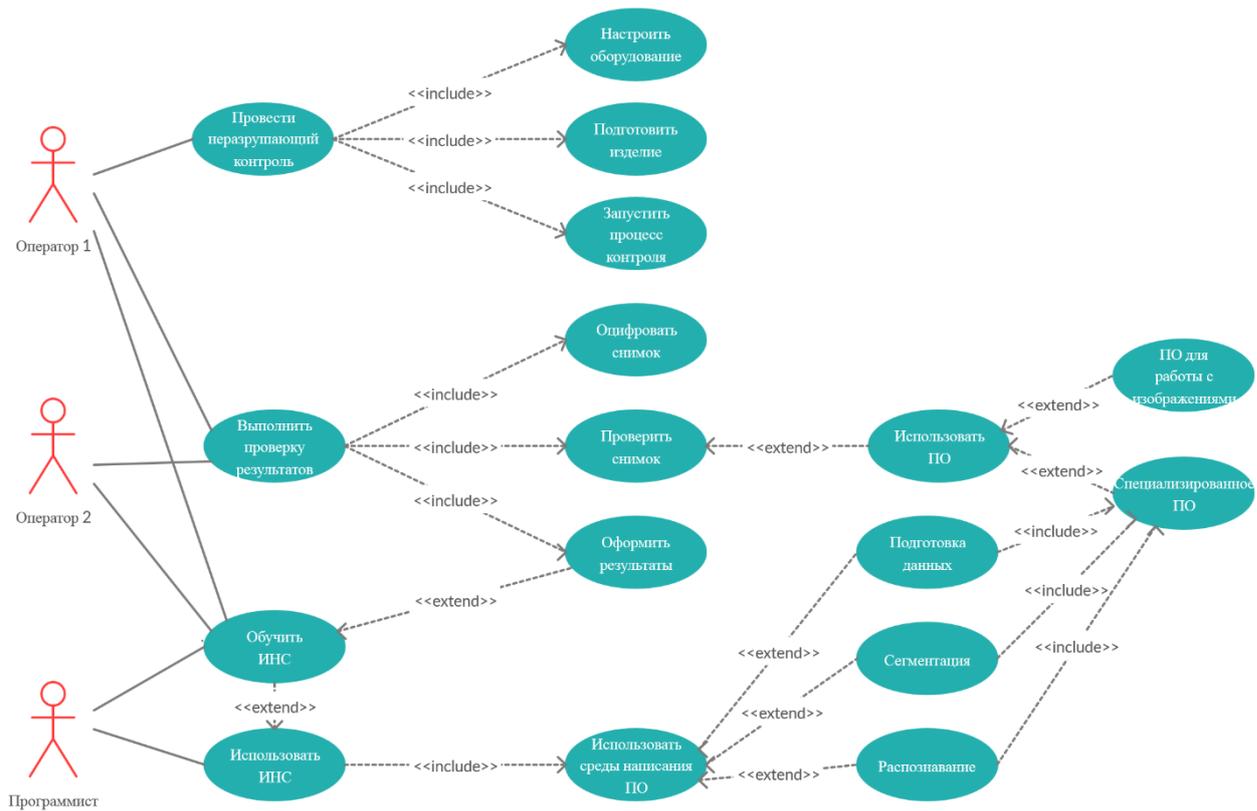


Рис. 1 - UML-диаграмма прецедентов(использования) нейросетевой модели в исследуемой предметной области

Один или два оператора осуществляют неразрушающий контроль, включающий в себя (на диаграмме – «include») настройку оборудования, подготовку изделия и запуск непосредственно процессов контроля [3]. Основной этап – проверка результатов, может осуществляться традиционно, «вручную». При этом основным недостатком метода электромагнитного контроля является то, что рассеянное излучение в зависимости от энергии первичного излучения изменяет качество визуального результата контроля, снижает контрастность и четкость изображения, а, следовательно, и чувствительность самого метода; вследствие этого явления дефекты малого размера тяжело различить без применения средств автоматизации. При традиционном подходе такими средствами могут выступать средства анализа изображений [4], однако предлагается использование специализированного программного обеспечения, составленного программистом на основании рекомендаций ИНС для представленных входных данных.

Программист может совместно или независимо от оператора обучать нейронную сеть актуальными данными по проведенному неразрушающему контролю. При этом основная задача программиста – написание и поддержка программного модуля распознавания рентгенограмм, основанного на рекомендациях ИНС для заданных условий.

Рассмотрим диаграмму деятельности программиста (рисунок 2).

В случае изменения условий операции контроля (замена оборудования, изменение типа проверяемых объектов) программисту необходимо воспользоваться ИНС для определения необходимых алгоритмов подготовки, сегментации и распознавания данных. Выбор языка и среды разработки остаётся на усмотрение программиста. Реализованную в соответствии с предложенными алгоритмами программу необходимо проверить на тестовых примерах и передать оператору.

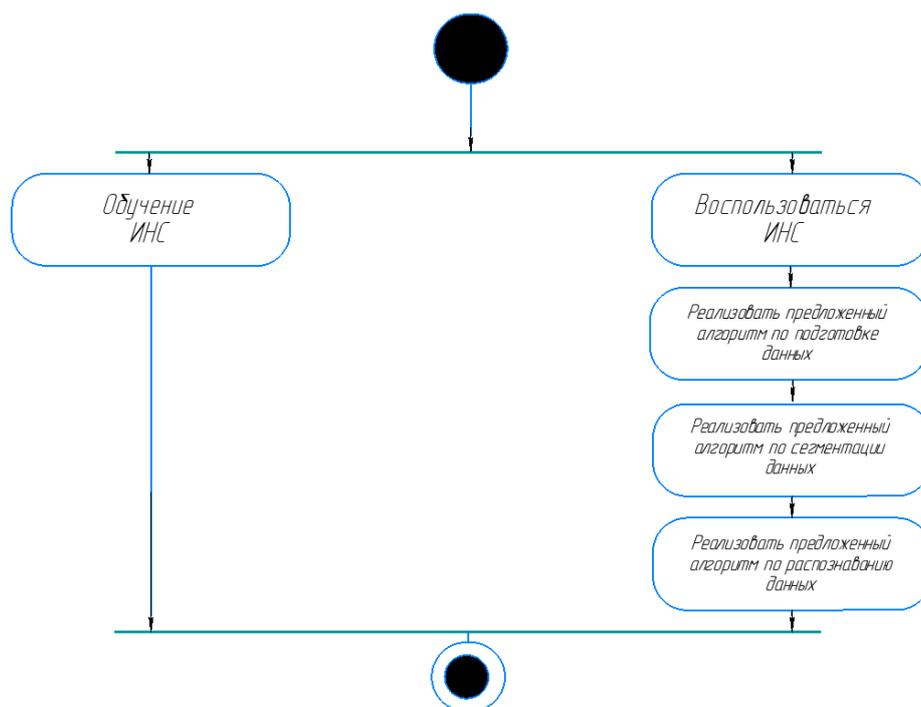


Рис. 2 - UML-диаграмма деятельности программиста при работе с ИНС

Таким образом, предлагаемая роль ИНС – предоставление программисту данных о требуемой структуре и алгоритмах программного средства распознавания рентгенограмм сварных соединений для текущих условий, поскольку подходы к подготовке, сегментации и классификации результатов могут существенно отличаться в зависимости от используемого оборудования, типа контролируемых изделий и прочих технических условий. Это позволит избежать длительных этапов научных или экспериментальных исследований, переведя задачу в рамки менее трудоемкого, инженерного решения, что повысит производительность операции контроля в целом.

Статья подготовлена в рамках проекта по гранту президента № МК – 5451.2018.8.

Список литературы

1. Овечкин М.В. DATA MINING подход к вопросу анализа эффективности методов автоматизированного неразрушающего контроля / М.В. Овечкин // Международный научно-исследовательский журнал, 2018. – №9. – С. 62-67.
2. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект. Модели и концепции эволюционной кибернетики. М.: URSS, 2019. 224 с.
3. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.
4. Овечкин М.В. Системный анализ автоматизированных систем контроля сварных соединений методами коротковолнового электромагнитного излучения / М.В. Овечкин, А.С. Русяев, Ю.И. Овечкина // Научно-технический прогресс: социальные, технические и общественные факторы: материалы международной научно-практической конференции – Москва: «Импульс», 2018. – С. – 390 – 393.
5. Потапов, А.А. Новейшие методы обработки изображений / А.А. Потапов, А.А. Пахомов, С.А. Никитин, Ю.В. Гуляев / М.: Физматлит, 2008. — 496 с.
6. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: [пер. с польск.] / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 452 с.
7. Овечкин М.В. Программное обеспечение автоматизированной системы контроля сплошности изделий на основе искусственных нейронных сетей / М.В. Овечкин // Научно-технический вестник Поволжья, 2019 – №6 – С.57 – 59.

05.13.06

**В.Ф. Пегашкин д-р техн. наук, Г.А. Осипенкова канд. техн. наук,
М.В. Миронова канд. техн. наук**

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Нижний Тагил, v.f.pegashkin@urfu.ru

УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ В ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ДЕТАЛИ

Выявлены корреляционные зависимости между технологическими параметрами отделочно-упрочняющей обработки отверстия осциллирующей детали и показателями качества поверхностного слоя.

Ключевые слова: *отделочно-упрочняющая обработка, осциллирующий инструмент, качество поверхности.*

В настоящее время существует большое количество машин и механизмов, где используются детали с рабочими цилиндрическими внутренними поверхностями: гидро- и пневмоцилиндры, кольца подшипников качения и др., к которым предъявляют повышенные требования по надежности и долговечности. Для обеспечения эксплуатационных свойств таких деталей необходимо их упрочнение с целью повышения твердости несущего поверхностного слоя. Разработаны различные способы механической обработки, такие как шлифование с виброгашением, ротационное хонингование, притирка с дозированным съемом материала, раскатывание с регулированием деформирующих усилий; усовершенствован процесс ротационного растачивания [1].

Эффективными способами повышения твердости поверхностного слоя и улучшения шероховатости является упрочнение поверхностным пластическим деформированием (ППД): дорнование, раскатывание и т.п. [2-4], выглаживание поверхности отверстий с использованием ультразвуковых колебаний [5].

С целью повышения износостойкости втулок предложено производить раскатывание внутренней поверхности. Для раскатывания внутренней поверхности детали «втулка» применялась раскатная головка специальной конструкции (рис. 1) [6]. Раскатная головка устанавливается в шпинделе хонинговального станка. Ей сообщается вращательное движение и движение подачи. В момент обработки – раскатывания – давление от гидроцилиндра привода подач станка через шток гидроцилиндра, болт 18, втулки 17 передается на пружину 16, и далее через тягу 15 на конус 14. В следствие чего вкладыши 2 с деформирующими элементами 3 получают равномерное радиальное перемещение. Тем самым обеспечивается равномерное стабильное статическое давление деформирующих элементов на раскатываемую поверхность, необходимое для протекания пластической деформации поверхностного слоя.

Конструкция раскатной головки позволяет изменять количество вкладышей 2 с деформирующими элементами 3 и использовать вкладыши 2 различными диаметрами деформирующих элементов 3. Использование в качестве оборудования хонинговального станка позволяет регулировать величину статического давления деформирующих элементов 3 на раскатываемую поверхность в пределах от 6 до 20 кг/см², а также изменять цикл давления деформирующих элементов 3 при нескольких проходах. За счет установки наконечника 1 на сферическом пальце 9 посредством шариков 10 имеется возможность отклонения наконечника 1 от вертикальной оси на угол 3° в любую сторону, что позволяет ему самоустанавливаться по диаметру раскатываемого отверстия и тем самым обеспечивается высокая степень центрирования деформирующих элементов.

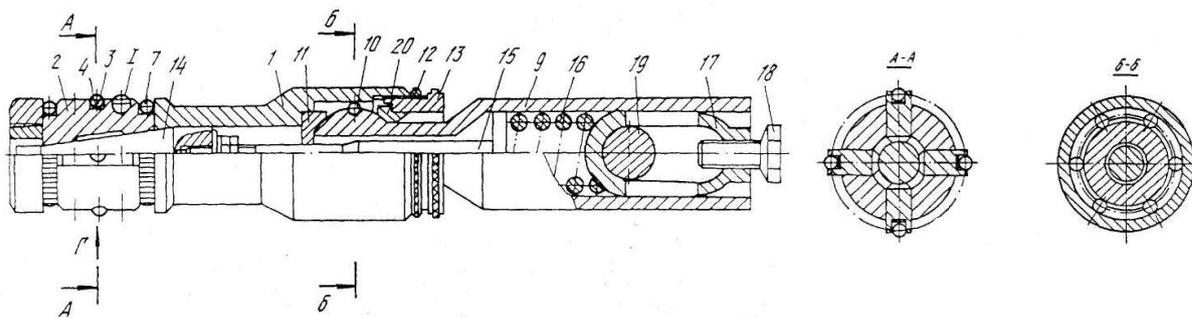


Рис. 1. Конструкция раскатной головки:

1 – наконечник, 2 – вкладыш, 3 – деформирующий элемент, 4 – основание, 5 – пластина, 6 – винт, 7 – кольцевая пружина, 8 – гайка, 9 – шаровой палец, 10 – шарик, 11 – сферическая опора, 12 – гайка, 13 – контргайка, 14 – конус, 15 – тяга, 16 – пружина, 17 – втулка, 18 – болт, 19 – направляющая ось, 20 – сферическая втулка

Процесс обработки на хонинговальном станке характеризуется прохождением инструмента по одной и той же траектории, в результате чего на обработанной поверхности получается характерный рисунок в виде пересекающихся винтовых линий. С целью избежания данного факта процесс раскатывания осуществлялся с осцилляцией детали. Деталь устанавливалась и закреплялась в специальном приспособлении, обеспечивающем ее крутильные осциллирующие колебание с частотой 3 Гц.

Задачей исследований являлось определение оптимальных сочетаний значений технологических режимов для достижения наименьшей шероховатости и увеличения твердости поверхности и выдача соответствующих рекомендаций для производства.

Варьируемые параметры процесса: частота вращения шпинделя с раскатной головкой $n = 90 \dots 240$ об/мин.; число ходов раскатной головки $i = 2 \dots 5$; диаметр деформирующего элемента $d = 3 \dots 5$ мм; число деформирующих элементов во вкладышах раскатной головки $k = 2 \dots 6$ шт. Подача раскатной головки $s = 3$ м/мин; цикл давления деформирующих элементов на раскатываемую поверхность – низкое постоянное; статическое давление деформирующих элементов $P = 80$ Н.

Примеры графиков изменения шероховатости поверхности и твердости поверхностного слоя в зависимости от частоты вращения детали, диаметра деформирующего элемента и количества деформирующих элементов в раскатной головке, построенные по результатам экспериментров, представлены на рис. 2 - 3.

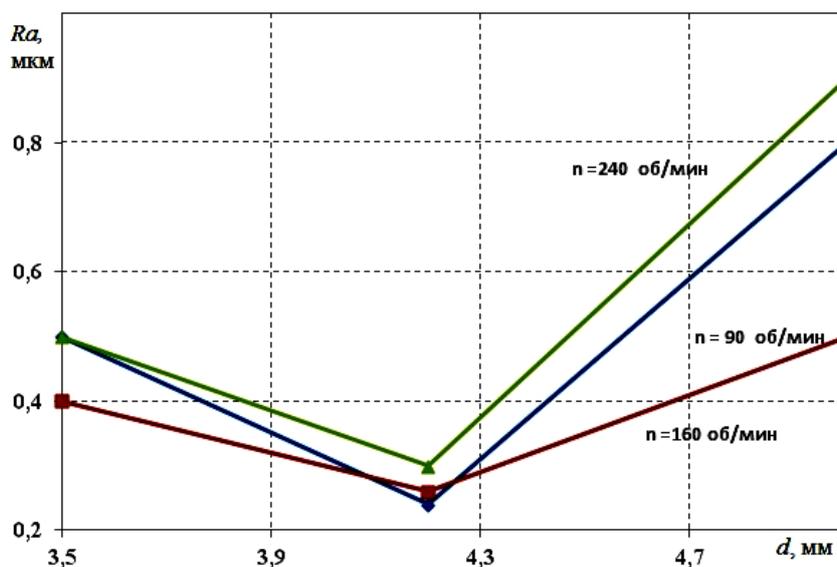


Рис. 2. Изменение шероховатости поверхности в зависимости от частоты вращения детали и диаметра деформирующего элемент

По результатам исследований параметров качества поверхностного слоя установлено:

- при варьировании числа оборотов шпинделя в исследуемом диапазоне параметр шероховатости Ra изменяется незначительно, и имеет минимальное значение при $n = 160$ об/мин;
- при увеличении числа ходов i до 3 в диапазоне параметр шероховатости Ra уменьшается, при $i > 3$ - повышается;
- при повышении числа оборотов шпинделя от 90 до 240 об/мин твердость поверхностного слоя возрастает на 8...17 %, максимальное значение увеличения твердости достигается при $n = 240$ об/мин;
- с увеличением числа ходов твердость снижается, наибольшее увеличение твердости наблюдается при $i = 2$;
- наименьшее значение параметра шероховатости Ra достигается при раскатывании шариком диаметром 4,2 мм;
- изменение числа шариков в раскатной головке на изменение параметра шероховатости Ra оказывает незначительное влияние;
- с ростом числа шариков в раскатной головке твердость поверхностного слоя снижается;
- при увеличении диаметра раскатного шарика твердость поверхности увеличивается.

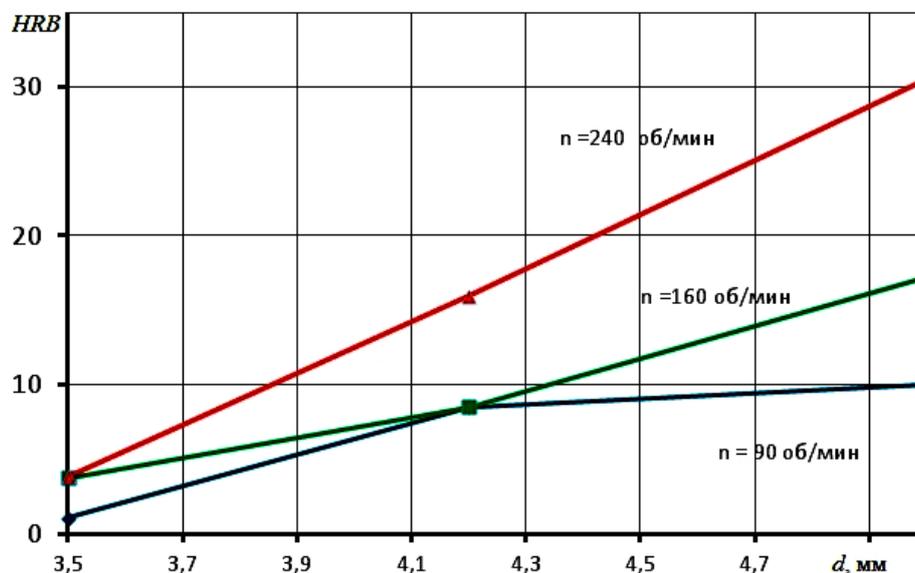


Рис. 3. Изменение твердости поверхностного слоя в зависимости от частоты вращения детали и диаметра деформирующего элемента

На основании анализа полученных результатов исследований были установлены следующие корреляционные зависимости изменения параметра шероховатости Ra и увеличения твердости упрочненного поверхностного слоя:

$$Ra = 3,4 - 1,4i - 0,01n + 0,01n^2 + 0,2i^2$$

$$Ra = 9,1 - 4,5d + 0,3k + 0,6d^2 - 0,07dk$$

$$HB = 13,5 - 9,4i + 0,2n - 0,03ni + 1,4i^2$$

$$HB = - 64,9 + 11,1d + 16,6k - 1,96k^2$$

$$HB = 17,5 + 0,04n - 4,2d$$

Таким образом, для производственных условий могут быть рекомендованы следующие режимы раскатывания: $n = 160$ об/мин.; число ходов раскатной головки $i = 3$; диаметр деформирующего элемента $d = 4...4,5$ мм; число деформирующих элементов во вкладышах раскатной головки $k = 2$ шт.; подача раскатной головки $s = 3$ м/мин; цикл давления деформирующих элементов на раскатываемую поверхность – низкое постоянное; статическое давление деформирующих элементов $P = 80$ Н.

Достигнутая при этом шероховатость поверхности составила 0,3 мкм при исходной 12,5 мкм, твердость раскатанной поверхности увеличилась на 17 %.

Список литературы

1. Шарифов, З.З. Исследование влияния шероховатости поверхности на износ поверхностного слоя деталей судовых машин и механизмов, обработанных различными методами / З.З. Шарифов, Ч.М. Алиев, А.М. Кулиев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2017. – №6. – С. 1262-1272.
2. Киричек, А.В. Технологическое повышение эффективности дорнования волновым нагружением инструмента / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев // Вестник рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2018. – №2. – С. 35-41.
3. Морозов, А.В. Повышение качества изготовления колесного цилиндра заднего тормоза автомобиля уаз применением поверхностного электро-механического дорнования / А.В. Морозов, К.Р. Кундротас // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2018. – №4. – С. 11-19.
4. Свирепа, Д.М. Конструкции инструментов для совмещенной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием магнитно-динамическими раскатниками / Д.М. Свирепа, А.С. Семёнова, С.А. Сухоцкий // Вестник белорусско-российского университета. – 2019. – №1 (62). – С. 38-47.
5. Пегашкин, В.Ф. Выглаживание поверхности отверстий с использованием УЗ крутильных колебаний / В.Ф. Пегашкин, Г.А. Осипенкова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – №4. – С. 69-73.
6. Патент RU №2082591 С1, кл. 6 В 24 В 39/02, 1997. Осипенкова Г.А., Данишевский Г.И., Гаврилова Т.М. Инструмент для обработки цилиндрических отверстий методом поверхностной пластической деформации. Бюл. № 18 от 27.06.97. С. 106.

05.13.06

С.В. Прохоров канд. техн. наук

Владимирский государственный университет имени А.Г и Н.Г. Столетовых,
институт архитектуры, строительства и энергетики,
кафедра строительного производства,
Владимир, oc204@bk.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

В работе представлены результаты изучения современных программных продуктов в области строительного производства, направленных на повышения уровня рентабельности и ресурсосбережения. «Цифровизация» экономики требует применения нового подхода к проектированию объектов, сбору, обработке и передачи информации, а также осуществлению контроля за производством работ. Применение BIM –технологий, беспилотных летающих аппаратов, лазерного сканирования позволяет существенно сократить затраты материальных и людских ресурсов на выполнение строительных работ. Кроме этого, использование современных гибридных силовых и рабочих установок в строительной технике, с интегрированными системами позиционирования и диагностики, позволяет не только снизить эксплуатационные затраты, но и уменьшить выбросы в окружающую среду. Рассмотренные в статье мероприятия направлены на повышение эффективности строительного производства и выведению его на современный мировой уровень.

Ключевые слова: *строительство, автоматизация процессов, цифровое проектирование, цифровая экономика, системы управления.*

Постановка проблемы.

Строительство является одной из древнейших деятельностей человека. С развитием цивилизации совершенствовались методы и технологии производства работ. Появлялись программные продукты для расчета зданий и сооружений, разрабатывались новые машины и механизмы с цифровыми системами управления и диагностики, но, как правило, это были разрозненные системы, которые плохо взаимодействовали друг с другом.[1,2] Современные темпы развития экономики требуют повышения скорости получения, обработки и передачи информации.

Жизненный цикл здания можно разделить на несколько основных этапов: проектирование, реализация проекта, эксплуатация и демонтаж (реконструкция). На всех этих этапах необходимо повышать уровень автоматизации и управления процессами с целью минимизации материальных и людских ресурсов. Необходимо учитывать, что современное строительное производство - это большой взаимосвязанный комплекс различных подразделений, от слаженной работы которых, зависит эффективность капиталовложений и конкурентоспособность строительных компаний. [3]

Анализ последних исследований и публикаций.

Одним из современных направлений в области цифрового проектирования являются BIM-технологии (Building Information Modeling). Результатом BIM-моделирования является комплексная компьютерная модель здания или сооружения, описывающая как сам объект со всеми системами, так и, что особенно важно, процесс его строительства.[4,5] Хотя многие эксперты критикуют эти технологии за излишнюю сложность при создании модели и необходимость, на современном этапе, проверки традиционными методами, но по сравнению с традиционным подходом они имеют ряд преимуществ[6,7]:

- сокращение времени подготовки проектной документации за счет применения готовых решений и оптимизации работы смежных отделов;
- возможность выявления ошибок 2D проектирования;
- контроль над расходами.

На основе 3D-модели проектируемого здания, можно производить выбор методов производства работ, организовывать территорию строительной площадки, контролировать качество и сроки выполнения технологических операций. [8,9]

Помимо очевидных преимуществ использование полной цифровой модели позволяет повысить автоматизацию и механизацию строительного производства, а значит сэкономить материально-технические и людские ресурсы. [10]

Немаловажным аспектом автоматизации строительных работ является топографическая съемка и геодезическая подготовка строительной площадки. На современном этапе необходимо применение новейших методов построения цифровой модели поверхностей, направленных на снижение трудоемкости и удобство последующей обработки.

Современные беспилотные летательные аппараты, оснащенные высокоточной аппаратурой для получения цифровых карт и трехмерных моделей, являются очень эффективным решением по сравнению с традиционными методами. [11,12] Благодаря интеграции программных продуктов Autodesk и вебплатформы TracAir становится возможной передача информации из облака в наиболее известные программы компании Autodesk. [13]

Другим объектом, требующим особого отношения при производстве строительно-монтажных работ, является строительная техника. От её исправного функционирования, правильной эксплуатации и эффективности применения зависит конкурентоспособность строительной организации. [14] Для решения этой задачи необходимо внедрять программные продукты способные увязывать график производства работ, цифровую модель сооружения, на основе рационального метода производства работ. Современные программные средства с системами 2D, 3D, а в некоторых случаях 4D, позиционирования позволяют в режиме реального времени отслеживать техническое состояние и производительность техники, выявлять недостаточно загруженные машины и оптимизировать график их работы. [15,16]

Изложение основного материала.

Методика исследований была построена на анализе наиболее трудоемких процессов при реализации проектных решений по возведению строительных объектов и выявлении путей, позволяющих их автоматизировать. Для исследования был выбран «Многофункциональный спортивный комплекс с бассейном». Строительный объем - 88423,26 м³, общая площадь здания-23196,45 м².

Для оценки эффективности принятых решений применялась программа Project Expert. Срок реализации проекта 2 года. Продолжительность выполнения проектных работ определялась согласно МРР-3.1.10.02-04 «Нормы продолжительности проектирования объектов строительства в городе Москве». Продолжительность строительства определена расчетом по СНиП 1.04.03-85* «Нормы продолжительности строительства и задела в строительстве предприятий, зданий и сооружений».

Эффективность принятых решений оценивалась на основе определения для каждого варианта сумму приведенных строительных и эксплуатационных расходов, используя зависимость:

$$C_{red} = \sum_{t=0}^{t=t_c} \frac{K_t}{(1 + E_n)^t} + \sum_{t=1}^{t=t_c} \frac{P_t}{(1 + E_n)^t}$$

где K_t и P_t – капиталовложения и эксплуатационные расходы в соответствующем году t ; $1/(1 + E_n)^t$ – коэффициент отдаленности затрат, учитывающий уменьшение значимости затрат, совершаемых через t лет; t_c – год, ограничивающий период суммирования расходов по рассматриваемым вариантам.

Потребность в основных строительных машинах определялась в целом на основе физических объемов работ и эксплуатационной производительности машин с учетом принятых организационно-технологических схем строительства. Основные этапы приведены в табл.1

Таблица 1- Расчетные данные по варианту

Наименование работ	Инвестиционные затраты, млн.руб	Расчетная продолжительность работ, мес.
Проектные работы	22	8,5
Подготовительные работы	5	3
Земляные работы	35	2,5
Общестроительные работы	165	12
Бетонные работы	78	12
Благоустройство	25	2
Монтаж оборудования	70	5
Отделочные работы	70	6
Сдача объекта	12	2
Итого	482	-
Из них затраты на механизацию	48	-

Проведенные исследования выявили как положительные, так и отрицательные моменты предлагаемых решений:

К положительным моментам следует отнести:

- Применение современных программных продуктов основанных на создании единой базы данных и возможностью совместного управления позволяет существенно сократить сроки на выполнение проектных работ и согласование технологических решений по возведению зданий;

- Внедрение современных методов производства работ, а также правильное их планирование позволяет сократить потребность в людских и материальных ресурсах, а также оптимизировать работу строительной техники;

К отрицательным моментам следует отнести:

- BIM-проектирование требует большего времени и уровня квалификации исполнителей, а также дополнительных затрат на программное обеспечение, при этом временные затраты на построение полноценной 3D –модели компенсируются сокращением продолжительности согласования, утверждения и корректировки проектной документации;

- Переход к современным системам автоматизированного управления производством строительно-монтажных работ требует переоснащения строительных организаций современной техникой, что приводит к удорожанию строительства;

- Автоматизация работ приводит к сокращению рабочих занятых при производстве работ, что может вызвать социальное напряжение. С другой стороны, это стимулирует людей осваивать перспективные технологии и методы производства работ.

Результаты расчетов представлены на рисунке 1.

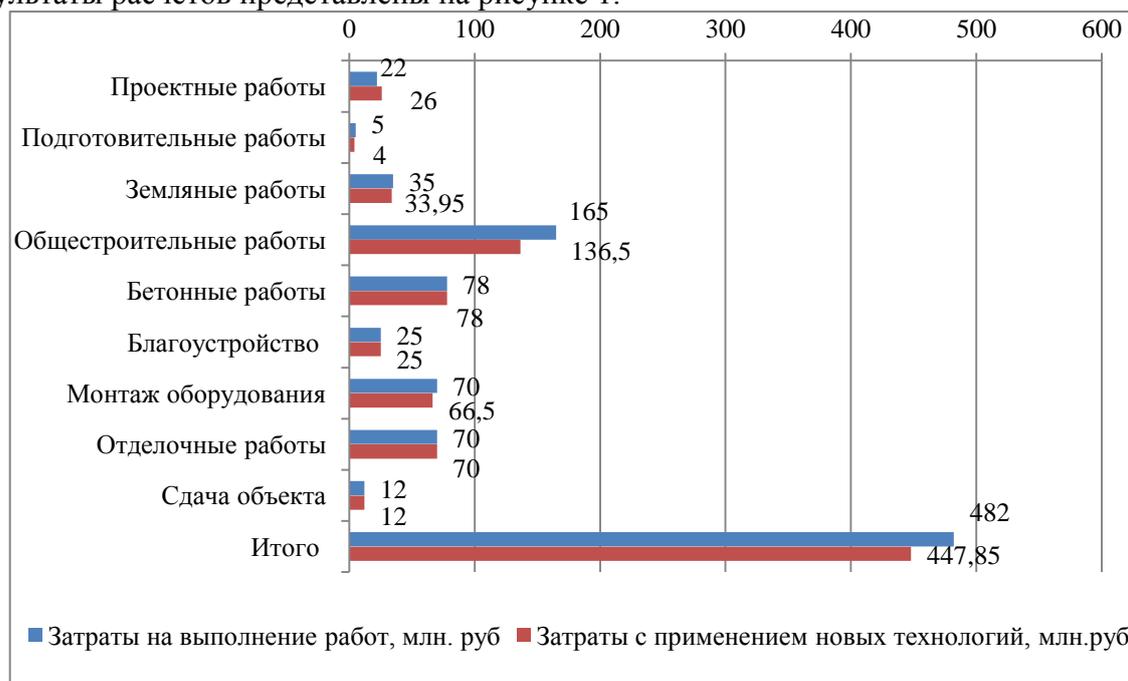


Рис. 1- Результаты сравнения вариантов производства работ

Выводы.

В процессе анализа результатов расчета можно сделать выводы, что по сравнению с традиционными методами применение автоматизированных систем проектирования и управления строительным производством позволяет существенно сократить потребность в материально-технических, людских и энергоресурсах, а также повысить конкурентоспособность строительной организации.

Список литературы

1. Шишкина Д.А., Курченко Н.С. Об автоматизации системы организационно-технологической подготовки строительного производства //В сборнике: Сборник материалов международных научно-практических конференций. Ред. Коротких А.А. 2018. С. 183-189.
2. Абросимов И.П., Белоусов В.Е., Сиэми Д.М. Модель автоматизации технологических процессов для строительного производства //Управление строительством. 2017. № 1 (9). С. 74-81.
3. Артемьева В.М. Повышение уровня механизации и автоматизации строительного производства с целью повышения технико-экономических показателей // Молодой ученый. 2018. № 48 (234). С. 360-362.
4. Park J., Cai H. WBS-based dynamic multi-dimensional BIM database for total construction as-built documentation // Automation in Construction, 2017. No.77, pp. 15-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.01.021>
5. Ильина О.Н. Управление проектами с использованием технологий информационного моделирования (BIM) при проектировании, строительстве и эксплуатации промышленных объектов. // Недвижимость: экономика, управление. 2017. № 2. С. 72-75.
6. Расколдованный BIM: 7 мифов об информационном моделировании (<https://www.radidomapro.ru/ryedktzij/stroytelstvo/kapitalnoye/raskoldovannyj-bim-7-mifov-ob-informatzionnom-mod-66072.php>) Дата обращения: 28.07.2019
7. Чубрик Д. Информационное моделирование. Внедрение BIM: мифы и реальность //Высотные здания.2014. №4. С.64-65
8. Vitasek S., Matejka P. Utilization of BIM for automation of quantity takeoffs and cost estimation in transport infrastructure construction projects in the Czech Republic// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol.236. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/236/1/012110>

9. *Garyaev N.* Analysis of risks arising in the implementation of BIM - technologies in construction organizations. // MATEC Web of Conferences.2018.Vol. 251. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825105024>
10. *Шадьжеев З.М., Мальсагов М.М., Евлоев Ш.И., Палункоев М.У.А., Мерзоев И.И., Мангушев Н.Р.* Преимущества технологии BIM при её использовании на различных этапах строительства // Экономика и предпринимательство. 2018. № 8 (97). С. 608-612.
11. *Погорелов В.А.* Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов в строительстве // Инженерный вестник Дона.2016.№ 1(40).С.58.
12. *Мифтахов И.Р., Ишбулатов М.Г., Галеев Э.И.* Методология использования беспилотных летательных аппаратов при съемке площадных и линейных объектов.// В сборнике: Наука молодых – инновационному развитию АПК материалы IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. 2016. С. 100-104.
13. Российские стройки оборудуют дронами // САПР и графика. 2016. № 4 (234). С. 28-30. <https://sapr.ru/article/25178>. Дата обращения: 28.07.2019
14. *Ким Б.Г.* Теоретические вопросы взаимосвязи систем обеспечения исправности и работоспособности парков машин //Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2017. Т. 3. № 1. С. 79-86.
15. *Щербаков В.В., Бунцев И.А., Щербаков И.В., Астраханцев В.Д.* Системы автоматизированного управления строительной техникой (САУ-3D)//Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. № 1. С. 57-63.
16. *Вершинин С.В.* Различные аспекты использования автоматизированных систем управления при производстве строительных работ и в составе комплекса точного земледелия // Вестник строительства и архитектуры. Сборник трудов конференции. г.Орел. 2018. С. 78-89.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ (05.13.11)

05.13.11

С.Ю. Городецкий канд. физ. - мат. наук

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского,
институт информационных технологий, математики и механики,
кафедра теории управления и динамики систем
Нижегород, gorosyu@gmail.com

**МЕТОДЫ УЧЕТА МНОГОЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ
В ЗАДАЧАХ ОДНОМЕРНОЙ ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ
И ИХ ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
НА ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ КЛАССАХ ГЛАДКИХ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ**

Разработана программная библиотека для управляемой генерации многоэкстремальных гладких одномерных тестовых задач оптимизации со сложными ограничениями. Построены два численных метода условной глобальной оптимизации для задач с невычислимыми липшицевыми производными. На двух представительных выборках, включающих по 200 сгенерированных тестовых задач, проведено численное исследование эффективности этих методов в сопоставлении с известным индексным методом учета ограничений. Определен наиболее эффективный метод.

Ключевые слова: *глобальная оптимизация, многоэкстремальные ограничения, липшицевы производные, генератор тестовых задач с ограничениями, численные эксперименты.*

Введение

В работе рассмотрены методы из группы липшицевой глобальной оптимизации, где термин понимается в расширенном смысле, когда липшицевыми могут быть не только функции, но и их производные. Постановка задачи глобальной оптимизации принята в виде:

$$\min_{x \in D} f(x), D = \{x \in [a, b] \subset R^1: g_j(x) \leq 0, (j = 1, \dots, m)\} \neq \emptyset, \quad (1)$$

Для дальнейшего удобства обозначим $g_{m+1}(x) = f(x)$. Положим, что все функции дифференцируемы, а их производные липшицевы: для каждого $j = 1, \dots, m + 1$ существуют константы $M_j \geq 0$, что $\forall x', x'' \in [a, b]$:

$$|g'_j(x') - g'_j(x'')| \leq M_j |x' - x''|. \quad (2)$$

Считаем (в отличие, например, от [1] и [2]), что производные функций недоступны измерению, а вычислить можно только значения этих функций.

Такая постановка наиболее адекватна многим приложениям, в которых гладкие функции задачи не имеют аналитического представления и могут быть заданы только алгоритмически. Кроме того, будем предполагать, что измерение функций в точках отрезка $[a, b]$ вычислительно затратно и поэтому представляют интерес методы решения (1), требующие возможно меньшего числа измерений для получения решения с заданной точностью.

Два метода такого типа построены в работе для описанного класса задач. Важно отметить, что хотя полученные методы являются одномерными, но они допускают обобщения на многомерный случай либо через диагональный компонентный подход на основе эффективных диагональных кривых [2], либо с использованием триангуляционной схемы [3].

Следует отметить, что аналитическое исследование методов липшицевой глобальной оптимизации, как правило, позволяет установить в основном лишь достаточные условия глобальной сходимости и не позволяет адекватно оценить эффективность метода. Поэтому важным является экспериментальное численное исследование (см., например, [1]), но для его проведения нужны представительные классы задач управляемой структуры, для которых можно заранее определить искомые решения. В глобальной оптимизации без ограничений имеются и широко используются фиксированные наборы тестовых задач [1], [2, стр. 86, 113, 170], классы псевдослучайно генерируемых задач [1], специальные генераторы задач (в [2, стр. 288-309] описан генератор для R^N). Для R^1 есть лишь отдельные работы с описанием небольших тестовых наборов со сложными ограничениями [4]. Генераторы многоэкстремальных задач для R^1 с ограничениями еще не построены, поэтому в данной работе для проведения необходимых представительных исследований потребовалась разработка программных средств псевдослучайной генерации задач такой структуры.

1. Построение генератора тестовых задач с ограничениями

Генератор реализован в виде *dll*-библиотеки с исходным кодом на C++. В порождаемых им задачах вида (1) функции $g_j(x)$, ($j = 1, \dots, m + 1$) строятся на основе многоэкстремальных вспомогательных функций четырех типов $S_0(x), \dots, S_3(x)$. В качестве первых трех типов выбраны известные функции, используемые для тестирования методов безусловной глобальной оптимизации и имеющие свободные параметры, которые далее будут генерироваться псевдослучайно. Четвертый тип $S_3(x)$ – полиномы пятой или шестой степени с псевдослучайным размещением корней. Каждому типу S_k сопоставлен конкретный диапазон $[A_k, B_k]$ изменения аргумента x .

Приведем описание используемых типов функций.

$S_0(x)$ – функции Пинтера: $d \in [-5, 5]$, $x \in [A_0, B_0] = [-5, 5]$,

$$S_0(x) = 0.0025(x - d)^2 + \sin^2(x - d) + \sin^2((x - d) + (x - d)^2).$$

$S_1(x)$ – функции Шекеля вида: $x \in [A_1, B_1] = [0, 10]$,

$$S_1(x) = -\sum_{i=1}^{10} \frac{1}{c_i + k_i(x - d_i)^2}, c_i \in [0.001, 2], k_i \in [1, 9], d_i \in [0, 10].$$

$S_2(x)$ – функции Гибсона: $x \in [A_2, B_2] = [0, 1]$,

$$S_2(x) = \sum_{i=0}^{13} (c_i \sin(4\pi i x) + d_i \cos(4\pi i x)), c_i \in [0, 1], d_i \in [0, 1].$$

$S_3(x) = S_3(x, n)$ – полиномиальные функции степени n :

$$S_3(x, n) = \text{sign}(c) 10^k \prod_{i=0}^{n-1} (x - d_i), x \in [A_3, B_3] = [0, 1],$$

$$d_0 = 0, d_1 = 1, d_i \in [0.05, 0.95], (i = 1, \dots, n - 2), c \in [-1, 1], k \in \{-1, 0, 1\}.$$

При порождении вспомогательных функций значения их вещественных параметров d, c_i, k_i, d_i генерируются в указанных выше диапазонах с использованием псевдослучайных значений ξ из $[0, 1]$, вычисляемых с использованием стандартного датчика C++ с использованием соотношения $\xi = (\text{double})\text{rand}() / (\text{double})\text{RAND_MAX}$. Последний целочисленный параметр k определяется соотношением $k = (\text{rand}() \% 3) - 1$. Псевдослучайный выбор значений параметров каждой функции происходит строго в том порядке, как они перечислены в ее описании выше.

Для генерации набора тестовых задач должны быть заданы параметры: $nt0$ – номер типа минимизируемой функции (от 0 до 3), $nt1$ – номер типа функции первого ограничения (от 0 до 3), m – количество ограничений в (1), μ^* – относительная желаемая мера допустимого множества D в (1). Набор может включать любое количество задач, каждая из которых однозначно определяется своим порядковым номером N_{task} в этом наборе.

Алгоритм генерации каждой задачи включает следующие шаги:

1. Инициализация датчика случайных чисел (инструкция $\text{srand}(p_0)$) значением p_0 , зависящим от параметров набора задач и номера задачи:

$$p_0 = 10 \cdot (nt1 + 1) + 100 \cdot (nt0 + 1) + 1000 \cdot m + 10000 \cdot N_{task}.$$

2. Построение набора из $(m + 1)$ -ой вспомогательной функции. Вначале выполняется

генерация минимизируемой функции $f(x) = g_{m+1}(x) = S_{nt0}(x)$ с выбором в (1) $[a, b] = [A_{nt0}, B_{nt0}]$. Затем — вспомогательных функций для построения функций ограничений. Для первого ограничения порождается вспомогательная функция вида:

$$F_1(x) = S_{nt1} \left(A_{nt1} + (x - a) \frac{B_{nt1} - A_{nt1}}{b - a} \right).$$

Если их количество $m > 1$, для ограничений с номерами $j = 2, \dots, m$ генерируются полиномиальные функции степени n_j вида

$$F_j(x) = S_3 \left(A_3 + (x - a) \frac{B_3 - A_3}{b - a}, n_j \right),$$

где степень зависит от четности j : для четных j $n_j = 6$, для нечетных $n_j = 5$.

3. Приближенное определение диапазонов изменения вспомогательных функций. Для каждой функции $F_j(x)$ ($j = 1, \dots, m$) вычисляются значения в узлах равномерной сетки из 1000 точек, покрывающей $[a, b]$ и определяется грубая оценка их наибольших и наименьших значений F_j^{min} и F_j^{max} .

4. Построение функций ограничений $g_j(x)$ для задачи (1) путем определения ограничителей на значения вспомогательных функций $F_j(x)$, ($j = 1, \dots, m$). Структура функций $g_j(x)$ определяется следующим образом:

$$g_j(x) = F_j(x) - \left(F_j^{min} + \alpha \cdot (F_j^{max} - F_j^{min}) \right)$$

и зависит от параметра $\alpha \in [0, 1]$. Для определения нужного значения α^* вводится функция $\mu(\alpha)$, приближенно характеризующая относительную меру допустимого множества D в задаче (1). Величина $\mu(\alpha)$ вычисляется как доля точек на сетке из п.3, в которых при заданном значении α в (1) выполняются все ограничения. Искомое значение α^* вычисляется на $[0, 1]$ методом дихотомии с точностью 0.002, как корень уравнения $\mu(\alpha) = \mu^*$.

Выполнение п.4 завершает генерацию задачи. Каждый тестовый набор однозначно определяется параметрами: $nt1, nt0, m, \mu^*$ и количеством задач.

Заметим, что для проведения тестирования методов для тестовых задач должны быть с высокой точностью определены множества их глобальных минимумов. Разработанный генератор позволяет это сделать с точностью по координате 10^{-8} (используется перебор по равномерной сетке из 5000 точек с последующими локальными уточнениями методом Фибоначчи). Примеры видов задач, синтезируемых генератором, представлены на первом рисунке в разделе 3 экспериментального исследования.

2. Два метода парабол условной глобальной оптимизации

Методы парабол основаны на измерениях функций задачи (1) в точках отрезка $[a, b]$. Первые два вычисления проводятся в граничных точках, третье — в его центре. Пусть уже проведено k измерений, координаты которых упорядочены по возрастанию нижним индексом:

$$a = x_1 < x_2 < \dots < x_k = b.$$

Результаты каждого измерения $Z^i = (g_1(x_i), \dots, g_{m+1}(x_i))$ сохраняются в памяти (используется обозначение $g_{m+1}(x) = f(x)$). Исходный отрезок $[a, b]$ точками измерений разделяется на промежутки $I_i = [x_i, x_{i+1}]$. Принимается, что на каждом промежутке I_i производные функций задачи (1), удовлетворяют условию Липшица (2) со своими значениями констант $M_j = M_j(I_i)$, зависящими от промежутка I_i .

При указанных выше условиях является верным следующее.

Утверждение. На каждом промежутке I_i существуют поточечные нижние оценки значений функций задачи, имеющие вид парабол:

$$g_j(x) \geq \psi_j^i(x) = C_j^i + \frac{M_j(I_i)}{2} (x - w_j^i)^2, x \in [x_i, x_{i+1}], \quad (3)$$

где значения C_j^i и w_j^i определяются из соотношений

$$w_j^i = \frac{x_{i+1} + x_i}{2} - \frac{z_j^{i+1} - z_j^i}{M_j(I_i) \cdot (x_{i+1} - x_i)}, \quad C_j^i = \frac{z_j^{i+1} + z_j^i}{2} - M_j(I_i) \frac{(x_{i+1} - w_j^i)^2 + (x_i - w_j^i)^2}{4}. \quad (4)$$

Доказательство утверждения следует из более общего результата для R^N (см.

[5, стр. 61-63]), когда I_i является не отрезком, а симплексом с точками измерений в вершинах, при этом функции задачи имеют липшицевы производные по направлениям, а оценки в (3) являются параболоидами.

Методы парабол в качестве значений $M_j = M_j(I_i)$ используют оценки, вычисляемые по результатам измерений функций задачи. Опишем способ вычисления этих оценок, близкий к предложенному в [3]. Введем понятие частной оценки $m_j(i)$ константы M_j по результатам измерения функции g_j в трех точках x_{i-1}, x_i, x_{i+1} с центральной x_i . Частная оценка строится как модуль второй производной полинома второго порядка, принимающего в указанных точках измеренные значения:

$$m_j(i) = 2 \left| \frac{z_j^{i-1}}{(x_{i-1}-x_i)(x_{i-1}-x_{i+1})} + \frac{z_j^i}{(x_i-x_{i-1})(x_i-x_{i+1})} + \frac{z_j^{i+1}}{(x_{i+1}-x_{i-1})(x_{i+1}-x_i)} \right|.$$

Для всех промежутков I_i , кроме крайних, можно вычислить по две частные оценки $m_j(i)$ и $m_j(i+1)$ по двум тройкам точек. Из них выбирается наибольшая. Назовем эти значения локальными оценками m_j^i :

$$m_j^1 = m_j(2), m_j^{k-1} = m_j(k-1), \text{ остальные } m_j^i = \max\{m_j(i), m_j(i+1)\}.$$

Вычисляются глобальные оценки констант — наибольшие из локальных:

$$m_{jk}^* = \max\{m_j^i: i = 1, \dots, k-1\}, (j = 1, \dots, m+1).$$

Для промежутков I_i вводятся «осторожные» локальные оценки:

$$m_j(I_i) = \begin{cases} \max\{m_j^1, m_j^2, \delta\}, & i = 1; \\ \max\{m_j^{i-1}, m_j^i, m_j^{i+1}, \delta\}, & 1 < i < k-1; 0 < \delta \ll 1. \\ \max\{m_j^{k-2}, m_j^{k-1}, \delta\}, & i = k-1. \end{cases}$$

Завышенная глобальная оценка M_{jk}^* определяется в зависимости от количества проведенных измерений k . Вначале при $k < k^*$ используется мультипликативное завышение:

$$M_{jk}^* = \gamma_j \cdot m_{jk}^*, \text{ при } m_{jk}^* > 0 \text{ и } M_{jk}^* = 1, \text{ при } m_{jk}^* = 0,$$

а при $k \geq k^*$ — аддитивное: $M_{jk}^* = m_{jk}^* + \Delta_j$, где Δ_j вычисляется однократно при $k = k^*$: $\Delta_j = \gamma_j \cdot m_{jk^*}^* - m_{jk^*}^*$, если $m_{jk^*}^* > 0$ и $\Delta_j = 1$, при $m_{jk^*}^* = 0$. Коэффициенты надежности $\gamma_j > 0$ выбираются так, что зависят от двух параметров: $\gamma_{m+1} = \gamma_f, \gamma_1 = \dots = \gamma_m = \gamma_g$.

Локализованные оценки $M_j(I_i)$ констант Липшица, используемые при вычислении нижних оценок (3) функций задачи (1) определяются в зависимости от размеров $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$ промежутков I_i по отношению к пороговому размеру $d^* = \beta \cdot (b - a)$ (параметр метода $0 < \beta < 1$):

$$M_j(I_i) = \begin{cases} \frac{\Delta x_i}{d^*} M_{jk}^* + \left(1 - \frac{\Delta x_i}{d^*}\right) m_j(I_i), & \text{при } \Delta x_i \leq d^*, \\ M_{jk}^*, & \text{при } \Delta x_i \geq d^*. \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, описанный алгоритм вычисления оценок констант Липшица зависит от пяти параметров: $\delta, \gamma_f, \gamma_g, k^*, \beta$. Принято $\delta = 10^{-10}$.

Опишем общие принципы построения и структуру двух методов парабол.

1. Методы используют преобразование задачи (1), приводящее множество поиска $[a, b]$ к стандартному отрезку $[0, 1]$.

2. Поиск начинается с проведения трех первых измерений в граничных и центральной точках и построения начальных оценок констант Липшица.

3. Начиная с $k = 3$ для существующих промежутков I_i ($i = 1, \dots, k-1$) вычисляются нижние оценки $\psi_j^i(x)$ функций из (3) и с их использованием определяются $R(I_i)$ — характеристики-приоритеты промежутков.

4. Выбирается промежуток $I_{t(k)}$ с минимальной характеристикой:

$$R(I_{t(k)}) = \min\{R(I_i): i = 1, \dots, k-1\}. \quad (6)$$

5. Может быть использован собственный критерий останова (по параметру точности $\varepsilon > 0$). Метод останавливается, если длина выбранного промежутка $\Delta x_{t(k)} = x_{t(k)+1} -$

$x_{t(k)} \leq \varepsilon$, лучшее допустимое измерение принимается за оценку решения. Иначе переходим на п. 6.

6. По правилам метода на выбранном промежутке $I_{t(k)}$ вычисляется точка $\hat{x}(I_{t(k)})$ так, что

$$\hat{x}(I_{t(k)}) \in [x_{t(k)} + \nu \cdot \Delta x_{t(k)}, x_{t(k)+1} - \nu \cdot \Delta x_{t(k)}], \quad (7)$$

где $0 < \nu \leq 0.5$. Проводится $(k + 1)$ -ое измерение функций задачи в точке $x^{k+1} = \hat{x}(I_{t(k)})$, текущий промежуток разделяется на два новых за счет встраивания нового измерения для x^{k+1} в упорядоченный по координате ряд измерений. Полагается $k = k + 1$. Корректируются оценки констант Липшица и текущая оценка решения f_k^*, x_k^* , переходим на п.3.

Конкретные методы отличаются способами вычисления характеристик интервалов $R(I_i)$ и выбора на них точек проведения новых измерений (7). Приведем описание для двух методов парабол.

Первый — метод парабол, использующий задачу с перестраиваемой структурой. Данный подход к учету ограничений ранее был успешно применен автором данной работы при построении триангуляционного [3] и DIRECT-подобного [6] методов многомерной условной глобальной оптимизации, также описан в [5, стр. 303-308]. Основан на том, что при известном глобально-оптимальном значении f^* минимизируемой функции задача (1) эквивалентна задаче без ограничений-неравенств вида:

$$\min\{F(x): x \in [a, b]\}, F(x) = \max\{f(x) - f^*; g_1(x); \dots; g_m(x)\}. \quad (8)$$

Поскольку само значение f^* не известно, а известна только его текущая оценка f_k^* , вместо решения задачи (8) приходится решать похожую, но другую, в которой f^* заменяется на f_k^* и за счет этого возникает задача с изменяющейся в процессе решения целевой функцией:

$$\min\{F_k(x): x \in [a, b]\}, F_k(x) = \max\{f(x) - f_k^*; g_1(x); \dots; g_m(x)\}, \quad (9)$$

$$f_k^* = \min\{f(x_i): x_i \in D_k\}, \text{ если } D_k \neq \emptyset, \text{ и } f_k^* = +\infty, \text{ если } D_k = \emptyset,$$

где D_k — множество точек измерений, в которых выполнены ограничения.

Исходя из структуры решаемой задачи (9) в качестве характеристики $R(I_i)$ принято минимальное значение на промежутке I_i поточечной нижней оценки $F_k^-(x)$ функции $F_k(x)$, получаемой из (9) заменой входящих в нее функций их нижними оценками из (3). Таким образом, после i -го измерения

$$R(I_i) = \min\{F_k^-(x): x \in I_i\}, F_k^-(x) = \max\{\psi_{m+1}^i(x) - f_k^*; \psi_1^i(x); \dots; \psi_m^i(x)\},$$

$$\hat{x}(I_i) = \max\{x_i + \nu \cdot \Delta x_i; \min\{x_{i+1} - \nu \cdot \Delta x_i; \bar{x}(I_i)\}\}, \Delta x_i = x_{i+1} - x_i, \quad (10)$$

где $\bar{x}(I_i) = \arg \min\{F_k^-(x): x \in I_i\}$. Метод далее обозначается TransformPM (от transformation parabola method). $R(I_i)$ в (10) вычисляется численно.

Второй метод парабол, называемый далее SimplePM (simple parabola method), использует исходную структуру задачи (1). Характеристика промежутка I_i вычисляется как минимальное значение нижней оценки минимизируемой функции, определенное по той части \check{I}_i промежутка I_i , где нижние оценки (3) всех функций ограничений неположительны. Пусть

$$\check{I}_i = \{x \in [x_i, x_{i+1}]: \forall j = 1, \dots, m: \psi_j^i(x) \leq 0\}, \text{ тогда}$$

$$R(I_i) = \min\{\psi_{m+1}^i(x): x \in \check{I}_i\}, \text{ если } \check{I}_i \neq \emptyset, \text{ и } R(I_i) = +\infty, \text{ при } \check{I}_i = \emptyset.$$

Если $R(I_i) < \infty$, вычисляется $\bar{x}(I_i) = \arg \min\{\psi_{m+1}^i(x): x \in \check{I}_i\}$ и точка $\hat{x}(I_i)$ определяется согласно (10). Однако, в данном методе при малости относительной меры допустимого множества D на начальной стадии поиска возможны ситуации, когда на всех промежутках I_i окажется $R(I_i) = +\infty$. Тогда процедура выбора делимого промежутка (6) должна быть на данной итерации повторена с заменой прежней характеристики на $R(I_i) = x_{i+1} - x_i$ и заменой описанного выше правила выбора $\hat{x}(I_i)$ на другое: $\hat{x}(I_i) = \frac{x_{i+1} + x_i}{2}$

Методы TransformPM и SimplePM являются одномерными аналогами двух триангуляционных методов параболоидов, описанных в [5, стр. 303-308].

При проведении экспериментального исследования методы с учетом ограничений TransformPM и SimplePM сопоставлены с известным индексным методом учета невыпуклых

ограничений [7], к которому добавлено -резервирование, согласно [8]. Индексный метод построен для класса липшицевых функций и, в отличие от методов парабол, не учитывает гладкость задач из тестовых выборок; может решать задачи, не являющиеся гладкими. В отличие от авторской версии [7], выполненная реализация метода первые два испытания проводит на концах исходного интервала поиска и зависит от трех параметров: γ_f – коэффициента завышения константы Липшица минимизируемой функции, γ_g – аналогичного коэффициента, принятого одинаковым для всех функций ограничений, ε_{res} – параметра -резервирования.

3. Экспериментальное исследование методов на представительных тестовых выборках

Использованы две разные тестовые выборки по 200 задач в каждой с четырьмя функциями ограничений в (1). Выборка A соответствует параметрам генерации: $nt_0 = 2, nt_1 = 1, m = 4, \mu^* = 0.25$; выборка B – параметрам: $nt_0 = 0, nt_1 = 2, m = 4, \mu^* = 0.15$.

На рис.1 приведены примеры видов отдельных задач из тестовых выборок A и B с примерами размещения точек измерений методом SimplePM.

Представительное сравнение методов проведено по предложенной в [9] методике на основе операционных характеристик. При тестировании использована информация о точных решениях задач. На каждой задаче метод выполнял не более $K = 1000$ измерений. Задача с номером t считалась решенной при количестве измерений $K_t = k$, если для текущей оценки решения x_k^* впервые выполнялось условие близости $|x_k^* - x^*| < \varepsilon$ к одному из глобальных минимумов x^* задачи. Использовалось $\varepsilon = 10^{-5}(b - a)$. При этом собственный критерий останова метода не применялся. Если задача оказывалась не решенной, полагалось $K_t = K$. Операционные характеристики метода построены по набору значений K_1, \dots, K_{200} и отражают зависимость $P(k)$ доли P решенных задач от числа выполненных измерений k .

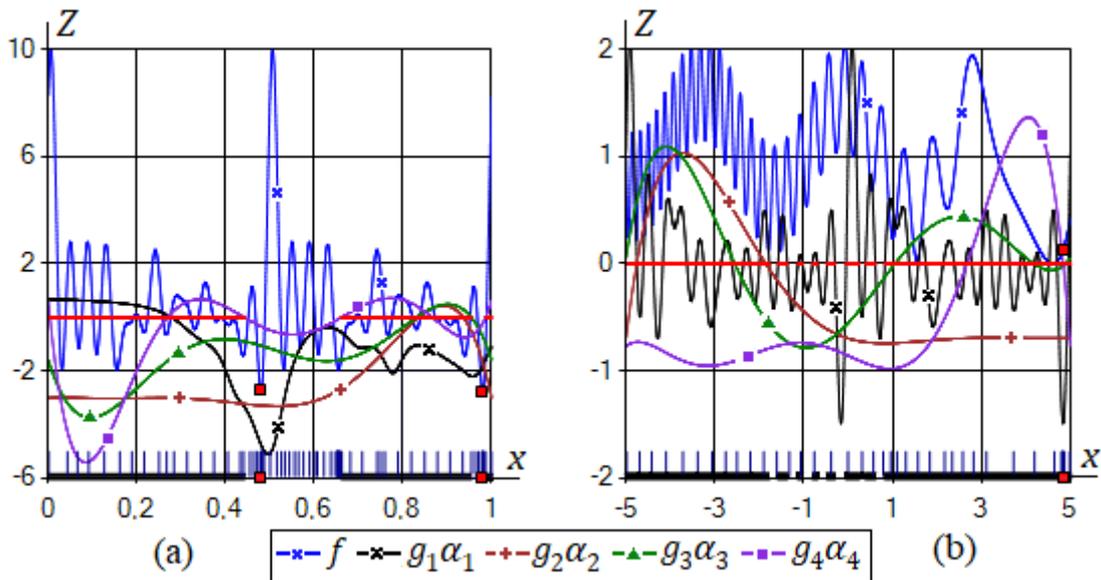


Рис. 1 – Виды функций: (а) задачи № 2 тестового набора A; (б) задачи № 132 набора B после масштабирования функций ограничений от g_1 до g_4 множителями α_j . В задаче № 2 множители: 1.5, 4000, 50, 250; в задаче № 132 — 0.3, 1000, 2000, 50. Красными маркерами отмечены условные глобальные минимумы задач. Красные отрезки на уровне $Z = 0$ и жирные черные отрезки на нижней кромке рисунка выделяют недопустимые подобласти. Вертикальные черточки снизу – координаты измерений, выполненных методом SimplePM до обнаружения глобального минимума с заданной точностью (в задаче № 2 79, в № 132 40 измерений).

Вид операционных характеристик зависит от значений параметров методов. Поэтому для сравнения методов по операционным характеристикам для каждого метода из их множества выбрана одна основная. Использован принцип сравнения методов по характеристикам, построенным при наилучших для метода параметрах.

Для формализации понятия «наилучшие параметры» введены числовые показатели операционной характеристики: k_{100}, k_{95}, k_{90} – значения k , соответствующие долям в 100%, 95% и 90% решенных задач, а также \bar{K} – медианное среднее из значений K_1, \dots, K_{200} и $\overline{\Delta K}$ – медианное среднее модулей отклонений $|\bar{K} - K_t|$. В качестве основного использован критерий k_{100} , если он не определен, – k_{95} и т.д. В пространстве параметров метода выполнен покоординатный поиск. Для методов парабол варьировались параметры $\gamma_f, \gamma_g, k^*, \beta, \nu$. Для индексного метода – параметры $\gamma_f, \gamma_g, \varepsilon_{res}$. Данные таблицы на примере метода SimplePM для тестовой выборки A иллюстрирует этапы улучшения значений показателей качества при изменении очередного параметра метода.

Таблица – Улучшения показателей метода SimplePM в процессе изменения начальных параметров $\gamma_f = \gamma_g = 2.1, k^* = 50, \beta = 0.2, \nu = 0.01$

№	Измененный параметр и его лучшее значение	k_{100}	k_{95}	k_{90}	Медианное среднее \bar{K}	Медианное среднее отклонение $\overline{\Delta K}$
1	начальные	471	87	84	55.5	10.5
2	$\gamma_f = \gamma_g = 3.4$	135	78	77	57	9
3	$\nu = 0.2$	104	78	77	57	8
4	$\beta = 0.2$	104	78	77	57	8
5	$k^* = 50$	104	78	77	57	8

Заметим, что отклонения от указанных в строках 4 и 5 таблицы значений параметров β и k^* приводит к существенному ухудшению значений критерия k_{100} , например, значение $\beta = 0$, отключающее в (5) локализацию, увеличивает k_{100} с 104 до 271, а $\beta = 0.5$ — до 218. Итоги аналогичных расчетов на тестовой выборке A для всех трех методов приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Оптимальные параметры и показатели качества на выборке A из 200 задач для методов: 1–SimplePM, 2–TransformPM, 3–индексный

Метод	γ_f	γ_g	ν	k^*	β	ε_{res}	k_{100}	k_{95}	k_{90}	\bar{K}	$\overline{\Delta K}$
1	3.4	3.4	0.2	50	0.2	—	104	78	77	57	8
2	4.0	4.0	0.3	50	0.2	—	109	85	84	62	9
3	1.9	5.3	—	—	—	10^{-5}	—	323	322	208	47.5

Заметим, что показатели качества у TransformPM хуже, чем у SimplePM.

Для индексного метода с -резервированием на тестовой выборке A не удалось найти значения параметров, обеспечивающих решение 100% задач. Найденные для него оптимальные значения критериев качества заметно хуже показателей методов парабол. Возможное объяснение связано с тем, что функции ограничений в тестовых выборках существенно разномасштабные (см. показанные в подписи к рис.1 коэффициенты α_i), причем выравнивающие масштабирующие множители для ограничений с одинаковыми номерами могут изменяться на 1 – 2.5 порядка при переходе от одной задачи к другой. В силу принятых в индексном методе правил построения характеристик $R(I_i)$, такая особенность в структуре задач может создавать сложности в работе метода. Операционные характеристики методов на двух тестовых наборах A и B представлены в сравнении на рис. 2.

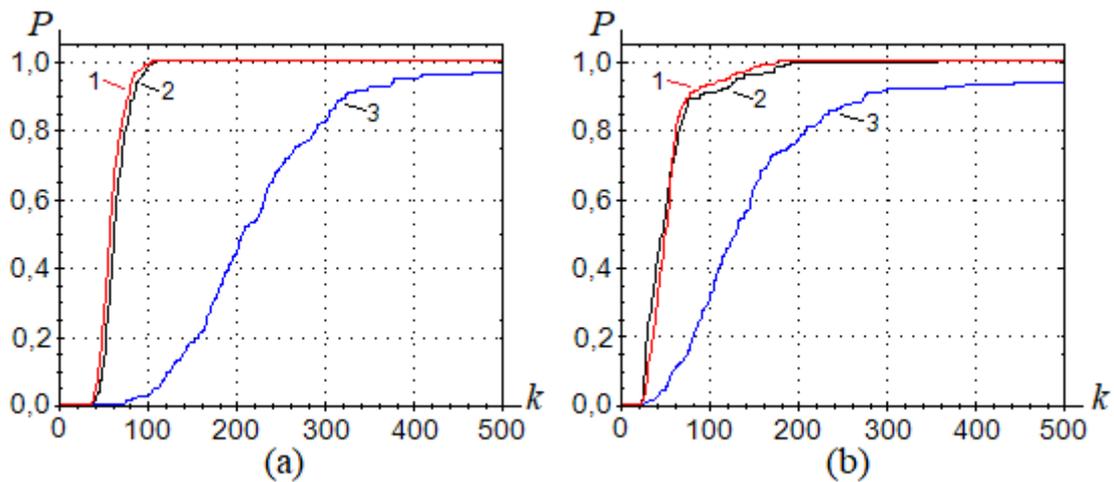


Рис. 2 – Зависимость доли P решенных задач от числа измерений k :
 (1) – для SimplePM; (2) – для TransformPM; (3) – для индексного метода.
 (a) – на тестовом наборе A , (b) – на тестовом наборе B . Использованы оптимальные для методов значения параметров из табл. 2 и 3

Таблица 3 – Оптимальные параметры и показатели качества на выборке B из 200 задач для методов: 1–SimplePM, 2–TransformPM, 3–индексный

Метод	γ_f	γ_g	ν	k^*	β	ε_{res}	k_{100}	k_{95}	k_{90}	\bar{K}	$\overline{\Delta K}$
1	3.4	3.0	0.1	50	0.1	—	147	61	60	43	9
2	3.4	3.0	0.2	50	0.1	—	158	72	72	51	11
3	1.9	2.5	—	—	—	10^{-5}	—	266	263	117.5	42.5

Заключение

Разработанный генератор гладких многоэкстремальных тестовых задач с невыпуклыми ограничениями позволяет повторно синтезировать разнообразные представительные тестовые наборы задач с регулируемым уровнем сложности и выполнять на них объективное сравнение методов условной глобальной оптимизации. Два предложенных метода парабол, построенные для класса функций с невычислимыми липшицевыми производными, показали существенно более высокую эффективность по сравнению с известным индексным методом, разработанным для класса липшицевых функций. На использованных тестовых наборах по критерию k_{95} наблюдается выигрыш более чем в 4 раза. Выделен наиболее эффективный метод – SimplePM, он же является вычислительно менее затратным. Его рекомендуется использовать в многомерных обобщениях.

Список литературы

1. *Lera D., Sergeyev Ya.D.* Acceleration of univariate global optimization algorithms working with Lipschitz functions and Lipschitz first derivatives // *SIAM Journal on Optimization*. 2013. V. 23, № 1. P. 508–529.
2. *Сергеев Я.Д., Квасов Д.Е.* Диагональные методы глобальной оптимизации. – М.: Физматлит, 2008. 352 с.
3. *Городецкий С.Ю.* Триангуляционные методы параболоидов в задачах многоэкстремальной оптимизации с ограничениями для класса функций с липшицевыми производными по направлениям // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 2012. № 1 (1). С. 144–155.
4. *Famularo D., Sergeyev Ya.D., Pugliese P.* Test Problems for Lipschitz univariate global optimization with multiextremal constraints // *Stochastic and Global Optimization* / Eds. G. Dzemyda, V. Saltenis, and A. Zilinskas. – Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002. P. 93-110.
5. *Городецкий С.Ю., Гришагин В.А.* Нелинейное программирование и многоэкстремальная оптимизация. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2007.
6. *Городецкий С.Ю.* Несколько подходов к обобщению метода DIRECT на задачи с функциональными ограничениями // *Математическое моделирование. Оптимальное управление*. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 2013, № 6(1). С. 189-215.
7. *Стронгин Р.Г., Маркин Д.Л.* Минимизация многоэкстремальных функций при невыпуклых ограничениях // *Кибернетика*, 1986. № 4. С. 64
8. *Стронгин Р.Г., Баркалов К.А.* О сходимости индексного алгоритма в задачах условной оптимизации с ϵ -резервированными решениями // В сб.: *Математические вопросы кибернетики*. – М.: Наука, 1999. С. 273–278.
9. *Гришагин В.А.* Операционные характеристики некоторых алгоритмов глобального поиска // *Проблемы случайного поиска*. – Рига: Зинатне, 1978. № 7. С. 198-206.

05.13.11

В.Д. Петелина канд. физ. - мат. наук

ФГБОУ ВО НИУ «Московский Государственный Строительный Университет»,
Институт Фундаментального Образования,
кафедра прикладной математики,
Москва, verapetelina51@gmail.com

О РЕШЕНИИ РЕГУЛЯРИЗИРОВАННЫХ УРАВНЕНИЙ ВОЗМУЩЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА

Настоящая статья посвящена определению возмущений первого и второго порядка в прямоугольных координатах и составляющих скорости движения тела. С этой целью была построена специальная система дифференциальных уравнений возмущенного движения, правые части которой представляют собой конечные многочлены по степеням независимой регуляризирующей переменной. Данная система позволяет создать единый алгоритм для определения возмущений первого и второго порядка в виде конечных многочленов по степеням регуляризирующих переменных, которые выбираются на каждом шаге аппроксимации. По результатам расчетов с использованием разработанного метода были получены коэффициенты аппроксимирующих многочленов, представляющих собой прямоугольные координаты, а также составляющие регуляризированной скорости тела. Разработанный метод позволяет при помощи аппроксимирующих многочленов вычислять любую промежуточную точку траектории движения тела.

Ключевые слова: *система дифференциальных уравнений возмущенного движения тела, регуляризирующая независимая переменная, возмущение, многочлен, приближение.*

Одной из важнейших задач, связанных с траекторными измерениями, является определение частных производных прямоугольных координат, составляющих скорости движения тела по начальным условиям. В работе [1] были введены вспомогательные функции, представляющие собой степенные ряды относительно вспомогательной переменной. Кроме того, в работе [2] были изложены способы использования универсальных переменных в ряде задач механики для определения возмущений методом вариации произвольных постоянных. При этом в качестве оскулирующих переменных рассматривались компоненты начальных значений радиуса-вектора и скорости. Новые методы определения возмущений сохраняют стандартные черты классических методов, при вычислении возмущений используется метод малого параметра, позволяющий получить асимптотические разложения решения. В последнее время более широкое применение для интегрирования дифференциальных уравнений получил способ Пикара, который приводит к сходящемуся процессу последовательных приближений, дающему решение системы дифференциальных уравнений.

Погрешность решения зависит от точности исходного приближения возмущающей функции. В работе [2] были проанализированы общие принципы развития теории возмущений в координатах, а также изучено использование регуляризирующих переменных для расчета траекторий движения. Результаты проведенного исследования показывают, что использование регуляризирующих переменных повышает точность расчетов и значительно сокращает время вычислений.

Одной из важных проблем в механике является приближение прямоугольных координат, составляющих регуляризированной скорости и времени движения тела алгебраическими многочленами по степеням вспомогательной переменной наименьшей степени с любой наперед заданной степенью точности.

В настоящей статье строится специальная система дифференциальных уравнений возмущенного движения тела. Указанная система интегрируется методом последовательных приближений, который дает представление прямоугольных координат и составляющих скорости тела в виде многочленов по степеням некоторой, особым образом введенной вспомогательной переменной, которая выбирается на каждом этапе приближения.

В работе [5] были найдены уравнения, связывающие прямоугольные координаты тела, составляющие регуляризированной скорости и время с вспомогательными переменными C_i в виде:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \sum_{i=1}^7 C_i \cdot q_1^{(i)} & x' &= x_0' + \sum_{i=1}^7 C_i \cdot q_4^{(i)} \\ y &= y_0 + \sum_{i=1}^7 C_i \cdot q_2^{(i)} & y' &= y_0' + \sum_{i=1}^7 C_i \cdot q_5^{(i)} \\ z &= z_0 + \sum_{i=1}^7 C_i \cdot q_3^{(i)} & z' &= z_0' + \sum_{i=1}^7 C_i \cdot q_6^{(i)} \\ t &= t_0 + \sum_{i=1}^7 C_i \cdot q_7^{(i)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $q_i^{(k)} (i, k = 1, \dots, 7)$ - частные решения уравнений в вариациях регуляризированных уравнений задачи 2-х тел. Для нахождения частных решений $q_i^{(k)} (i, k = 1, \dots, 7)$ необходимо продифференцировать общее решение регуляризированных уравнений невозмущенной задачи 2-х тел по начальным данным $\xi_0, \eta_0, \zeta_0, \xi_0', \eta_0', \zeta_0', t_{00}$.

В работе [6] были найдены следующие уравнения для определения возмущений 1-го порядка в величинах C_i

$$C_i = \frac{\mu_1}{\mu} \cdot \frac{\rho_0^2}{a_1^2} \cdot \int_{-1}^u \left[\frac{a_1^3}{\Delta_1^3} \cdot (E_{ix}^* \cdot \frac{x_1 - x_0}{a_1} + E_{iy}^* \cdot \frac{y_1 - y_0}{a_1}) + \frac{a_1^3}{r_1^3} \cdot (-E_{ix}^* \cdot \frac{x_1}{a_1} - E_{iy}^* \cdot \frac{y_1}{a_1}) \right] \cdot \frac{d\beta}{du} \cdot du, \quad (2)$$

($i=1,2,4,5,7$)

$$C_i = \frac{\mu_1}{\mu} \cdot \frac{\rho_0^2}{a_1^2} \cdot \int_{-1}^u \left[\frac{a_1^3}{\Delta_1^3} \cdot E_{iz}^* \cdot \frac{z_1 - z_0}{a_1} + \frac{a_1^3}{r_1^3} \cdot (-E_{iz}^*) \cdot \frac{z_1}{a_1} \right] \cdot \frac{d\beta}{du} \cdot du, \quad (3)$$

($i=3,6$)

где $E_{ix}^*, E_{iy}^*, E_{iz}^*$ - вспомогательные переменные, представляющие многочлены по степеням регуляризирующей переменной β

x_1, y_1, z_1 - координаты возмущающего тела, x_0, y_0, z_0 - координаты исследуемого тела в невозмущенном движении.

Таким образом, выражение для величин C_i можно представить в виде

$$C_i = \int_{-1}^u \frac{S_i(u)}{(1-u)^2} du \quad (i=1,2,4,5,7) \quad (4)$$

где

$$S_i(u) = \frac{\mu_1}{\mu} \cdot \frac{\rho_0^2}{a_1^2} \cdot \left[\frac{a_1^3 \cdot G_1(u)}{1-u} \cdot \left(E_{ix}^* \cdot \frac{x_1 - x_0}{a_1} + E_{iy}^* \cdot \frac{y_1 - y_0}{a_1} \right) + \frac{a_1^3}{r_1^3} \cdot \left(-E_{ix}^* \cdot \frac{x_1}{a_1} - E_{iy}^* \cdot \frac{y_1}{a_1} \right) \right] \cdot \frac{d\beta}{du} \quad (5)$$

$$\frac{d\beta}{du} = \frac{1}{2} \beta_1.$$

Функции E_{ix}^*, E_{iy}^* можно представить с помощью соотношения $\beta = \frac{1}{2} \cdot \beta_1 \cdot (1+u)$, в виде многочленов по степеням нормированной регуляризирующей переменной u , причем при

$u=1$, $\beta = \beta_1$, $\beta_1 = \sqrt{2 \cdot \frac{r}{\rho_0} - 1}$ Величина β_1 соответствует моменту соударения исследуемого тела с возмущающим телом. Тогда функции $S_i(u)$ представляются многочленами по степеням u в виде

$$S_i(u) = \sum_{k=0}^{n_5} S_{ik} \cdot u^k + \varepsilon(S_i, n_5), \tag{6}$$

а функции $C_i(u)$ для траекторий попадания в возмущающее тело имеют вид

$$C_i(u) = \int_{-1}^u \frac{S_{i0}}{(u-1)^2} du + \int_{-1}^u \frac{S_{i1} \cdot u}{(u-1)^2} du + \dots + \int_{-1}^u \frac{S_{ik} \cdot u^k}{(u-1)^2} du + \dots \tag{7}$$

Введем новую регуляризующую переменную:

$$w = 1 - u \tag{8}$$

Тогда выражения (7) будут иметь вид:

$$C_i(1-w) = - \int_2^w \frac{S_{i0} \cdot dw}{w^2} - \int_2^w \frac{S_{i1} \cdot (1-w) \cdot dw}{w^2} - \dots - \int_2^w \frac{S_{ik} \cdot (1-w)^k \cdot dw}{w^2} - \dots \tag{9}$$

Обозначим:

$$C_i(1-w) = \tilde{C}_i(w), \tag{10}$$

Таким образом, возмущения первого порядка во вспомогательных величинах \tilde{C}_i имеют вид:

$$\tilde{C}_i(w) = \frac{P_{i0}}{w} + P_{i1} \cdot \ln w + Q_i(w) + \varepsilon(Q_i), \tag{11}$$

$$Q_i(w) = \sum_{k=0}^{n_6} Q_{ik} \cdot w^k + \varepsilon(Q_i, n_6) \tag{12}$$

Частные решения уравнений в вариациях регуляризованных уравнений задачи 2-х тел представлены в работе [5] в виде многочленов по степеням регуляризующей переменной β . Подставляя выражение $\beta = \frac{1}{2} \cdot \beta_1 \cdot (1 + u)$, в выражения $q_i^{(k)}(\beta)$, получим частные решения $q_i^{(k)}$ в виде многочленов по степеням регуляризующей переменной u , затем подставляя в полученные выражения $q_i^{(k)}$ выражения (8), получим частные решения $q_i^{(k)}$ в виде многочленов по степеням регуляризующей переменной w . Аналогичной подстановкой получают многочлены невозмущенного движения $x_0, y_0, x'_0, y'_0, t_0$ по степеням переменной w . Подставляя полученные выражения в формулы (1) получим прямоугольные координаты x, y , составляющие регуляризованной скорости x', y' , время t в 1-ом приближении в следующем виде

$$\begin{aligned} x &= \frac{A_1}{w} + R_x(w) \cdot \ln w + R_{x1}(w) + \varepsilon(R_{x1}, n^*) \\ y &= \frac{A_2}{w} + R_y(w) \cdot \ln w + R_{y1}(w) + \varepsilon(R_{y1}, n^*) \\ x' &= \frac{A_3}{w} + R_{x'}(w) \cdot \ln w + R_{x'1}(w) + \varepsilon(R_{x'1}, n^*) \\ y' &= \frac{A_4}{w} + R_{y'}(w) \cdot \ln w + R_{y'1}(w) + \varepsilon(R_{y'1}, n^*) \\ t &= \frac{A_5}{w} + R_t(w) \cdot \ln w + R_{t1}(w) + \varepsilon(R_{t1}, n^*), \end{aligned} \tag{13}$$

где $R_x, R_{x1}, R_y, R_{y1}, R_{x'}, R_{x'1}, R_{y'}, R_{y'1}, R_t, R_{t1}$ - многочлены по степеням w , причем погрешности могут быть сделаны сколь угодно малыми при выборе соответствующего значения n^* . В выражениях (13) для прямоугольных координат, составляющих регуляризованной скорости и времени возмущенного движения космического аппарата присутствуют члены при $\frac{1}{w}$ и $\ln w$. Введем новую регуляризирующую переменную v_1 следующим образом:

$$\ln w = \alpha_1 \cdot v_1 + \beta_1 \quad (14)$$

$$w^{-1} = e^{-\alpha_1 v_1 - \beta_1} = e^{-\beta_1} \cdot \left(1 - \frac{\alpha_1 v_1}{1!} + \frac{\alpha_1^2 v_1^2}{2!} - \frac{\alpha_1^3 v_1^3}{3!} + \dots + \frac{(-1)^n \alpha_1^n v_1^n}{n!} + \dots\right) \quad (15)$$

Таким образом, подставляя соотношения (14) и (15) в выражения (13), имеем, что прямоугольные координаты x, y, z , составляющие регуляризованной скорости x', y', z' , время t - являются целыми функциями новой регуляризирующей переменной v_1 , что дает возможность представить указанные функции конечными многочленами с наперед заданной степенью точности.

Определим величины α_1 и β_1 из граничных условий, которые имеют вид при $u = u^*, v_1 = 1$, при $u = -1, v_1 = -1$. Значение регуляризирующей переменной u^* или соответственно w^* согласуется с моментом вхождения исследуемого тела в сферу действия возмущающего тела и $u^* < 1, w^* < 1$. Имеем:

$$\begin{cases} 1 - u^* = e^{\alpha_1 + \beta_1} \\ 2 = e^{\beta_1 - \alpha_1} \end{cases} \quad (16)$$

причем $\alpha_1 < \beta_1$.

Функциональная схема расчета возмущений 1-го порядка по аналитической методике состоит из следующих основных блоков. Первый блок состоит в построении многочленов, представляющих координаты возмущающего тела, координаты, составляющие регуляризованной скорости и время невозмущенного движения исследуемого тела по степеням нормированной регуляризирующей переменной u . Результаты расчетов представляют коэффициенты соответствующих многочленов.

Второй блок состоит в представлении квадрата взаимного расстояния между исследуемым телом и возмущающим телом Δ_1^2 в виде многочлена по степеням независимой регуляризирующей переменной u .

В третьем блоке программы производится нахождение корней уравнения $\Delta_1^2 = 0$ с помощью итераций, т.е. определение тех значений независимой регуляризирующей переменной u , при которых происходит соударение исследуемого тела с возмущающим телом и которые будем называть особыми точками. Проведен численный анализ ближайшей пары особых точек около основного отрезка изменения регуляризирующей переменной u , который показал, что для траекторий попадания в возмущающее тело такой особой точкой является точка $u = 1$, при которой расстояние от исследуемого тела до возмущающего тела обращается в нуль, остальные пары особых точек, которые являются комплексно-сопряженными, находятся на значительных расстояниях. Построены многочлены,

$$F_1(u) = \frac{\Delta_1(u)}{(u-1)^2} \quad \text{и} \quad G_1(u) = \frac{1}{F_1(u)^{3/2}} \quad (17)$$

по степеням регуляризирующей переменной u . Результаты представляют коэффициенты соответствующих многочленов.

Четвертый блок программы состоит в определении главной части возмущений C_i^* во

вспомогательных переменных C_i в виде разложений по функциям $S_i(u)$

$$C_i(u) = \int_{-1}^u \frac{S_{ik} \cdot u^k \cdot du}{(u-1)^2} \tag{18}$$

$$C_i^* = \frac{\mu_1 \cdot \rho_0}{\mu} \cdot \int_{-1}^u \frac{a_1 \cdot G_1(u)}{1-u} \cdot (E_{ix}^* \cdot \frac{x_1 - x_0}{a_1} + E_{iy}^* \cdot \frac{y_1 - y_0}{a_1}) \cdot \frac{d\beta}{du} \cdot du, \tag{19}$$

Функции E_{ix}^* и E_{iy}^* есть безразмерные множители в отношении D_{ik}/D , где D - определитель фундаментальной матрицы частных решений уравнений в вариациях регуляризованных уравнений задачи 2-х тел [5], D_{ik} - соответствующие алгебраические дополнения матрицы частных решений. Производится введение новой регуляризирующей переменной w и определение главной части возмущений C_i^* во вспомогательных переменных C_i в полиномиально-трансцендентной форме относительно регуляризирующей переменной w . Пятый блок программы представляет определение косвенной части возмущений C_i^{**} во вспомогательных переменных C_i

$$C_i^{**} = \frac{\mu_1 \cdot \rho_0^2}{\mu} \cdot \int_{-1}^u \frac{a_1}{r_1^3} \cdot (-E_{ix}^* \cdot \frac{x_1}{a_1} - E_{iy}^* \cdot \frac{y_1}{a_1}) \cdot \frac{d\beta}{du} \cdot du, \tag{20}$$

в виде многочленов по степеням регуляризирующей переменной w и определение общих возмущений во вспомогательных переменных C_i в полиномиально-трансцендентной форме относительно переменной w .

Шестой блок программы состоит в определении частных решений $q_i^{(k)}$ уравнений в вариациях регуляризованных уравнений задачи 2-х тел в виде многочленов по степеням регуляризирующей переменной w и определении прямоугольных координат, составляющих регуляризованной скорости и времени возмущенного движения исследуемого тела в 1-ом приближении в полиномиально-трансцендентной форме относительно независимой регуляризирующей переменной w . Результаты расчетов представляют коэффициенты соответствующих многочленов.

Седьмой блок программы состоит в определении прямоугольных координат, составляющих регуляризованной скорости и времени возмущенного движения исследуемого тела в виде многочленов по степеням новой регуляризирующей переменной v_1 , введенной с помощью соотношения (14).

Таким образом, путем ряда замен независимой переменной возмущения 1-го порядка в прямоугольных координатах, составляющих регуляризованной скорости и времени движения тела представлены в виде конечных многочленов сравнительно низкой степени относительно регуляризирующей переменной с достаточно высокой степенью точности. На каждом этапе вычислений производилось снижение степени соответствующих многочленов с помощью многочленов Чебышева и контроль результатов вычислений по начальной и конечной точке. Дополнительно было проведено нормирование регуляризирующей переменной w с целью снижения степени многочленов, представляющих искомые функции с заданной степенью точности на отрезке $-1, 1$.

Предложенная методика может быть использована при моделировании деформирования металлической гофрированной наружной обшивки панелей и внутренней обшивки из алюминиевой фольги. При разработке методики расчета многослойных строительных конструкций, подвергающихся воздействию ударных волн, а так же при исследовании строительных сооружений в частности поперечного изгиба консолей, при моделировании напряжений и деформаций в элементах конструкций при действии статических нагрузок различной величины и конфигурации. Так же методика может быть использована при расчете конструкции на действие сейсмических сил.

Список литературы

1. *Goodyear W.H.* A general method of variation of parameters for numerical integration // *Astron. J.* – 1965. Vol. 70, №5. – P. 524-526.
2. *Herrick S.* Universal variables // *Astron. J.* – 1965. Vol. 70, №4. – P. 309-315.
3. *Broucke R.* Perturbations in rectangular coordinates by iteration // *Celest. Mech.* – 1969. Vol. 1, №1. – P. 110-129.
4. *Szebehely U., Pierce D., Standish S.* A group of Earth to Moon trajectories with consecutive collisions // *Celest. Mech. and Astrodyn.* – 1964. Vol.14. – P. 35-51.
5. *Яров-Яровой М.С.* Аналитическая теория движения космического корабля к Луне // *Труды гос. астроном. инст. им. П. К. Штернберга.* –1967. – Т. 36. – С. 24-160.
6. *Petelina V.D.* About choosing the form of perturbed body motion differential equations system // *IOP Conf. Ser: Mater. Sci. and Eng.* – 2018. Vol. 456 – P. 012123.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ (05.13.18)**

05.13.18

Т.Н. Бобылева канд. физ. - мат. наук

Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет,
институт фундаментального образования,
кафедра прикладной математики,
Москва, bobylevatn@mgsu.ru

**ЭФФЕКТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ СЛОИСТОГО УПРУГО-ПОЛЗУЧЕГО МАССИВА
С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ШАХТОЙ**

В статье используются теории наследственной ползучести и усреднения для определения напряжений в слоистом упруго-ползучем массиве с вертикальной шахтой. Предложен способ получения усредненных (эффективных) упруго-ползучих характеристик и усредненного поля напряжений по известным свойствам слоев. Задача о неоднородном упруго-ползучем массиве сводится к задаче об однородной трансверсально-изотропной среде. Дано аналитическое решение определения напряженного состояния данного массива для различных краевых условий на поверхности шахты.

Ключевые слова: *усреднение, ползучесть, слоистый массив.*

Строительство сооружений на основаниях из горных пород – это серьезная задача, при решении которой требуется оценка напряженного состояния пород и их реакций на различные механические воздействия. Большинство горных пород имеет неоднородную, в частности, слоистую структуру. Как показывают эксперименты, свойства структурно-неоднородных материалов могут значительно отличаться от свойств отдельных компонент, входящих в их состав. Уравнения теории упругости при решении подобных задач содержат быстро меняющиеся коэффициенты, которые характеризуют свойства отдельных составляющих массива. Это существенно затрудняет решение данных краевых задач. Поэтому для определения напряженно-деформированного состояния такого горного массива может быть использован метод асимптотического усреднения [1,2], который позволяет свести поставленную задачу к задаче для однородной среды с усредненными уравнениями, содержащими постоянные, “эффективные” коэффициенты. При условии, что отдельные слои, образующие горный массив, являются изотропными, полученная однородная среда будет анизотропной. Кроме того, является актуальной для практики как наземного, так и подземного строительства задача изучения реологических свойств пород, исследование их ползучести, так как ползучесть влияет на перераспределение напряжений в массиве. Характерной особенностью реологических процессов является зависимость наблюдаемой в данный момент деформации от характера всего предшествующего процесса нагружения. Это свойство материалов называется наследственностью. Наследственная теория широко используется в механике горных пород, потому что она удовлетворительно согласуется с опытом [3]. Примеры применения теорий усреднения и наследственности даны в [4-6].

В рассматриваемой задаче полубесконечный слоистый массив, ограниченный горизонтальной плоскостью, состоит из попарно чередующихся, параллельных этой плоскости, слоев из однородных упруго-ползучих материалов. В данном массиве имеется вертикальная шахта кругового поперечного сечения радиуса R . Целью работы является определение напряженного состояния массива.

Уравнения состояния в данном случае имеют вид [6]:

$$-\frac{\partial}{\partial x_k} (a_{ijkh} \delta(t) + d_{ijkh}) * \frac{\partial u_j}{\partial x_h} = f_i(x, t), \quad (i, j, k, h = 1 \div 3). \quad (1)$$

В (1) символ * означает оператор свертки:

$$\left(d_{ijkh}(x, t) * \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right) = \int_0^t d_{ijkh}(x, t - \tau) \frac{\partial u_j(x, \tau)}{\partial x_k} d\tau.$$

Здесь u_j ($j = 1, 2, 3$) - компоненты перемещений, $\delta(t)$ - дельта-функция Дирака, операция $(a_{ijkh} \delta(t)) *$ эквивалентна умножению на $a_{ij} \delta_k$ (выполняется суммирование по повторяющимся индексам), $f_i(x, t)$ - компоненты вектора массовых сил. Тензоры в (1) имеют следующий вид [1, 6]:

$$a_{ijkh} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kh} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jh} + \delta_{ih} \delta_{jk}), \quad d_{ijkh} = -(D_v(t) - \frac{1}{3} D_s(t)) \delta_{ij} \delta_{kh} - \frac{1}{2} D_s(t) (\delta_{ik} \delta_{jh} + \delta_{ih} \delta_{jk}),$$

где D_s и D_v - регулярные части ядер сдвиговой и объемной релаксации, δ_{ij} - символ Кронекера. Предположим, что амплитуда ядра объемной релаксации пропорциональна амплитуде ядра сдвиговой с коэффициентом пропорциональности k_i для каждого слоя $(D_v)_i = k_i (D_s)_i$, $k_i = \text{const}$, $k > 0$, $(i = 1, 2)$. Далее D_s обозначено как D . Выбрана цилиндрическая система координат (r, φ, z) с осью oz , направленной вертикально вниз. Центр верхнего кругового сечения шахты совпадает с ее началом. Отношение толщины одного слоя к периоду ε обозначено через h , следовательно, отношение толщины другого слоя к периоду будет $1 - h$ ($0 < h < 1$), $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ - компоненты напряжений, e_r, e_θ, e_z - компоненты деформаций, u_r, u_θ, u_z - перемещения, λ_i, μ_i - постоянные Ламе, D_i - ядра релаксации для каждого слоя ($i = 1, 2$). Предположим, что поверхность шахты свободна от нагрузок, а именно $\sigma_r = 0, \sigma_{rz} = 0$ при $r = R$. Условия на горизонтальной граничной поверхности массива: $\sigma_z = 0, \sigma_{rz} = 0$ при $z = 0$. Кроме того, на горизонтальных граничных поверхностях слоев выполняются условия идеального контакта: компоненты перемещений u_r, u_z и нормальная компонента напряжений σ_z непрерывны на всех плоскостях контакта слоев $[u_r] = 0, [u_z] = 0, [\sigma_z] = 0$.

В задаче все модули упругости удельный вес и ядра релаксации являются периодическими и кусочно-постоянными функциями переменной $\xi = \frac{z}{\varepsilon}$, то есть имеют следующий вид ($i = 1, 2$):

$$\lambda_i = \begin{cases} \lambda_1, \xi \in [0; h], \\ \lambda_2, \xi \in [1-h; 1], \end{cases} \quad \mu_i = \begin{cases} \mu_1, \xi \in [0; h], \\ \mu_2, \xi \in [1-h; 1], \end{cases} \quad \gamma_i = \begin{cases} \gamma_1, \xi \in [0; h], \\ \gamma_2, \xi \in [1-h; 1], \end{cases} \quad D_i = \begin{cases} D_1, \xi \in [0; h], \\ D_2, \xi \in [1-h; 1] \end{cases}.$$

Выберем ядра ползучести экспоненциального типа для каждого слоя: $D_i = d_i e^{-\alpha_i t}$, где α_i, d_i - постоянные, $\alpha_i > 0, d_i > 0$, ($i = 1, 2$), t - время. Как показывают эксперименты, такие ядра хорошо описывают поведение упруго-ползучего массива для длительных промежутков времени.

Применяя преобразование Лапласа по времени к уравнению (1)

$$\tilde{f}(p) = \int_0^\infty f(t) e^{-pt} dt,$$

получим систему уравнений теории упругости с комплексным параметром p , для которой используем метод усреднения, описанный в [1, 2]. В результате имеем трансверсально-изотропную однородную среду со следующей симметричной матрицей эффективных коэффициентов:

$$\begin{pmatrix} \langle \tilde{c}_{11} \rangle & \langle \tilde{c}_{12} \rangle & \langle \tilde{c}_{13} \rangle & 0 & 0 & 0 \\ & \langle \tilde{c}_{22} \rangle & \langle \tilde{c}_{23} \rangle & 0 & 0 & 0 \\ & & \langle \tilde{c}_{33} \rangle & 0 & 0 & 0 \\ & & & \langle \tilde{c}_{44} \rangle & 0 & 0 \\ & & & & \langle \tilde{c}_{55} \rangle & 0 \\ & & & & & \langle \tilde{c}_{66} \rangle \end{pmatrix} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \langle \tilde{c}_{11} \rangle = \langle \tilde{c}_{22} \rangle &= L - \frac{G_1 h}{p + \alpha_1} - \frac{G_2(1-h)}{p + \alpha_2} - \\ &= \frac{h(1-h) \{ [\lambda_2(p + \alpha_2) - j_2](p + \alpha_1) - [\lambda_1(p + \alpha_1) - j_1](p + \alpha_2) \}^2}{\{ [L_2(p + \alpha_2) - G_2]h(p + \alpha_1) + [L_1(p + \alpha_1) - G_1](1-h)(p + \alpha_2) \} (p + \alpha_1)(p + \alpha_2)}, \\ \langle \tilde{c}_{12} \rangle &= l - \frac{j_1 h}{p + \alpha_1} - \frac{j_2(1-h)}{p + \alpha_2} - \\ &= \frac{h(1-h) \{ [\lambda_2(p + \alpha_2) - j_2](p + \alpha_1) - [\lambda_1(p + \alpha_1) - j_1](p + \alpha_2) \}^2}{\{ [L_2(p + \alpha_2) - G_2]h(p + \alpha_1) + [L_1(p + \alpha_1) - G_1](1-h)(p + \alpha_2) \} (p + \alpha_1)(p + \alpha_2)}, \\ \langle \tilde{c}_{13} \rangle = \langle \tilde{c}_{23} \rangle &= \\ &= \frac{[\lambda_1(p + \alpha_1) - j_1]h[L_2(p + \alpha_2) - G_2] + [\lambda_2(p + \alpha_2) - j_2](1-h)[L_1(p + \alpha_1) - G_1]}{[L_2(p + \alpha_2) - G_2]h(p + \alpha_1) + [L_1(p + \alpha_1) - G_1](1-h)(p + \alpha_2)}, \\ \langle \tilde{c}_{33} \rangle &= \frac{[L_1(p + \alpha_1) - G_1][L_2(p + \alpha_2) - G_2]}{[L_2(p + \alpha_2) - G_2]h(p + \alpha_1) + [L_1(p + \alpha_1) - G_1](1-h)(p + \alpha_2)}, \\ \langle \tilde{c}_{44} \rangle = \langle \tilde{c}_{55} \rangle &= \frac{[\mu_1(p + \alpha_1) - g_1][\mu_2(p + \alpha_2) - g_2]}{[\mu_2(p + \alpha_2) - g_2]h(p + \alpha_1) + [\mu_1(p + \alpha_1) - g_1](1-h)(p + \alpha_2)}, \\ \langle \tilde{c}_{66} \rangle &= M - \frac{g_1 h}{p + \alpha_1} - \frac{g_2(1-h)}{p + \alpha_2}. \end{aligned}$$

В этих формулах введены обозначения

$$L_i = \lambda_i + 2\mu_i, G_i = d_i \left(k_i + \frac{2}{3} \right), j_i = d_i \left(k_i - \frac{1}{3} \right), g_i = \frac{d_i}{2}, (i = 1, 2),$$

$$L = L_1 h + L_2(1-h), l = \lambda_1 h + \lambda_2(1-h), M = \mu_1 h + \mu_2(1-h).$$

Обращая матрицу эффективных модулей (2), находим матрицу упругих податливостей, далее получаем сначала в образах Лапласа [7], а затем после применения обратного преобразования Лапласа следующие выражения для компонент радиального σ_r и тангенциального σ_θ напряжений упруго-ползучего массива с вертикальной цилиндрической шахтой радиуса R :

$$\begin{aligned} \sigma_r &= - \left[e^{-\frac{L_1 \alpha_1 - G_1}{L_1} t} \frac{(G_1 \lambda_1 - j_1 L_1) h}{L_1^2} + e^{-\frac{L_2 \alpha_2 - G_2}{L_2} t} \frac{(G_2 \lambda_2 - j_2 L_2)(1-h)}{L_2^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\lambda_1 L_2 h + \lambda_2 L_1(1-h)}{L_1 L_2} \delta(t) \right] [\gamma_1 h + \gamma_2(1-h)] z \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right), \\ \sigma_\theta &= - \left[e^{-\frac{L_1 \alpha_1 - G_1}{L_1} t} \frac{(G_1 \lambda_1 - j_1 L_1) h}{L_1^2} + e^{-\frac{L_2 \alpha_2 - G_2}{L_2} t} \frac{(G_2 \lambda_2 - j_2 L_2)(1-h)}{L_2^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\lambda_1 L_2 h + \lambda_2 L_1(1-h)}{L_1 L_2} \delta(t) \right] [\gamma_1 h + \gamma_2(1-h)] z \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right), \\ \sigma_z &= -[\gamma_1 h + \gamma_2(1-h)] z, \quad \sigma_{rz} = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

В формулах (3) γ_i ($i=1,2$) - удельный вес слоев, образующих массив.

Рассмотрим также случай, когда шахта доверху заполнена жидкостью, давление которой на стенки шахты равно qz [7]. Компоненты напряжения σ_r и σ_θ в этом случае будут иметь вид

$$\sigma_r = - \left[e^{-\frac{L_1 \alpha_1 - G_1 t}{L_1}} \frac{(G_1 \lambda_1 - j_1 L_1) h}{L_1^2} + e^{-\frac{L_2 \alpha_2 - G_2 t}{L_2}} \frac{(G_2 \lambda_2 - j_2 L_2)(1-h)}{L_2^2} + \frac{\lambda_1 L_1 h + \lambda_2 L_2 (1-h)}{L_1 L_2} \delta(t) \right] [\gamma_1 h + \gamma_2 (1-h)] z \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{q R^2}{r^2} z,$$

$$\sigma_\theta = - \left[e^{-\frac{L_1 \alpha_1 - G_1 t}{L_1}} \frac{(G_1 \lambda_1 - j_1 L_1) h}{L_1^2} + e^{-\frac{L_2 \alpha_2 - G_2 t}{L_2}} \frac{(G_2 \lambda_2 - j_2 L_2)(1-h)}{L_2^2} + \frac{\lambda_1 L_1 h + \lambda_2 L_2 (1-h)}{L_1 L_2} \delta(t) \right] [\gamma_1 h + \gamma_2 (1-h)] z \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) + \frac{q R^2}{r^2} z.$$

Теперь предположим, что поверхность шахты жестко закреплена, например, трубой, тогда граничные условия на поверхности трубы: $u_r = 0, \sigma_{rz} = 0$, если $r = R$. Массив будет оказывать следующее давление на стенку трубы

$$\sigma_r = - \left[\sum_{i=1}^2 e^{-\frac{L_i \alpha_i - G_i t}{L_i}} \frac{(G_i \lambda_i - j_i L_i) H_i}{L_i^2} + \frac{\lambda_1 L_2 h + \lambda_2 L_1 (1-h)}{L_1 L_2} \delta(t) \right] [\gamma_1 h + \gamma_2 (1-h)] z.$$

Распределение напряжений в этом случае такое же, как в массиве без шахты.

Таким образом, получены характеристики напряженного состояния рассматриваемого массива для разных граничных условий на поверхности шахты.

Список литературы

1. Олейник О.А., Иосифьян Г.А., Шамаев А.С. Математические задачи теории сильно неоднородных сред. - М.: Из-во МГУ, 1990. - С. 94-106.
2. Бардзокас Д.И., Зобнин А.И. Математическое моделирование физических процессов в композиционных материалах периодической структуры. - М.: Едиторал УРСС, 2003. - С. 237-250.
3. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. - М.: Наука, 1977. - С. 97-104.
4. Bobyleva T.N. Method of calculation of stresses in the layered elastic-creeping arrays // MATEC Web Conf. – 2016. Vol. 86. - P. 01024.
5. Bobyleva T.N., Shamaev A.S. Method of approximate calculation of the stress tensor in layered elastic-creeping environments // IFAC-PapersOnLine. – 2018. Vol. 51, № 2. P. 138-143.
6. Шамаев А.С., Шумилова В.В. Усреднение уравнений состояния для гетерогенной среды, состоящей из слоев двух ползучих материалов // Тр. МИАН. – 2016. - Т. 295. - С. 229–240.
7. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. - 2-е изд. - М.: Наука, 1977. - С. 383-385.

05.13.18

Г.М. Гузаиров канд. физ. - мат. наук

Оренбургский государственный педагогический университет,
кафедра математики и методики преподавания математики
Оренбург, gafur.mustafin@mail.ru

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУНКЦИЙ НА С ТИПА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОПЕРАТОРОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ГРУППЫ $GL(2,C)$ В СМЕШАННЫХ БАЗИСАХ

Комбинируя разложения функций на C в комплексные интегралы Фурье и Меллина, мы получим реализацию представлений группы $GL(2,C)$ интегральными операторами представлений в смешанных базисах. Ядра этих интегральных операторов выражаются через произведения двух гипергеометрических рядов Куммера. С этими ядрами получена новая пара взаимно обратных интегральных преобразований функций на C типа интегральных операторов представлений в смешанных базисах.

Ключевые слова: *представления группы Лоренца, интегральные преобразования, комплексные преобразования Фурье, комплексные преобразования Меллина, интегральные операторы представлений, ядра интегральных операторов, гипергеометрические ряды Куммера.*

Под G будем понимать группу комплексных матриц второго порядка:

$$G = GL(2, C) = \left\{ g = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \mid a, b, c, d \in C, \det g \neq 0 \right\}. \tag{G}$$

Представления группы G задают операторы

$$T[N, L; g] \circ f(z) = |ad - bc|^{1-\nu+\lambda+n-l} (ad - bc)^{-n+l} |bz + d|^{-2-2\lambda+2l} (bz + d)^{-2l} f\left(\frac{az + c}{bz + d}\right), \tag{T}$$

действующие в подходящим образом выбранных пространствах Ω_L функций $f(z)$ на C (параметры L, λ, l где $L = (\lambda, l)$, $\lambda \in C, 2l \in Z$, называют параметрами веса представления; параметры N, ν, n где $N = (\nu, n)$, $\nu \in C, n \pm l \in Z$ назовем нормировочными). Сужения операторов представлений (T) на унимодулярную подгруппу (группу Лоренца) описаны в работе [1].

Для “матричной записи” представлений (T) мы применим разложения функций из Ω_L в комплексные интегралы Фурье и Меллина. Интегральный метод в приложениях к теории представлений групп также хорошо известен; он широко применялся, например, в работе [2] к различным матричным группам, в том числе, к вещественному аналогу группы $SL(2, C)$ – группе $SL(2, R)$. Аналогичные построения для группы Лоренца были выполнены в работе [3]: повторим коротко эти построения для G .

Обозначим характеры аддитивной группы комплексных чисел $C_0 = \langle C, + \rangle$ и мультипликативной группы комплексных чисел $C_1 = \langle C, \times \rangle$:

$$\chi_0[A; z] = \exp(-2i \operatorname{Re}(Az)), A \in C; \chi_1[M; z] = |z|^{1-\mu+m} z^{-m}, M = (\mu, m), \mu \in C, m \in Z, \tag{0}$$

Следующие интегралы:

$$\int d(z) \cdot f(z) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_C d(\operatorname{Re} z) d(\operatorname{Im} z) \cdot f(z), \tag{1}$$

$$\int d_0[A] \cdot f_0[A] = \frac{1}{\pi} \cdot \int_C d(\operatorname{Re} A) d(\operatorname{Im} A) \cdot f_0(A), \tag{2}$$

$$\int d_1[M] \cdot f_1[M] = \sum_{m=-i\infty}^{+i\infty} \frac{1}{4i\pi} \cdot \int d\mu \cdot f_1[M], \quad (3)$$

назовем интегралами Эйлера, Фурье, Меллина соответственно. Интеграл (2) в развернутом виде ничем не отличается от интеграла (1), но мы рассматриваем его как интеграл по двойственному объекту группы C_0 – совокупности унимодулярных характеров χ_0 ; точно так же интеграл (3) мы рассматриваем как интеграл по совокупности характеров χ_1 группы C_1 (где контур интегрирования по непрерывному параметру совпадает с мнимой осью или является ее непрерывной трансформацией).

В обозначениях (0)-(1) преобразования Фурье и Меллина функции $f(z)$ на C запишутся единообразно

$$f_k[X] = \int d[z] \cdot \chi_k[-X; z] \cdot f(z), \quad k = 0, 1. \quad (4)$$

Для функций с интегрируемым модулем и квадратом модуля имеют место: формулы обращения

$$f(z) = \int d_k[X] \cdot f_k[X] \cdot \chi_k[X; z], \quad k = 0, 1, \quad (5)$$

равенства Парсевала

$$\int d_k[X] \cdot f_k[X] \cdot h_k[-X] = \int d(z) \cdot f(z) \cdot h(z), \quad k = 0, 1, \quad (6)$$

формулы Планшереля

$$\int d_k[X] \cdot |f_k[X]|^2 = \int d(z) \cdot |f(z)|^2, \quad k = 0, 1, \quad (7)$$

(для $k=1$ – лишь при совмещении контура интегрирования по параметру μ с мнимой осью без изменения значения интеграла).

Следующие интегралы:

$$\chi_{ij}[X, Y; N, L; g] = \int d(z) \cdot \chi_i[-X; z] \cdot (T[N, L; g] \circ \chi_j[Y; z]), \quad i, j = 0, 1, \quad (8)$$

являются ядрами интегральных операторов представлений и аналогами матричных элементов операторов представлений (T). Для них справедливы теоремы сложения

$$\int d_k[Z] \cdot \chi_{ik}[X, Z; N, L; g_1] \cdot \chi_{kj}[Z, Y; N, L; g_2] = \chi_{ij}[X, Y; N, L; g_1 g_2], \quad (9)$$

формулы обращения

$$\int d_i[X] \cdot \chi_i[X; z] \cdot \chi_{ij}[X, Y; N, L; g] = T[N, L; g] \circ \chi_j[Y; z], \quad (10)$$

сопряженные формулы

$$\int d_j[Y] \cdot \chi_j[-Y; z] \cdot \chi_{ij}[X, Y; N, L; g] = T[-N, -L; g^{-1}] \circ \chi_i[-X; z], \quad (11)$$

эквивалентные (10) с помощью соотношений симметрии для ядер

$$\chi_{ji}[Y, X; N, L; g^{-1}] = \chi_{ij}[-X, -Y; -N, -L; g], \quad (12)$$

которые получаются заменой переменной в интегралах (8).

В работе [3] были вычислены ядра (8), в работах [4] были приведены соотношения вида (10)-(12) для ядер в однородных показательных базисах (χ_{00}), в [5], [6] были получены интегральные преобразования с ядрами χ_{00} – комплексные аналоги преобразований Ганкеля и Конторовича-Лебедева; тут будут описаны взаимно-обратные интегральные преобразования типа комплексных преобразований Ганкеля, но с использованием ядер χ_{01} и χ_{10} .

Пусть $F_0[A]$ – функция на C с интегрируемым модулем и квадратом модуля относительно меры $d_0[A]$.

$$d_0[A] = \frac{1}{\pi} d(\operatorname{Re} A) d(\operatorname{Im} A). \quad (13)$$

Обозначим

$$F_1[M] = \int d_0[A] \cdot F_0[A] \cdot \chi_{01}[A, M; N, L; g] \quad (14)$$

($F_1[M]$ зависит и от параметров N, L, g : $F_1[M] = F_1[M; N, L; g]$). Имеют место: формула обращения

$$F_0[A] = \int d_1[M] \cdot F_1[M] \cdot \chi_{10}[M, A; N, L; g^{-1}] = \int d_1[M] \cdot F_1[M] \cdot \chi_{01}[-A, -M; -N, -L; g], \quad (15)$$

равенство Парсевала

$$\int d_1[M] \cdot F_1[M; N, L; g] \cdot H_1[-M; -N, -L; g] = \int d_0[A] \cdot F_0[A] \cdot H_0[-A], \quad (16)$$

формула Планшереля

$$\int d_1[M] \cdot |F_1[M; N, L; g]|^2 = \int d_0[A] \cdot |F_0[A]|^2, \quad (17)$$

(17) – при чисто мнимых значениях непрерывных параметров ($\lambda, \nu, \mu \in iR$); формулы (15),(16),(17) сводятся к формулам (5),(6),(7) – проверку опустим.

Формулы (9)–(10) дают примеры двойственных функций, связанных взаимно обратными преобразованиями (14)–(15).

Воспользовавшись явными выражениями ядер χ_{01} и χ_{10} из [3], приведем преобразования (14)-(15) в развернутом виде для $g = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ со сдвигом $M \rightarrow M + L$ и перераспределением сомножителей между ядрами:

$$F_L^n[M] = \frac{1}{\pi} \cdot \int_C d(\operatorname{Re} A) d(\operatorname{Im} A) \cdot F[A] \cdot \left\{ |A|^{+\lambda-l+n} (iA)^{l-n} \frac{\Gamma(-\lambda+l)\Gamma\left(\frac{1+\mu+\lambda+m+l}{2}\right)}{\Gamma(1+\lambda+l)\Gamma\left(\frac{1-\mu-\lambda+m+l}{2}\right)} \times \right. \\ \times {}_1F_1\left(\frac{1+\mu+\lambda+m+l}{2}; 1+\lambda+l; iA\right) \cdot {}_1F_1\left(\frac{1+\mu+\lambda-m-l}{2}; 1+\lambda-l; i\bar{A}\right) + \quad (18) \\ + {}_1F_1\left(\frac{1+\mu-\lambda+m-l}{2}; 1-\lambda-l; iA\right) \cdot {}_1F_1\left(\frac{1+\mu-\lambda-m+l}{2}; 1-\lambda+l; i\bar{A}\right) \times \\ \left. \times |A|^{-\lambda+l+n} (iA)^{-l-n} \frac{\Gamma(+\lambda-l)\Gamma\left(\frac{1+\mu-\lambda+m-l}{2}\right)}{\Gamma(1-\lambda-l)\Gamma\left(\frac{1-\mu+\lambda+m-l}{2}\right)} \right\}, \\ F[A] = \sum_{m \in Z-l} \frac{(-1)^{m-l}}{4i\pi} \cdot \int_{-i\infty}^{+i\infty} d\mu \cdot F_L^n[M] \cdot \left\{ |A|^{+\lambda-l-n} (iA)^{l+n} \frac{\Gamma(-\lambda+l)\Gamma\left(\frac{1-\mu+\lambda-m+l}{2}\right)}{\Gamma(1+\lambda+l)\Gamma\left(\frac{1+\mu-\lambda-m+l}{2}\right)} \times \right. \\ \times {}_1F_1\left(\frac{1-\mu+\lambda-m+l}{2}; 1+\lambda+l; -iA\right) \cdot {}_1F_1\left(\frac{1-\mu+\lambda+m-l}{2}; 1+\lambda-l; -i\bar{A}\right) + \\ + {}_1F_1\left(\frac{1-\mu-\lambda-m-l}{2}; 1-\lambda-l; -iA\right) \cdot {}_1F_1\left(\frac{1-\mu-\lambda+m+l}{2}; 1-\lambda+l; -i\bar{A}\right) \times \\ \left. \times |A|^{-\lambda+l-n} (iA)^{-l+n} \frac{\Gamma(+\lambda-l)\Gamma\left(\frac{1-\mu-\lambda-m-l}{2}\right)}{\Gamma(1-\lambda-l)\Gamma\left(\frac{1+\mu+\lambda-m-l}{2}\right)} \right\},$$

Список литературы

1. *Гельфанд И.М.* Унитарные представления группы Лоренца / И.М. Гельфанд, М.А. Наймарк // Известия АН СССР. – 1947. – сер.матем.11 (5). 2. Виленкин Н.Я. Специальные функции и теория представления групп / Н.Я. Виленкин. – М.: Наука, 1965. – 588 с.
3. *Гузаиров Г.М.* Матричные элементы представлений группы $SL(2, C)$ в смешанных базисах и некоторые соотношения для гипергеометрических функций ${}_0F_1, {}_1F_1, {}_2F_1$ // Депонировано в ВИНТИ 14.04.92, N 1274–В92.
4. *Гузаиров Г.М.* Представления группы Лоренца и соотношения для функций Бесселя / World science: сб-к статей III международной научно-прак. конференции. Пенза: МЦНС “Наука и просвещение”, 2016. – С.19-25.
5. *Гузаиров Г.М.* Представления группы Лоренца и разложения функций по функциям Бесселя / Научно-технический вестник Поволжья №4, 2019.–Казань: ООО «Научно-технический вестник Поволжья», 2019. – С.11-14.
6. *Гузаиров Г.М., Мунасыпов Н.А.* Преобразования Фурье на группе Лоренца и комплексные преобразования Конторовича-Лебедева / Научно-технический вестник Поволжья №8, 2019. – Казань: ООО «Научно-технический вестник Поволжья», 2019. – С.69-72.

05.13.18

А.Е. Лебедев д-р техн. наук, И.С. Гуданов канд. техн. наук,
А.Б. Капранова д-р физ. – мат. наук, А.А. Ватагин, Д.Д. Бахаева

Ярославский государственный технический университет – машиностроительный факультет,
кафедра технологические машины и оборудование,
Ярославль, vatager@bk.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ РАЗРЕЖЕННОГО ПОТОКА ЩЕТОЧНЫМ РАСПЫЛИТЕЛЕМ

В работе представлена новая конструкция смесительного аппарата для получения однородных смесей, а также изложена математическая модель формирования разреженного потока щеточным распылителем.

Ключевые слова: сегрегация, смешение, компоненты, поток, агрегат.

Проанализировав существующие конструкции смесительного оборудования различных типов было установлено, что проблема получения качественных смесей компонентов, склонных к сегрегации, решена не окончательно. Современные технические решения для борьбы с сегрегацией существенно усложняют конструкцию аппарата, увеличивают время смешения и приводят к увеличению энергопотребления при незначительном улучшении однородности получаемой смеси [1].

Для получения однородных смесей компонентов, склонных к сегрегации, была разработана новая конструкция смесительного агрегата, схема которого показана на рис. 1.

Агрегат для смешения и уплотнения сыпучих материалов [2], содержит ленточный транспортер 1 с приводом 2, дозаторы 3 и 4, смесительные устройства 5, выполненные в виде приводных щеточных барабанов, снабженные приспособлениями для поворота 6 вокруг вертикальных стоек 7, отбойный элемент, представляющий собой рамку 8 с эластичным материалом 9, устройство выгрузки 10, уплотняющий валик 11 с отверстиями для выхода газа 12, покрытый эластичной газопроницаемой оболочкой 13 для выхода газа в процессе уплотнения, снабженный пружинным подпором 14. Привод смесительных устройств 5 осуществляется от электродвигателей 15.

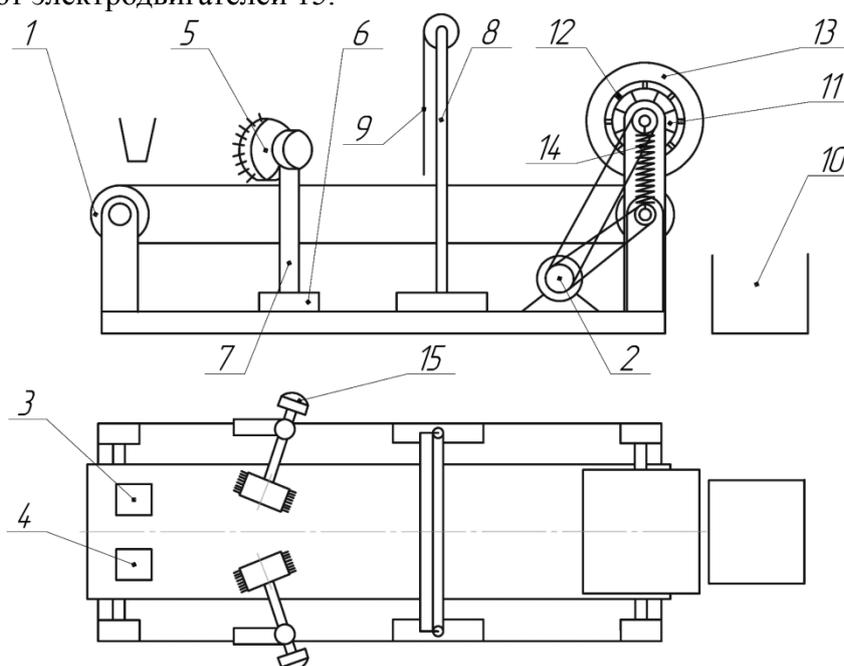


Рис. 1 — Схема смесителя с эластичным отбойником

Процесс смешения в данном агрегате происходит в результате взаимного проникновения сформированных с одинаковыми параметрами распределения (числа частиц по сечению потока) дисперсных потоков смешиваемых материалов в зоне отбойного органа. С целью сохранения сформированной структуры смеси организуется неупругое взаимодействие с эластичным отбойником.

Рассмотрим первую стадию смесеприготовления — формирование дисперсного потока требуемой структуры, обеспечивающей формирование смеси в зоне отбойника. Анализ математических моделей и методов расчета смесительных аппаратов показал, что в случае реализации процесса смешения во взаимодействующих дисперсных потоках наиболее целесообразно применять вероятностный подход, позволяющий получить аналитические выражения дифференциальных функций распределения числа частиц смешиваемых компонентов по сечению потока, которые, в свою очередь, могут быть использованы для оценки однородности смеси [3,4].

Расчетная схема процесса формирования разреженного потока щеточным распылителем показана на рис.2.

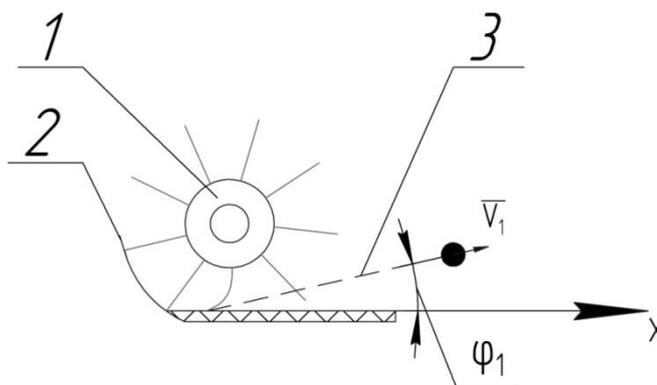


Рис.2 – Расчетная схема процесса распыления твердых частиц в аппарате с эластичными элементами: 1- приводной барабан с радиальными эластичными элементами, 2- направляющая поверхность, 3- разреженный поток твердых частиц

Набор элементов фазового пространства в данном случае будет представлять собой совокупность двух компонент скорости частицы v_{x1} , v_{y1} , и ее размера D_1 , что соответствует механизму формирования дисперсного потока [3-5]:

$$d\Gamma_1 = dv_{x1}dv_{y1}dD_1 \quad (1)$$

Математическое описание наиболее удобно выполнить в полярной системе координат относительно модуля скорости v_1 элемента потока и угла рассеивания ϕ_1 . Для получения безразмерного представления введем следующие обозначения:

$$D = \frac{D_1}{D_0}, w = \frac{v_1}{v_0}, \Phi = \frac{\phi_1}{\phi_0} \quad (2)$$

Здесь D_0 , v_0 и ϕ_0 максимальный диаметр частиц, максимальная скорость и угол соответственно.

Тогда элемент фазового объема будет иметь вид:

$$d\Gamma_1 = v_1 D_1 dw d\Phi dD \quad (3)$$

Согласно [3-5] распределение числа частиц dN_1 формируемого разреженного потока в элементе фазового объема описывается выражением:

$$dN_1 = A_1 \exp(-E_1 E_{01}^{-1}) d\Gamma_1 \quad (4)$$

Стохастическая энергия E_1 в этом случае состоит из суммы кинетической энергии, сообщаемой частицам при вращении барабана, кинетической энергии, полученной в результате распрямления упругих элементов, а также энергии связанной с взаимодействием со слоем материала:

$$E_1 = E_k + E_u + E_d \tag{5}$$

Согласно работе [3], энергия упругого взаимодействия пропорциональна углу отклонения эластичного элемента от положения равновесия:

$$E_u = \frac{k(\phi_1 - \alpha_0)^2}{2} \tag{6}$$

Энергия взаимодействие частиц со слоем материала зависит от толщины слоя, находящегося на транспортерной ленте в зоне захвата, коэффициента трения и угловой координаты:

$$E_d = mgf\phi_1h \tag{7}$$

Здесь k – угловой коэффициент жесткости эластичного элемента [3], h - толщина слоя материала на ленте, f - коэффициент трения.

Тогда выражение для стохастической энергии примет вид:

$$E = \frac{m_1v_1^2}{2} + \frac{k(\phi_1 - \alpha_0)^2}{2} + mgf\phi_1h \tag{8}$$

в безразмерном представлении:

$$E = \frac{\pi D^3 D_0^3 \rho w^2 v_0^2}{12} + \frac{k(\Phi\phi_0 - \alpha_0)^2}{2} + \frac{5}{3}\pi D^3 D_0^3 \rho f h \Phi\phi_0 \tag{9}$$

После интегрирования дифференциальная функция распределения элементов потока по углам рассеивания примет вид:

$$f_1(\Phi) = u_2 u_0 \left[\exp\left(\frac{-u_1 w_{min}^2 + u_3}{12E_{01}}\right) - \exp\left(\frac{-u_1 w_{max}^2 + u_3}{12E_{01}}\right) \right] \tag{10}$$

Здесь

$$u_0 = 6E_{01}A_1(D_{max} - D_{min}), u_1 = \pi D_0^3 \rho v_0^2, u_2 = \frac{1}{ND_0^2 \pi \rho}, u_3 = 6k\Phi^2\phi_0^2 + 12k\Phi\phi_0\alpha_0 + 6k\alpha_0^2 + 20\pi D_0^3 j h \rho \Phi\phi_0 \tag{11}$$

Основные средние характеристики процесса образования потока находятся из выражений:

$$w^{cp} = N^{-1} \int_{\Gamma} w dN = 3Ay_1\sqrt{2}(y_2 - y_3)y_4(y_5 - y_6)(D_{max} - D_{min}) \tag{12}$$

Где

$$y_1 = \frac{-1}{N\sqrt{\pi}D_0^3 v_0 \phi_0 \sqrt{\frac{k}{E_0} \rho} \sqrt{\frac{D_0 \rho}{E_0}}}, y_2 = \operatorname{erf}\left(\frac{1\sqrt{2}(3\phi_0 k \Phi_{min} - 3k\alpha + 5\pi D_0^3 \rho j h)}{E_0 \sqrt{kE_0}}\right), \tag{13}$$

$$y_3 = \operatorname{erf}\left(\frac{1\sqrt{2}(3\phi_0 k \Phi_{max} - 3k\alpha + 5\pi D_0^3 \rho j h)}{E_0 \sqrt{kE_0}}\right)$$

$$y_4 = \frac{5 \cdot D_0^3 \pi \rho j h (-6k\alpha + 5\pi D_0^3 \rho j h)}{e^{18 \cdot E_0 \cdot k} \cdot E_0}$$

$$y_5 = w_{min} e^{\frac{-1\pi D_0^3 \rho v_0^2 w_{min}^2}{12 E_0}} D_0 v_0 \sqrt{\frac{D_0 \rho}{E_0}} - \sqrt{3} \operatorname{erf}\left(\frac{1}{6} \sqrt{3} D_0 v_0 \sqrt{\pi} \sqrt{\frac{D_0 \rho}{E_0}} w_{min}\right) \tag{13}$$

$$y_6 = w_{max} e^{\frac{-1\pi D_0^3 \rho v_0^2 w_{max}^2}{12 E_0}} D_0 v_0 \sqrt{\frac{D_0 \rho}{E_0}} - \sqrt{3} \operatorname{erf}\left(\frac{1}{6} \sqrt{3} D_0 v_0 \sqrt{\pi} \sqrt{\frac{D_0 \rho}{E_0}} w_{max}\right)$$

Среднее значение угла рассеивания можно определить из выражений:

$$\phi^{cp} = N^{-1} \int_{\Gamma} \phi dN = x_1 3E_0 \phi A \sqrt{2} (x_2 - x_3)^{(x_4 - x_5)} (D_{max} - D_{min}) \quad (14)$$

Где

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{-1}{ND_0^2 \sqrt{\pi} \rho \phi_0 \sqrt{\frac{k}{E_0}}}, \\ x_2 &= \operatorname{erf} \left(\frac{\frac{1}{6} \sqrt{2} (3\phi_0 k \phi_{min} - 3k\alpha + 5\pi D_0^3 \rho j h)}{E_0 \sqrt{\frac{k}{E_0}}} \right) \\ x_3 &= \operatorname{erf} \left(\frac{\frac{1}{6} \sqrt{2} (3\phi_0 k \phi_{max} - 3k\alpha + 5\pi D_0^3 \rho j h)}{E_0 \sqrt{\frac{k}{E_0}}} \right) \\ x_4 &= e^{\frac{1}{36} \frac{D_0^3 \pi \rho (-3\nu_0^8 w_{min}^2 k - 60k\alpha j h + 50\pi D_0^3 \rho j^2 \pi h^2)}{E_0 k}} \\ x_5 &= e^{\frac{1}{36} \frac{D_0^3 \pi \rho (-3\nu_0^8 w_{max}^2 k - 60k\alpha j h + 50\pi D_0^3 \rho j^2 \pi h^2)}{E_0 k}} \end{aligned} \quad (15)$$

Представленные выше выражения позволяют описать распределение частиц по сечению потока, которое позволит подобрать режимные и конструктивные параметры смесителя, обеспечивающие рациональное наложение потоков в зоне отбойника при котором формируется однородная смесь.

Список литературы

1. *Лебедев, А.Е.* Центробежные смесители сыпучих материалов на принципе пересекающихся струйных потоков. Теория и расчет / А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев, А. Б. Капранова. - Ярославль: Изд. ЯГТУ, 2013. –119 с.
2. Пат. 2624698 Российская Федерация, МПК В01F3/18. Агрегат для смешения и уплотнения сыпучих материалов / А. Е. Лебедев, А. А. Ватагин, М. Е. Борисовский, Н. В. Бадаева, М. Н Романова, И. С. Шеронина.- Опубл. 05.07.2017. Бюл. № 19
3. *Кузьмин, И.О.* Моделирование процесса струйного смешивания сыпучих материалов с последующим уплотнением в новом аппарате с подвижной лентой: дис.канд. техн. наук: 05.17.08.- Ярославль, 2009. –130 с.
4. *Зайцев, А.И.* Ударные процессы в дисперсно-пленочных системах / А. И. Зайцев, Д. О. Бытев. – М. : Химия, 1994. – 176 с.
5. *Климонтович, Ю.Л.* Статистическая физика.- М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. - 608 с.

05.13.18

М.Г. Маликов, А.В. Жданов канд. техн. наук

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
институт машиностроения и автомобильного транспорта,
кафедра технологии машиностроения, Владимир,
zhdanov@vlsu.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА С ОСТРЯКАМИ УВЕЛИЧЕННОЙ ДЛИНЫ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

В работе представлены результаты математического моделирования работы стрелочного перевода с острьяками увеличенной длины для высокоскоростных железнодорожных магистралей. Показано, что при использовании в стрелочном переводе острьяков длиной 13,5 метров достаточно применения двух приводов с передаточным отношением редуктора 0,5 для обеспечения нормативных требований к стрелочному переводу.

Ключевые слова: *стрелочный перевод, математическая модель, высокоскоростная магистраль.*

Стрелочный перевод – это наиболее широко распространённое устройство соединения путей, которое позволяет подвижному составу переходить с главного пути на один (или более) примыкающий путь. Наиболее распространённой в России конструкцией стрелочного перевода является конструкция содержащая острьяки или так называемые – «французские» стрелки. Для высокоскоростных железнодорожных магистралей применяются острьяки увеличенной длины, которые снижают центробежную составляющую нагрузки при проходе стрелки составом [1].

Для определения кинематических и силовых характеристик работы стрелочного перевода необходимо провести математическое моделирование процесса перевода с целью определения точек их подключения, величины и характера перемещения и степени прилегания острьяка к рамному рельсу.

Математическая модель стрелочного перевода разработана при следующих условиях:

1. Длина острьяка для высокоскоростных линий берется равной 13,5 м.
2. Острьяк представлен ломаной линией с i -сосредоточенными массами соединенными упругими связями ($i = 0 \div 26$);
3. Распределение масс осуществлено равномерно по всей длине острьяка с шагом равным среднему расстоянию между шпалами ($\Delta = 0,5$ м);
4. Прямой и криволинейный острьяк математически описываются одинаково;
5. Перемещение острьяка рассматривается только в горизонтальной плоскости ХУ декартовой системы координат, начало координат – точка закрепления острьяка.

Расчетная схема модели острьяка представлена на рисунке 1.

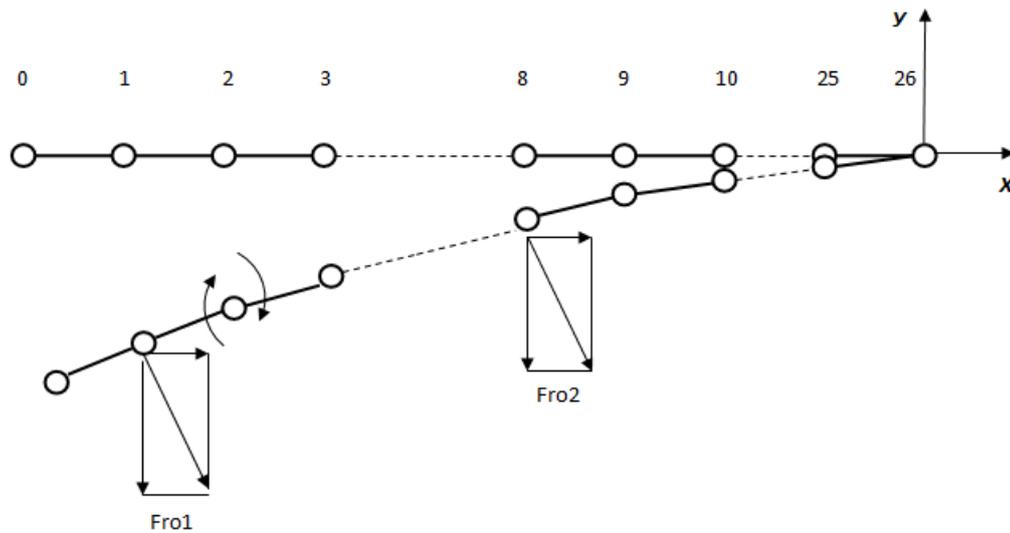


Рис. 1 - Расчетная схема остряка

Движение каждой точки остряка описывается следующим блоком уравнений. Здесь приведено математическое описание одной i -й точки остряка с использованием одного блока уравнений. Всего, для описания каждого остряка в модели используются 26 таких блоков. Такое количество, обуславливается его длиной, равной 13.5 метрам и выбранным шагом Δ .

Для перемещения остряка используется два привода. Движение i -ой точки остряка описывается следующим уравнением:

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \left(\frac{1}{(m_i \times \Delta^2)} \right) \times (E4_i \times Frt_1 \times \Delta) - M_{(i-1)} - M_i - Frr_i \times \Delta - Msi$$

где ω_i – угловая скорость изгиба остряка в i -ой точке; $E4_i$ – признак подключения рабочей тяги привода к i -й точке остряка; Frt – сила действующая на остряк от рабочей тяги (определяется из модели привода); m_i – масса i -го отрезка остряка; M_i и $M_{(i-1)}$ – упругие изгибные моменты соответствующих звеньев остряка; Frr_i – сила реакции рамного рельса; Msi – момент силы сопротивления скольжения остряка.

В этом уравнении произведение $m_i \times \Delta^2$ представляет собой момент инерции i -го отрезка остряка. Произведение трех множителей $E4_i \times Frt_i \times \Delta$ – изгибный момент от силы Frt_i с плечом Δ . Произведение $Frr_i \times \Delta$ является моментом от силы реакции Frr . В конечных положениях переведённого остряка суммарное значение этих моментов равно нулю.

При численном интегрировании данного уравнения, получаем значение угловой скорости ω_i изгиба остряка в i -ой точке.

Значения изгибного момента определяется по формулам:

$$\frac{dM_{ui}}{dt} = \frac{c}{(13.5 - i \times \Delta)} \times (\omega_i - \omega_{(i+1)}) \rightarrow M_i = M_{ui} + b \times \frac{dM_{ui}}{dt} \times \Delta t,$$

где M_{ui} – момент упругих сил при изгибе остряка; c – модуль упругости остряка в поперечной плоскости; b – коэффициент, учитывающий потери на внутреннее трение.

Для нахождения значения величины Frr_i используем условие контакта рамного рельса с подведённым к нему остряком:

$$\text{если } (Sy_i > 0) \text{ тогда } Frr_i = c_{rr} \times Sy_i + k_p \times \omega_i \times \Delta \text{ в противном случае } Frr_i = 0;$$

где Frr_i – сила реакции рамного рельса; c_{rr} – жёсткость рамного рельса при сдвиге; Sy_i – суммарное перемещение i -й точки относительно оси Y .

Момент сопротивления вращению Msi при движении остряка по подкладке, определяется через упругий момент, согласно вышеуказанной методике. Роль фрикционного элемента выполняет подошва остряка, совершающая вращательное движение по подкладке. Значение упругого момента Msi определяется по формуле:

$$\frac{dM_{si}}{dt} = c \times (\omega_i);$$

Интегрируя данное выражение численным методом, получаем значение упругого момента, необходимое для определения момента сопротивления M_{s_i} , который находится по формуле:

$$M_{s_i} = M_{us_i} + c \times \frac{dM_{us_i}}{dt} \times \Delta t,$$

Для нахождения значения величины M_{s_i} используем полученное условие по ограничению значения M_{s_i} моментом $M_{s_{im}}$ который определяется по формуле:

$$M_{s_{im}} = fc \times g \times m_i \times \Delta,$$

Тогда положения каждой точки острьяка определяется по формулам:

$$\begin{aligned} X_i &= \Delta \times (1 - \cos \varphi_i); & Sx_i &= X_i + Sx_{(i+1)}; \\ Y_i &= \Delta \times \sin \varphi_i; & Sy_i &= Y_i + Sy_{(i+1)}, \end{aligned}$$

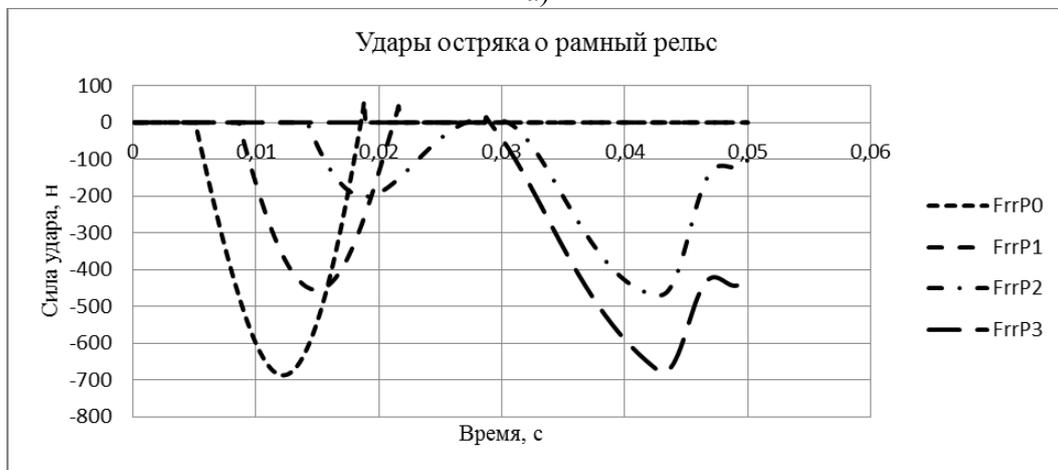
где: X_i, Y_i – перемещение i -й точки острьяка на i -м участке рельса вдоль соответствующей оси; Sx_i, Sy_i – суммарные перемещения i -й точки вдоль соответствующей оси; φ_i - угол поворота i -го отрезка относительно оси X .

Это необходимо для отображения перемещения острьяков на экране монитора ЭВМ.

Проверка значений удара острьяка о рамный рельс проводится по записи параметров в файл в соответствующих точках [2]. Для этого строятся графики зависимости силы взаимодействия острьяка с рамным рельсом. Рассматривают точки острьяка левее точки подключения первого привода и саму точку подключения. Наиболее сильный удар происходит при наибольшем значении трения острьяка о подкладки. Сила удара также зависит от скорости перемещения рабочего органа. Результат такой проверки приведен на рисунке 2.



а)



б)

Рис. 2. – Силы взаимодействия острьяка с рамным рельсом (вкладышем) во времени при передаточном отношении редуктора привода 1 (а) и 0,5 (б)

Анализ приведенных графиков показывает, что при уменьшении скорости перемещения рабочего органа в два раза, сила удара свободного конца остряка так же уменьшилась почти в 2 раза.

После изменения коэффициента передачи редуктора необходимо провести проверку по времени перевода остряков при максимальном значении коэффициента трения. На рисунке 3 показано изменение во времени скорости V_{ro} и величины перемещения S_{roL} рабочего органа. Время перевода стрелки при этих условиях, составило чуть больше четырех секунд, при максимально допустимом значении не более 5 секунд.



Рис. 3. – Значения скорости (V_{ro}) и перемещения (S_{roL}) рабочего органа остряка

Результаты исследований показали, что при использовании в стрелочном переводе остряков длиной 13.5 метров достаточно применения двух приводов с передаточным отношением редуктора 0,5 для обеспечения нормативных требований к стрелочному переводу.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-20-03084 офи_м_РЖД.

Список литературы

1. Суровин П.Г. Экспериментальный метод определения перемещений рельса // Вестник ВНИИЖТ, 2011. – № 6.
2. Жданов А.В., Маликов М.Г. Моделирование работы стрелочного перевода высокоскоростных железнодорожных магистралей // Научно-технический Вестник Поволжья. – Казань: Научно-технический Вестник Поволжья, №1, 2012, стр.161-165.

05.13.18

Н.А. Мунасыпов канд. физ. - мат. наук, Г.М. Гузаиров канд. физ. - мат. наук

Оренбургский государственный педагогический университет,
кафедра математики и методики преподавания математики,
Оренбург, nail.munasyrov@mail.ru, gafur.mustafin@mail.ru

МОДЕЛЬ МАТРИЧНОЙ ИГРЫ В ЗАДАЧЕ ПОСТРОЕНИЯ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ РЕСУРСНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ И ВНЕШНИХ СРЕДСТВ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

Рассмотрена теоретико-игровая схема построения оптимального признакового пространства в системе распознавания при наличии некоторой стороны, предпринимающей меры противодействия процессу измерения признаков. В качестве меры близости между объектами признакового пространства выбрана евклидова метрика. Предполагается наличие у каждой стороны ресурсных ограничений, предназначенных для определения значений признаков или противодействия выявлению признаков. Проведён анализ конфликтной ситуации, приводящий к модели матричной игры, указано нахождение оптимальных стратегий и цены игры.

Ключевые слова: *признаковое пространство, система распознавания, оптимальные стратегии, цена игры, функция выигрыша, ресурсные ограничения.*

Пусть множество объектов подразделено на непересекающиеся классы $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_m$, и все объекты характеризуются признаками x_1, x_2, \dots, x_N . Обозначим ω_{pk} – k -ый объект класса Ω_p , тогда описания объектов имеют вид $\omega_{pk} = (x_{pk}^1, x_{pk}^2, \dots, x_{pk}^N)$, где x_{pk}^j – значение j -го признака объекта ω_{pk} . В качестве меры близости между объектами рассмотрим евклидову метрику:

$$d^2(\omega_{pk}, \omega_{ql}) = \sum_{j=1}^N (x_{pk}^j - x_{ql}^j)^2. \quad (1)$$

Меру близости между объектами данной пары классов Ω_p и Ω_q зададим как среднеквадратичное расстояние между классами:

$$R^2(\Omega_p, \Omega_q) = \sum_{j=1}^N \frac{1}{K_p K_q} \sum_{k=1}^{K_p} \sum_{l=1}^{K_q} (x_{pk}^j - x_{ql}^j)^2. \quad (2)$$

Зададим информативность признака x_j для пары классов Ω_p и Ω_q [1]:

$$\rho_{p,q}^j = \frac{1}{K_p K_q} \sum_{k=1}^{K_p} \sum_{l=1}^{K_q} (x_{pk}^j - x_{ql}^j)^2. \quad (3)$$

Меру близости между объектами данного класса определим как среднеквадратичный разброс объектов:

$$S^2(\Omega_p) = \sum_{j=1}^N \frac{1}{K_p(K_p-1)} \sum_{k=1}^{K_p} \sum_{l=1}^{K_p} (x_{pk}^j - x_{pl}^j)^2. \quad (4)$$

Введём величину разброса внутри класса по данному признаку:

$$\gamma_p^j = \frac{1}{K_p(K_p-1)} \sum_{k=1}^{K_p} \sum_{l=1}^{K_p} (x_{pk}^j - x_{pl}^j)^2. \quad (5)$$

Предположим, что некоторая сторона A разрабатывает систему распознавания (СР) объектов, и создаёт технические средства T_j для определения соответствующих признаков x_j . Допустим, что имеется другая сторона B , которая стремится противодействовать определению (выявлению, измерению) признаков, и для этой цели создаёт систему противодействия (СП). Выдвинем следующие предположения:

а) сторона A при проектировании СР имеет полную информацию о классах распознаваемых объектов, но не имеет никакой информации о предполагаемых действиях со стороны B , осуществляющей СП;

б) создание каждого технического средства T_j обеспечивает точное измерение признака x_j (при отсутствии мер противодействия со стороны B измерению этого признака);

в) если сторона B противодействует определению признака x_j , то измерение этого признака стороной A полностью невозможно (даже если сторона A создаёт соответствующее техническое средство для измерения признака x_j);

г) критерий эффективности CP основан на мерах близости, определяемых евклидовой метрикой, например:

$$W_1 = \min_{p,q} R^2(\Omega_p, \Omega_q) = \min_{p,q} \sum_{j=1}^N \rho_{p,q}^j \quad (6)$$

$$W_2 = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n R_r^2, \quad (7)$$

где r – номер пары классов, n – количество пар классов (Ω_p, Ω_q) .

$$W_3 = \min_{p,q} \frac{R^2(\Omega_p, \Omega_q)}{S^2(\Omega_p)S^2(\Omega_q)}. \quad (8)$$

Как известно, создание средств распознавания и мер противодействия связано с затратами определённых ресурсов [2;3]. Обозначим C_j^A – затраты на создание средств T_j ; C^A – суммарное количество ресурсов стороны A ; C_j^B – затраты на противодействия измерениям x_j ; C^B – суммарное количество ресурсов стороны B . Естественно считать, что $\sum_{j=1}^N C_j^A \leq C^A$; $\sum_{j=1}^N C_j^B \leq C^B$, и тогда возникает игровая оптимизационная задача распределения ограниченных ресурсов в условиях конфликта. Стратегиями стороны A являются векторы $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$; $\lambda_j \in \{0; 1\}, j = 1, \dots, N$. Полагаем $\lambda_j = 1$, если создаётся техническое средство T_j для определения признака x_j , и $\lambda_j = 0$, если T_j не создаётся. Стратегиями стороны B являются векторы $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)$; $\mu_j \in \{0; 1\}, j = 1, \dots, N$. Полагаем $\mu_j = 0$, если сторона B противодействует определению признака x_j , и $\mu_j = 1$ в противном случае.

Анализ рассматриваемой ситуации приводит к модели матричной игры $\Gamma = \{M_1, M_2, W(\lambda, \mu)\}$, в которой множества допустимых стратегий для сторон A и B имеют соответственно вид:

$$M_1 = \{\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N); \lambda_j \in \{0; 1\}, j = 1, \dots, N; \sum_{j=1}^N \lambda_j C_j^A \leq C^A\}; \quad (9)$$

$$M_2 = \{\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N); \mu_j \in \{0; 1\}, j = 1, \dots, N; \sum_{j=1}^N (1 - \mu_j) C_j^B \leq C^B\}. \quad (10)$$

Функция выигрыша $W(\lambda, \mu)$ стороны A определяется выбором одного из критериев эффективности (6)-(8).

1) Пусть критерий определяется соотношением (6). Тогда:

$$W(\lambda; \mu) = \min_{1 \leq r \leq n} R_r^2 = \min_{1 \leq r \leq n} \sum_{j=1}^N \lambda_j \mu_j \rho_r^j. \quad (11)$$

Целью стороны A является максимизация выражения $W(\lambda; \mu)$, целью стороны B является минимизация этого выражения. Следовательно,

ОГС стороны A – стратегия $\lambda^0 = (\lambda_1^0, \lambda_2^0, \dots, \lambda_N^0)$:

$$\min_{\mu} \min_{1 \leq r \leq n} \sum_{j=1}^N \lambda_j^0 \mu_j \rho_r^j = \max_{\lambda} \min_{\mu} \min_{1 \leq r \leq n} \sum_{j=1}^N \lambda_j \mu_j \rho_r^j.$$

ОГС стороны B – стратегия $\mu^0 = (\mu_1^0, \mu_2^0, \dots, \mu_N^0)$:

$$\max_{\lambda} \min_{1 \leq r \leq n} \sum_{j=1}^N \lambda_j \mu_j^0 \rho_r^j = \min_{\mu} \max_{\lambda} \min_{1 \leq r \leq n} \sum_{j=1}^N \lambda_j \mu_j \rho_r^j.$$

Нижняя и верхняя цена игры в чистых стратегиях равны соответственно:

$$\alpha = \max_{\lambda} \min_{\mu} W(\lambda; \mu) = \max_{\lambda} \min_{\mu} \min_{1 \leq r \leq n} \sum_{j=1}^N \lambda_j \mu_j \rho_r^j.$$

$$\beta = \min_{\mu} \max_{\lambda} W(\lambda; \mu) = \min_{\mu} \max_{\lambda} \min_{1 \leq r \leq n} \sum_{j=1}^N \lambda_j \mu_j \rho_r^j.$$

2) Пусть критерий определяется соотношением (7). Тогда:

$$W(\lambda; \mu) = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n R_r^2 = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n \sum_{j=1}^N \lambda_j \mu_j \rho_r^j. \quad (12)$$

ОГС стороны A – стратегия $\lambda^0 = (\lambda_1^0, \lambda_2^0, \dots, \lambda_N^0)$:

$$\min_{\mu} \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n \sum_{j=1}^N \lambda_j^0 \mu_j \rho_r^j = \max_{\lambda} \min_{\mu} \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n \sum_{j=1}^N \lambda_j \mu_j \rho_r^j = \alpha.$$

ОГС стороны B – стратегия $\mu^0 = (\mu_1^0, \mu_2^0, \dots, \mu_N^0)$:

$$\max_{\lambda} \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n \sum_{j=1}^N \lambda_j \mu_j^0 \rho_r^j = \min_{\mu} \max_{\lambda} \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n \sum_{j=1}^N \lambda_j \mu_j \rho_r^j = \beta.$$

Допустим, что имеются описания объектов, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Численные значения признаков объектов

Классы	Объекты	Признаки			
		x_1	x_2	x_3	x_4
Ω_1	ω_{11}	4	5	11	8
	ω_{12}	2	8	10	7
	ω_{13}	5	6	8	9
	ω_{14}	4	7	10	8
	ω_{15}	3	5	8	7
Ω_2	ω_{21}	12	9	6	6
	ω_{22}	9	7	4	4
	ω_{23}	11	9	5	6
	ω_{24}	12	10	7	5
	ω_{25}	10	8	6	4
Ω_3	ω_{31}	7	13	10	5
	ω_{32}	10	15	12	7
	ω_{33}	9	14	11	6
	ω_{34}	6	12	12	4
	ω_{35}	9	13	14	6

В качестве меры близости между объектами рассмотрим выражение (1), а в качестве меры близости между объектами пары классов рассмотрим (2). Информативности признаков для каждой пары классов определим по формуле (3). Из исходных данных имеем: $p = \overline{1,3}$; $q = \overline{1,3}$. Так как каждый класс содержит по пять объектов, то $K_1 = K_2 = K_3 = 5$. Вычислим информативности признаков:

$$\rho_{1,2}^1 = 54,24; \rho_{1,2}^2 = 8,16; \rho_{1,2}^3 = 16,92; \rho_{1,2}^4 = 9,2;$$

$$\rho_{1,3}^1 = 24,36; \rho_{1,3}^2 = 54,24; \rho_{1,3}^3 = 8,96; \rho_{1,3}^4 = 6,44;$$

$$\rho_{2,3}^1 = 10,28; \rho_{2,3}^2 = 25,12; \rho_{2,3}^3 = 41,24; \rho_{2,3}^4 = 2,2.$$

Допустим, что заданы следующие значения затрат ресурсов и запасы ресурсов сторон A и B :

$$C_1^A = 6; C_2^A = 7; C_3^A = 4; C_4^A = 2; C^A = 17;$$

$$C_1^B = 5; C_2^B = 4; C_3^B = 2; C_4^B = 3; C^B = 8.$$

Выбрав в качестве критерия эффективности CP выражение, определяемое по формуле (11), найдём решение матричной игры в чистых стратегиях. Допустимыми чистыми стратегиями λ и μ сторон A и B соответственно будут стратегии, удовлетворяющие условиям (9), (10). Выпишем допустимые доминирующие стратегии сторон, в числе которых и должны содержаться оптимальные стратегии:

$$\lambda^1 = (1; 1; 1; 0), \lambda^2 = (1; 1; 0; 1); \lambda^3 = (1; 0; 1; 1); \lambda^4 = (0; 1; 1; 1);$$

$$\mu^1 = (0; 1; 0; 1), \mu^2 = (0; 1; 1; 0); \mu^3 = (1; 0; 0; 1); \mu^4 = (1; 0; 1; 0); \mu^5 = (1; 1; 0; 0).$$

Составим матрицу выигрышей, приведённую в таблице 2.

Таблица 2 – матрица выигрышей для критерия (11)

	μ^1	μ^2	μ^3	μ^4	μ^5
λ^1	8,16	25,08	10,28	33,32	35,4
λ^2	17,36	8,16	12,48	10,28	35,4
λ^3	2,2	8,96	12,48	33,32	10,28
λ^4	17,36	25,08	2,2	8,96	8,16

Оптимальными гарантирующими стратегиями λ^0 стороны A являются $\lambda^1 = (1; 1; 1; 0)$ и $\lambda^2 = (1; 1; 0; 1)$, при которых достигается нижняя цена игры $\alpha = 8,16$. Для стороны B оптимальной гарантирующей стратегией является $\mu^0 = \mu^3 = (1; 0; 0; 1)$, при которой верхняя цена игры равна $\beta = 12,48$. Выбрав другие критерии эффективности, можно получить аналогичные решения матричной игры; анализ подобных случаев проведён в работе [3].

Список литературы

1. *Мунасыпов Н.А.* Последовательная процедура построения признакового пространства // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. – 2005. – № 1 (39). – С.160–166.
2. *Мунасыпов Н.А.* Построение оптимального признакового пространства в системе распознавания при наличии ресурсных ограничений // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 4. – С.156–159.
3. *Горелик В.А., Мунасыпов Н.А.* Использование теоретико-игровых методов при решении задачи построения оптимального признакового пространства // Моделирование, оптимизация и декомпозиция сложных динамических процессов. – М.: ВЦ РАН, 1996. – С.123–144.

05.13.18

М.К. Хасанов канд. физ. – мат. наук

Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,
кафедра прикладной информатики и программирования,
Стерлитамак, hasanovmk@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ИНЖЕКЦИИ СЕРОВОДОРОДА В ПОРИСТУЮ СРЕДУ, НАСЫЩЕННУЮ НЕФТЬЮ И ВОДОЙ

Представлена математическая модель инжекции жидкого сероводорода в пористую среду, насыщенную водой и нефтью. Получена зависимость температуры границы образования газогидрата от начального давления. Определены диапазоны значений давления инжекции и начального давления пористой среды, при которых возможно существование промежуточной области, насыщенной смесью воды, сероводорода и его газогидрата, находящихся в состоянии термодинамического равновесия.

Ключевые слова: *математическая модель, пористая среда, фильтрация, газогидраты, сероводород.*

Введение. Утилизация сероводорода в истощенных месторождениях нефти является одним из методов уменьшения его эмиссии в атмосферу [1,2]. Учитывая, что при длительном подземном хранении утилизируемых газов в виде флюида может происходить их утечка на поверхность, то предлагается осуществлять их перевод в твердое газогидратное состояние [3-5]. В данной работе представлена математическая модель образования газогидрата H_2S при инжекции жидкого сероводорода в пористую среду, насыщенную водой и нефтью.

Постановка задачи. Пусть полубесконечный горизонтальный пласт в исходном состоянии насыщен водой с исходной насыщенностью S_{w0} и нефтью. Будем полагать, что начальная температура пласта T_0 ниже температуры T_Q , соответствующей квадрупольной точке Q ($T_Q=302,6$ К и $p_Q=2,24$ МПа), в которой газообразный и жидкий сероводород, а также его газогидрат и вода находятся в равновесии. В этом случае исходное состояние системы соответствует термобарическим условиям существования газогидрата H_2S . Положим, что через границу ($x=0$) инжектируется жидкий сероводород, давление p_e и температура T_e которого соответствуют условиям существования гидрата сероводорода.

В данной работе будем полагать, что в результате инжекции на фронтальной поверхности, совпадающей с поверхностью вытеснения нефти сероводородом, происходит образование газогидрата H_2S . В этом случае в пласте образуются две характерные зоны. В первой (ближней) зоне в порах присутствуют сероводород и его газогидратом, во второй (дальней) зоне - вода и нефть. При этом возникает подвижная межфазная поверхность между первой и второй областями, на которой вода полностью переходит в газогидратное состояние (фронт гидратообразования).

Основные уравнения. Пусть величина начальной водонасыщенности пористого пласта не превышает 0,2, тогда воду можно считать неподвижной. В этом случае система основных уравнений в прямолинейно-параллельном случае имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i m S_i) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_i m S_i v_i) = 0, \quad \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_i c_i m S_i v_i \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right),$$

$$m S_i v_i = - \frac{k_i}{\mu_i} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad k_i = k_0 S_i^3 \quad (i=s, l), \quad (1)$$

$$\rho_s = \rho_{0s} \exp(\beta_s (p - p_0)), \quad \rho_l = \rho_{0l} (1 + \beta_l (p - p_0)).$$

Здесь x – координата; t – время; m – пористость; p – давление; T – температура; нижние индексы $i=s, l$ относятся соответственно к параметрам сероводорода и нефти; S_i – насыщенность пор; ρ_i – плотность; v_i – действительная средняя скорость; k_0 – абсолютная проницаемость пористой среды; k_i – фазовая проницаемость; β_i – коэффициент сжимаемости; c_i – удельная теплоемкость; μ_i – динамическая вязкость; ρ_s и λ – эффективные значения объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности для насыщенного пласта.

На границе между зонами выполняются соотношения, вытекающие из условий баланса массы воды и сероводорода, а также баланса теплоты:

$$-\frac{k_s}{\mu_s} \frac{\partial p_1}{\partial x} = m \left(\frac{\rho_h}{\rho_s} S_h G + S_s \right) V_n, \quad -\frac{k_l}{\mu_l} \frac{\partial p_2}{\partial x} = m S_l V_n,$$

$$m S_h \rho_h (1 - G) V_n = m S_{w0} \rho_w V_n, \quad \lambda \frac{\partial T_1}{\partial x} - \lambda \frac{\partial T_2}{\partial x} = m \rho_h L_h S_h V_n. \quad (2)$$

Здесь G – относительная массовая концентрация H_2S в газогидрате; S_{w0} – начальная водонасыщенность пласта; L_h – удельная теплота образования газогидрата H_2S из жидкого сероводорода и воды; нижние индекс $j=1,2$ относятся соответственно к параметрам в первой и второй области; V_n – скорость движения границы образования газогидрата H_2S . Здесь и далее нижний индекс n относится к параметрам на поверхности между зонами, а нижние индексы h и w – соответственно к параметрам газогидрата и воды.

Результаты расчетов. На рис. 1 приведена зависимость температуры границы образования газогидрата от начального давления. Для остальных параметров приняты следующие значения: $m = 0,3$, $S_{w0} = 0,2$, $k_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, $p_e = 8 \text{ МПа}$, $T_0 = 300 \text{ К}$, $T_e = 295 \text{ К}$, $k_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, $G = 0,24$, $\lambda = 2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\rho_s = 2 \cdot 10^6 \text{ Дж/(К} \cdot \text{кг)}$, $\mu_s = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\mu_l = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\beta_s = 3 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$, $\beta_l = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$, $\rho_h = 1003 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{0s} = 890 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{0l} = 900 \text{ кг/м}^3$, $c_s = 1800 \text{ Дж/(К} \cdot \text{кг)}$, $c_l = 1900 \text{ Дж/(К} \cdot \text{кг)}$, $L_h = 4,1 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$.

Рис. 1 показывает, что с уменьшением начального давления температура на поверхности фазового перехода возрастает. Это обусловлено тем, что гидратообразование сопровождается выделением скрытой теплоты фазовых переходов, а с увеличением перепада давления в пласте происходит возрастание скорости поверхности фазовых переходов (т.е. интенсивности гидратообразования). Кроме того, поскольку часть тепла, выделяющегося на поверхности фазовых переходов, отводится через более холодную левую границу пласта, то с увеличением координаты поверхности гидратообразования интенсивность отвода тепла через левую границу пласта снижается. Указанные факторы согласно рис. 2 приводят к повышению температуры на этой границе при уменьшении начального давления пласта.

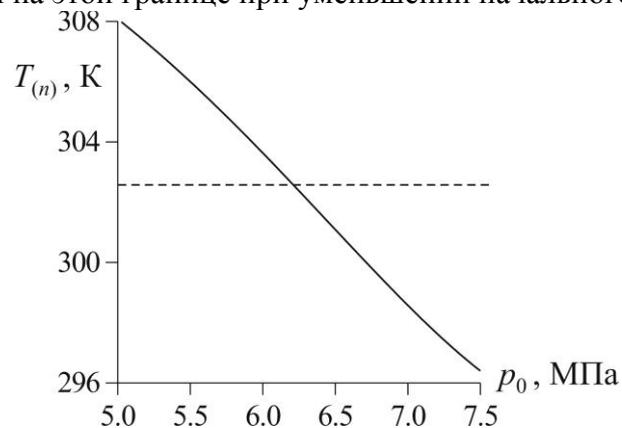


Рис. 1 – Зависимость температуры границы образования газогидрата от начального давления. Штриховая линия – температура, квадрупольной точки.

Вследствие этого при достаточно низких значениях начального давления температура на границе гидратообразования может превысить равновесную температуру разложения газогидрата сероводорода (штриховая линия), что будет соответствовать возникновению

промежуточной области, насыщенной смесью воды, сероводорода и его газогидрата, находящихся в состоянии термодинамического равновесия.

Были проведены расчеты для нахождения величины предельного значения давления инъекции сероводорода p_* , выше которого возникает промежуточная область, насыщенная смесью воды, сероводорода и его газогидрата, находящихся в состоянии термодинамического равновесия. На рис. 1 приведена зависимость предельного значения давления от начального давления в пласте при $k_0 = 1 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$. Согласно рис. 1, с увеличением начального давления в пласте величина предельного значения давления инъекции возрастает. Это обусловлено тем, что с ростом начального давления уменьшается температура на поверхности образования газогидрата сероводорода. Поэтому для того, чтобы температура на этой поверхности превысила равновесную температуру разложения газогидрата необходимы низкая интенсивность отвода тепла через левую границу пласта и высокая интенсивность выделения скрытой теплоты гидратообразования, что реализуется при больших значениях давления инъекции и соответственно скорости движения границы фазовых переходов. Таким образом, промежуточная область, насыщенная смесью воды, сероводорода и его газогидрата, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, возникает при высоких значениях давления инъекции и низких значениях начального давления пласта.

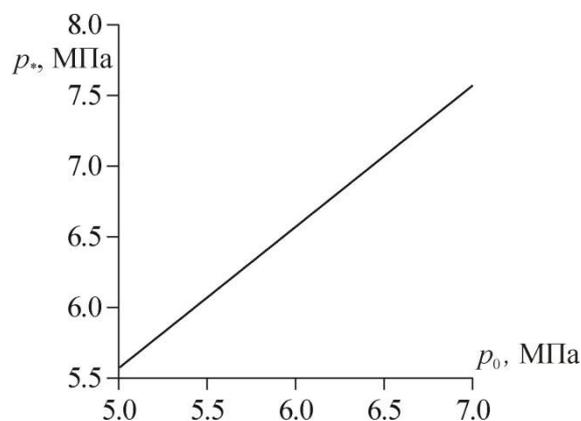


Рис. 2 – Зависимость предельного значения давления от начального давления при $k_0 = 1 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$.

Заключение. С уменьшением начального давления в пласте происходит увеличение температуры границы образования газогидрата сероводорода. При низких значениях начального давления в пласте будет возникать промежуточная область, насыщенная смесью воды, сероводорода и его газогидрата, находящихся в состоянии термодинамического равновесия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Республики Башкортостан (проект 17-48-020123 p_a).

Список литературы

1. Machel H.G. 2005. Geological and hydrogeological evaluation of the Nisku Q-Pool in Alberta, Canada, for H₂S and/or CO₂ storage. Oil Gas Sci. Technol. V. 60. P. 51–65.
2. Xu T., Apps J. A., Pruess K. and Yamamoto H. 2007. Numerical modeling of injection and mineral trapping of CO₂ with H₂S and SO₂ in a sandstone formation. Chemical Geology. V. 24. No 3-4. P. 319–346.
3. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. М.: Химия, 1980. 296 с.
4. Дучков А.Д., Соколова Л.С., Аюнов Д.Е., Пермьяков М.Е. Оценка возможности захоронения углекислого газа в криолитозоне Западной Сибири // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 4. С. 62–68.
5. Чувилин Е.М., Гурьева О.М. Экспериментальное изучение образования гидратов CO₂ в поровом пространстве промерзающих и мерзлых пород // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 3. С. 70–79.

05.13.18

**А.Г. Шляхова канд. техн. наук, А.Т. Шляхов канд. физ. - мат. наук,
О.А.Шпилова канд. техн. наук, М.Ю. Филимонова канд. педагог. наук**

Альметьевский государственный нефтяной институт,
кафедра нефтегазового оборудования и технологии машиностроения,
Альметьевск, 9274573382@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

*«Полезно решать дифференциальные уравнения»
И. Ньютон*

В данной работе рассмотрены физические задачи, приводящие к одному и тому же виду дифференциальных уравнений. Получены и проанализированы зависимости физических величин от времени.

Ключевые слова: *физические законы, дифференциальные уравнения, методы Лагранжа и Бернулли.*

С введением новых стандартов ФГОС ВПО, кроме фундаментального обучения, необходимо развивать навыки экспериментально-исследовательской деятельности. Поэтому даже по дисциплине «Математика», «Теоретическая механика» вводится лабораторный практикум, сочетающий знания математики, физики, химии, экономики и информатики [1-5], что способствует усилению прикладной направленности обучения. Многие физические законы имеют вид дифференциальных уравнений. Вывод этих уравнений основан на знании законов изучаемых явлений. Задача интегрирования этих уравнений - важнейшая задача математики. Приведем примеры составления и решения дифференциальных уравнений.

Задача 1. Материальная точка массой $m=1$ г движется прямолинейно. На нее действует сила в направлении движения, пропорциональная времени с коэффициентом пропорциональности $k = 6 \cdot 10^{-5}$ кг/с³ ($F=kt$), и сила сопротивления среды, пропорциональная скорости с коэффициентом пропорциональности $k_1=3 \cdot 10^{-3}$ кг/с³ ($F_{\text{сопр}}=k_1v$). Найти зависимость скорости движения точки от времени, если ее начальная скорость $v(0)=0$.

Задача 2. Электродвижущая сила \mathcal{E} в цепи с током I , имеющей сопротивление R и индуктивность L , складывается из падения напряжения RI и электродвижущей силы самоиндукции $L \cdot \frac{dI}{dt}$. Найти зависимость $I=I(t)$ от времени, если \mathcal{E} изменяется по закону $\mathcal{E} = kt$ и $I(0) = 0$, $k=\text{const}$.

Решение первой задачи основано на втором законе Ньютона:

$$ma = F - F_{\text{сопр}} \Rightarrow m \frac{dv}{dt} = kt - k_1 v \Rightarrow \frac{dv}{dt} + \frac{k_1 v}{m} = \frac{kt}{m}.$$

Для составления дифференциального уравнения второй задачи воспользуемся вторым

правилом Кирхгофа: $L \frac{dI}{dt} + RI = \mathcal{E} \Rightarrow \frac{dI}{dt} + \frac{RI}{L} = \frac{kt}{L}.$

На этих примерах мы наблюдаем замечательное проявление силы математики – совершенно разные процессы привели к одной и той же математической модели.

Линейные неоднородные уравнения решаются методом вариации произвольной постоянной (метод Лагранжа) или методом Бернулли.

Первую задачу решим методом Лагранжа. Найдем сначала общее решение соответствующего однородного уравнения

$$\frac{dv}{dt} + \frac{k_1 v}{m} = 0 \Rightarrow \frac{dv}{dt} = -\frac{k_1 v}{m} \Rightarrow \frac{dv}{v} = -\frac{k_1 dt}{m} \Rightarrow \ln|v| = -\frac{k_1 t}{m} + \ln|C| \Rightarrow \ln|v| - \ln|C| = -\frac{k_1 t}{m} \Rightarrow \ln\left|\frac{v}{C}\right| = -\frac{k_1 t}{m} \Rightarrow \frac{v}{C} = e^{-\frac{k_1 t}{m}} \Rightarrow v = C e^{-\frac{k_1 t}{m}}.$$

Общее решение неоднородного заданного уравнения ищем в виде $v = C(t)e^{-\frac{k_1 t}{m}}$. Находим

$v' = C'(t)e^{-\frac{k_1 t}{m}} - C(t)\frac{k_1}{m}e^{-\frac{k_1 t}{m}}$. Подставим v и v' в исходное уравнение, получим

$$C'(t)e^{-\frac{k_1 t}{m}} - C(t)\frac{k_1}{m}e^{-\frac{k_1 t}{m}} + \frac{k_1}{m}C(t)e^{-\frac{k_1 t}{m}} = \frac{kt}{m} \Rightarrow C'(t) = \frac{kt}{m}e^{\frac{k_1 t}{m}} \Rightarrow C(t) = \frac{k}{m} \int te^{\frac{k_1 t}{m}} dt =$$

$$= \left. \begin{array}{l} t = p \Rightarrow dt = dp \\ dq = e^{\frac{k_1 t}{m}} dt \Rightarrow q = \frac{m}{k_1} e^{\frac{k_1 t}{m}} \\ \int pdq = pq - \int qdp \end{array} \right\} = \frac{k}{m} \left(\frac{mt}{k_1} e^{\frac{k_1 t}{m}} - \int \frac{m}{k_1} e^{\frac{k_1 t}{m}} dt \right) = \frac{kt}{k_1} e^{\frac{k_1 t}{m}} - \frac{mk}{k_1^2} e^{\frac{k_1 t}{m}} + C_1.$$

Находим $v = \left(\frac{kt}{k_1} e^{\frac{k_1 t}{m}} - \frac{mk}{k_1^2} e^{\frac{k_1 t}{m}} + C_1 \right) e^{-\frac{k_1 t}{m}} = \frac{kt}{k_1} - \frac{mk}{k_1^2} + C_1 e^{-\frac{k_1 t}{m}}$.

Из начального условия, находим C_1 : $v(0) = 0 = -\frac{mk}{k_1^2} + C_1 \Rightarrow C_1 = \frac{mk}{k_1^2}$.

$$v = \frac{kt}{k_1} - \frac{mk}{k_1^2} + \frac{mk}{k_1^2} e^{-\frac{k_1 t}{m}} = \frac{kt}{k_1} + \frac{mk}{k_1^2} \left(e^{-\frac{k_1 t}{m}} - 1 \right), \text{ (рис.1)}$$

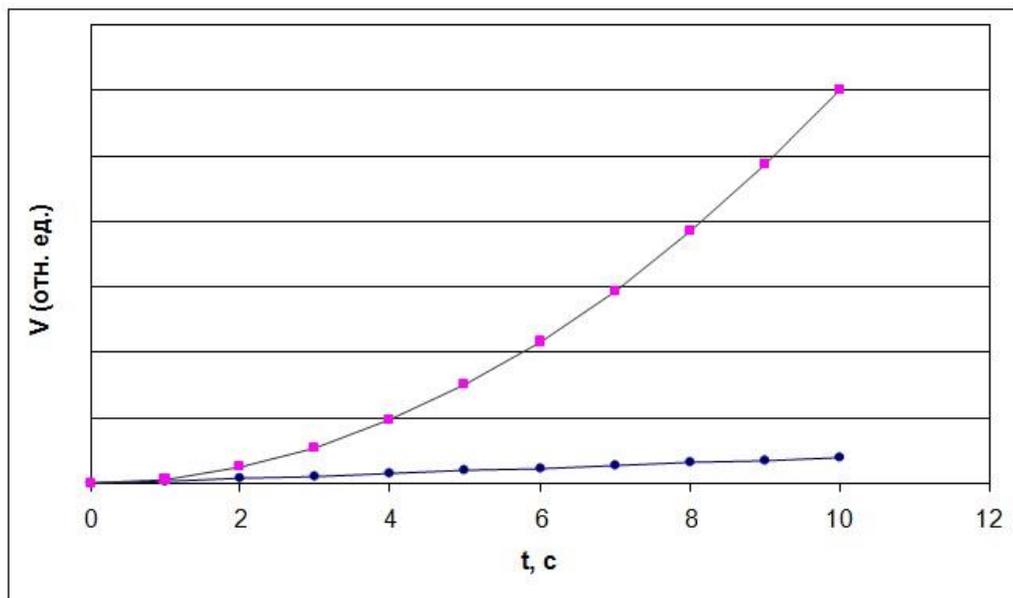


Рис. 1. Зависимость $v = v(t)$ при $v(0) = 0$

(●) - с учетом сопротивления среды, (■) – без учета сопротивления среды.

Приведем оценку общего выражения скорости: при увеличении t выражение $e^{-\frac{k_1 t}{m}} \rightarrow 0 \Rightarrow v = \frac{kt}{k_1} - \frac{km}{k_1^2} \approx \frac{kt}{k_1}$. Таким образом, $v = v(t)$ практически определяется первым слагаемым, т.е. наблюдается линейная зависимость (•). Для сравнения приведена парабола (■), полученная без учета сопротивления среды, т.е. $\frac{mdv}{dt} = kt \Rightarrow dv = \frac{ktdt}{m} \Rightarrow v = \frac{kt^2}{2m}$ (рис.1).

Изменим начальное условие задачи, пусть $v(0)=1$. Определим заново постоянную интегрирования C :

$$v(0)=1 = -\frac{km}{k_1^2} + C \Rightarrow C = 1 + \frac{km}{k_1^2}. \text{ Поэтому общее решение имеет вид:}$$

$$v = \frac{kt}{k_1} - \frac{km}{k_1^2} + e^{-\frac{k_1 t}{m}} + \frac{km}{k_1^2} e^{-\frac{k_1 t}{m}}.$$

Определим экстремум скорости:

$$v'_t = 0 \Rightarrow v' = \frac{k}{k_1} - \frac{k_1}{m} e^{-\frac{k_1 t}{m}} - \frac{kk_1 m}{k_1^2 m} e^{-\frac{k_1 t}{m}} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{k}{k_1} e^{\frac{k_1 t}{m}} = \frac{k_1}{m} + \frac{k}{k_1} \Rightarrow e^{\frac{k_1 t}{m}} = \frac{k_1}{k} \left(\frac{k_1}{m} + \frac{k}{k_1} \right) \Rightarrow e^{\frac{k_1 t}{m}} = \frac{k_1^2}{km} + 1 \Rightarrow \ln e^{\frac{k_1 t}{m}} = \ln \left| \frac{k_1^2}{km} + 1 \right| \Rightarrow$$

$$\frac{k_1 t}{m} = \ln \left| \frac{k_1^2}{km} + 1 \right| \Rightarrow t = \frac{m}{k_1} \ln \left| \frac{k_1^2}{km} + 1 \right| \Rightarrow t = \frac{10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}} \ln \left(\frac{9 \cdot 10^{-6}}{6 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-3}} + 1 \right) = \frac{1}{3} \ln 151 \approx 1,672427.$$

При $t = 1,67$ с скорость имеет минимум. Слагаемое $e^{-\frac{k_1 t}{m}}$, отражающее сопротивление среды, играет заметную роль только в начальной стадии процесса, поэтому при $t \rightarrow 1,67$ с скорость резко падает. С течением времени роль экспоненциального слагаемого все больше уменьшается и при $t > 2c$ $v = v(t)$ практически определяется первым слагаемым, наблюдается линейная зависимость (рис.2).

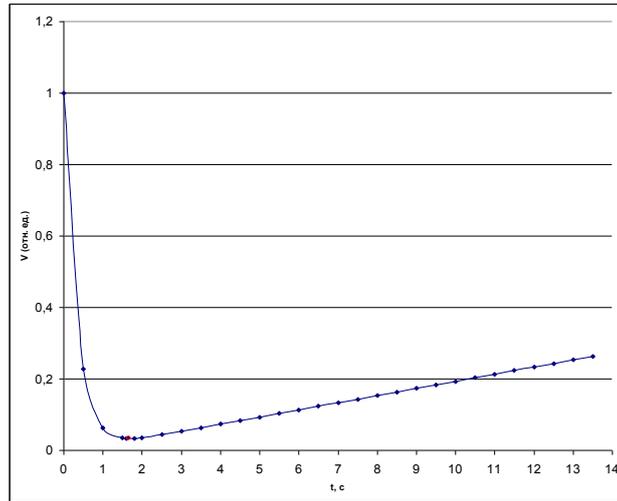


Рис. 2. Зависимость $v = v(t)$ при $v(0) = 1$

Приведем решение второй задачи методом Бернулли.

$I' + \frac{RI}{L} = \frac{kt}{L}$. Перед нами линейное неоднородное уравнение. Его решение ищем в

виде $I = uv$, где $u = u(t)$ и $v = v(t)$ – неизвестные функции от времени t . Находим

$I' = u'v + uv' \Rightarrow$ подставим I и I' в исходное уравнение

$$u'v + uv' + \frac{Ruv}{L} = \frac{kt}{L} \Rightarrow uv' + v(u' + \frac{Ru}{L}) = \frac{kt}{L} \Rightarrow$$

$$1) u' + \frac{Ru}{L} = 0 \Rightarrow \frac{du}{dt} = -\frac{Ru}{L} \Rightarrow \frac{du}{u} = -\frac{Rdt}{L} \Rightarrow \ln|u| = -\frac{Rt}{L} \Rightarrow u = e^{-\frac{Rt}{L}}$$

$$2) e^{-\frac{Rt}{L}} v' = \frac{kt}{L} \Rightarrow \frac{dv}{dt} = e^{\frac{Rt}{L}} \frac{kt}{L} \Rightarrow v = \frac{k}{L} \int e^{\frac{Rt}{L}} t dt = \left. \begin{array}{l} t = p \Rightarrow dt = dp \\ \frac{Rt}{L} \\ dq = e^{\frac{Rt}{L}} dt \Rightarrow q = \frac{L}{R} e^{\frac{Rt}{L}} \\ \int pdq = pq - \int qdp \end{array} \right| =$$

$$= \frac{k}{L} \left(\frac{Lt}{R} e^{\frac{Rt}{L}} - \frac{L}{R} \int e^{\frac{Rt}{L}} dt \right) = \frac{kt}{R} e^{\frac{Rt}{L}} - \frac{kL}{R^2} e^{\frac{Rt}{L}} + C$$

$$I = uv = e^{-\frac{Rt}{L}} \left(\frac{kt}{R} e^{\frac{Rt}{L}} - \frac{kL}{R^2} e^{\frac{Rt}{L}} + C \right) = \frac{kt}{R} - \frac{kL}{R^2} + Ce^{-\frac{Rt}{L}}$$

$$I(0) = 0 = -\frac{kL}{R^2} + C \Rightarrow C = \frac{kL}{R^2}$$

$$I = \frac{kt}{R} - \frac{kL}{R^2} + \frac{kL}{R^2} e^{-\frac{Rt}{L}} \Rightarrow I = \frac{kt}{R} + \frac{kL}{R^2} (e^{-\frac{Rt}{L}} - 1),$$

общий вид тока такой же, как для скорости в первой задаче.

Заключение. При выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Математика», «Теоретическая механика» реализованы фундаментальные и практические знания по темам «Динамика», «Электromагнетизм», «Дифференциальные уравнения», «Дифференцирование и интегрирование функций», «Компьютерное моделирование».

Список литературы

1. *Шляхова А.Г., Шляхов А.Т., Гайнулова Л.А.* Математическое моделирование движения в центрально-симметрическом поле. // Научно-технический вестник Поволжья.-2019.-№1-С.21-25.
2. *Микрюкова Е.Ю., Алишева Е.А., Мингазова С.Г., Шигабиев Т.Н.* Применение методов математического моделирования для изучения кинетики химических реакций // Научно-технический вестник Поволжья.-2018.-№6-С.21-23.
3. *Шляхов А.Т., Шляхова А.Г.* Математическое моделирование в механике. // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института – 2019. – т.18. – С.233-239.
4. *Филимонова М.Ю., Петровицева Е.А., Ильина И.М.* Технология обучения инженерной графике с использованием новых информационных технологий. // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института – 2018. – т.17. – С.368-372.
5. *Шляхов А.Т., Шляхова А.Г., Рахматуллин М.Х.* Физические задачи из динамики, приводящие к дифференциальным уравнениям. // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института – 2010. – т.8. – С.310-318.

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ
ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ (05.13.19)**

05.13.19

¹Н.П. Мошуров, ²Ю.Д. Фот канд. техн. наук

Оренбургский государственный университет,
факультет математики и информационных технологий,
кафедра компьютерной безопасности
и математического обеспечения информационных систем,
Оренбург, ¹moshurov@bk.ru, ²Fotulia@mail.ru.

**ЗАЩИТА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ
ОТ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

В статье рассмотрены современные средства и методы защиты автоматизированных систем от преднамеренных электромагнитных воздействий. Отдельное внимание уделено экранированию, использованию современного оборудования. Особый акцент сделан на создании комплексной системы организационных-технических и технологических средств.

Ключевые слова: защита, электромагнитное излучение, экранирование, система, оборудование, организационно-технические средства.

Современная цивилизация в значительной степени зависит от средств автоматизации, а именно - автоматизированных систем управления. Атомные и гидроэлектростанции, нефте- и газопроводы, национальные сети распределения электроэнергии, транспортные системы национального и мирового уровня, производственные процессы на предприятиях функционируют на базе таких автоматизированных систем и от их защищенности зависит не только прибыль компаний, но и национальная безопасность [1]. Одновременно следует отметить, что увеличилось угрозы для информации, тяжесть последствий реализации которых способствует обновлению понимания защиты автоматизированных систем, которое заключается в обеспечении целостности, доступности и конфиденциальности данных.

В данном контексте не подлежит сомнению тот факт, что безопасность объектов критической информационной инфраструктуры необходимо рассматривать в новом ракурсе, а именно: наряду с классическими мерами безопасности следует обеспечивать защиту автоматизированных систем управления, в частности, от преднамеренных электромагнитных воздействий. Путь проникновения электромагнитных воздействий в сигнальные цепи автоматики и связи может быть кондуктивным, электрическим и магнитным, но независимо от его уровня электромагнитное воздействие может быть достаточно высоким и разрушающим.

Учитывая указанное, безусловно, защита должна носить системный характер, то есть для получения наилучших результатов все разрозненные виды обеспечения безопасности автоматизированной системы должны быть объединены в одно целое и функционировать в составе единой системы, являющейся слаженным механизмом взаимодействующих элементов [2].

Итак, исследуемая проблема требует проведения тщательного анализа современных концептуальных подходов в этой области и определения основных направлений и принципов работ по обеспечению электромагнитной безопасности автоматизированных систем.

Актуальным вопросам, связанным с проблематикой безопасности автоматизированных систем, посвящены труды И. Аристова, И. Бачило, В. Брижко, В. Гавловского, Р. Калюжного, В. Копылова, В. Липкана.

Наряду с существующими нормативно-правовыми документами, теоретическую базу проведенных исследований составили труды известных ученых в области защиты информации от утечки по техническим каналам, к числу которых относятся В.В. Домарев и А.А. Хорева.

Вместе с тем, следует отметить, что детальный анализ научной разработанности ключевых аспектов обеспечения безопасности автоматизированных систем в отечественной и зарубежной науке показывает, что проблема формирования и своевременного обновления концептуальных, доктринальных и нормативно-правовых основ защиты относится к наиболее острым проблемам современности.

Однако, несмотря на имеющиеся наработки, комплексных исследований по вопросам обеспечения защиты автоматизированных систем от преднамеренных электромагнитных воздействий сегодня все еще недостаточно, что не позволяет сформировать панорамное видение решений в указанной сфере.

Таким образом, указанные обстоятельства обусловили целевую направленность проводимого исследования.

Для защиты автоматизированных систем от преднамеренных электромагнитных воздействий могут использоваться различные средства: организационные, нормативные, технические, технологические.

В рамках этой статьи рассмотрим более подробно технические, технологические и организационные средства. Преимущества технических средств связаны с их надежностью, независимостью от субъективных факторов, высокой устойчивостью к модификации [3]. Они направлены на снижение мощности нежелательных излучений, которые могут создать электромагнитный канал утечки информации.

Исследования последних лет показали, что одним из самых эффективных технических средств защиты от воздействия электромагнитных полей и излучений как в производственных, так и в бытовых условиях является их экранирование соответствующими материалами и конструкциями. Экранирование обеспечивает не только защиту автоматизированных систем от неблагоприятных воздействий, но и повышает уровень электромагнитной совместимости технических средств [4]. Это заключается в предотвращении нестабильности работы электронной аппаратуры под воздействием электромагнитных полей и излучений.

Однако, экспериментальные и теоретические исследования показали необходимость определения зависимости защитных свойств экранирующих материалов различных классов от частоты и амплитуды электромагнитного поля, которое требует экранирования.

Помимо этого, следует отметить, что главным недостатком почти всех работ по электромагнитному экранированию является сосредоточенность или на экранировании конкретного источника поля, или на определенном частотном диапазоне. В то же время для отдельного источника эффективность экранирования обусловлена не только свойствами материала, но и геометрией и позиционированием экрана [5]. При этом наблюдаются сложные зависимости коэффициентов экранирования не только от частоты поля, но и от его амплитуды. А также - их сложная взаимозависимость.

На основании собственных исследований авторов, а также используя анализ опытов других ученых можно формализовать гарантированные усредненные коэффициенты экранирования для различных материалов и классов материалов, а также выделить их преимущества и недостатки (табл.1).

Таблица 1 - Значения коэффициентов экранирования электромагнитных полей современных защитных материалов

Материал	Частотные диапазоны	Коэффициенты экранирования	Примечания
Электротехнические стали	сверхнизкие частоты	2-5	Большой вес, разногласия свойств для сталей различных классов, наиболее эффективны на частотах 6-7 кГц
	низкие частоты	9-10	
	ультравысокие и высокие частоты	50-900	
Пермаллоя	сверхнизкие частоты	8-12	Достаточно большая стоимость, катастрофическое снижение защитных свойств в результате деформации
	низкие, высокие частоты	22-35	
	ультравысокие и высокие частоты	80-1000	
Аморфные магнитомягкие сплавы	сверхнизкие, низкие частоты	8-22	Большая стоимость, невозможность создания сплошных поверхностей больших площадей
	высокие частоты	40-300	
	ультравысокие и высокие частоты	400-1000	
Металлополимерные материалы	сверхнизкие, низкие, высокие, ультравысокие и высокие частоты	10-1400	Возможна деградация полимерной матрицы в результате температурных и оптических воздействий, но можно изготовить материал с нужным коэффициентом экранирования
Многослойные структуры	ультравысокие и высокие частоты	20-10000	Приемлемые для четко определенной частоты излучения; проблема - адгезия слоев и деградация диэлектрической компоненты; большая стоимость из-за сложной технологии изготовления
Регулярная металлическая структура	ультравысокие и высокие частоты	15-10000	Эффективные исключительно для ультравысоких и высоких частот

Проведенные исследования показали, что экранирование не обеспечивает полную защиту от воздействия электромагнитного высокочастотного излучения, но может быть применено в комплексе с другими методами.

Так для фиксации факта влияния воздействия электромагнитного излучения возможно применение специальных электронных средств. Электронное средство для фиксации указанного факта должен удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать высокую чувствительность к электромагнитному излучению в широком диапазоне частот;
- максимально затруднять возможность внешнего вмешательства в работу устройства.

Такой способ может быть установлен в непосредственной близости к автоматизированной системе с целью определения факта влияния электромагнитного излучения на ее работу. Обычно, средство состоит из блока питания, детектора излучения, схемы сравнения, ключа, выходного реле и схемы фиксации [6].

При воздействии высокочастотного излучения в кругу детектора возникает препятствие. На входе блока сравнения формируется отрицательное напряжение, выход компаратора размыкается, включается коммутационное устройство, контакты могут быть задействованы для коммутации силовых цепей.

Экспериментальные исследования свидетельствуют о высокой эффективности таких средств. Срабатывание происходит при тех же условиях, при которых наблюдаются нарушения в работе системы. В частности, средство срабатывает как при воздействии на автоматизированную систему по радиоканалу, так и при косвенном воздействии, например, проводами питания.

Как уже отмечалось ранее, наиболее эффективным средством защиты автоматизированных систем от преднамеренных электромагнитных воздействий является использование комплекса организационно-технических и технических мероприятий.

Обозначим в общем виде комплекс подобных мероприятий на примере цифровой АТС.

1. Осуществление защиты каналов сигнализации и синхронизации цифровых соединительных линий со встречными АТС с использованием системы мониторинга и технологии межсетевых экранов.

2. Размещение АТС и всех ее компонентов в контролируемой зоне (зоне безопасности), где обязательно реализуются соответствующие организационно-режимные и ограничительные мероприятия.

3. Использование генераторов шума для минимизации угрозы использования информационных параметров побочных электромагнитных излучений и наводок (ПЭМИН) для нарушения конфиденциальности.

4. Размещение базовых станций системы беспроводного доступа стандарта DECT в контролируемых зонах, что позволяет обеспечить контроль за их подключением по ведущим каналам через кросс к АТС. Однако это не исключает снятия информации за счет излучения радиопередающей части базовых станций такими средствами, как специализированные сканеры и другие аналогичные приборы.

5. Реализация в составе защищенной корпоративной сети АТС услуг IP-телефонии. Защита IP-шлюза в АТС обеспечивается межсетевым экраном.

6. Защита программного обеспечения АТС, т.к. это самое уязвимое место защищенной корпоративной сети связи.

Таким образом, подводя итоги отметим, что на сегодняшний день одним из распространенных средств защиты автоматизированных систем от преднамеренных электромагнитных воздействий является экранирование с использованием различных экранирующих материалов, в состав которых входят новейшие защитные материалы, например, аморфные магнитомягкие сплавы различных составов и обработок. В процессе исследования авторами представлена сравнительная характеристика современных защитных материалов. Также в качестве защиты может использоваться различное оборудование, которое должно устанавливаться в непосредственной близости к автоматизированной системе, что позволяет фиксировать факт влияния электромагнитного излучения высокой частот.

В то же время, экспериментальные исследования и практика наглядно доказывают тот факт, что наиболее действенным средством защиты является использование комплекса организационно-технических и технических мероприятий, который способен обеспечить пассивную и активную защиту автоматизированной системы, а также имеет функции детектирования вредоносного воздействия электромагнитного излучения и, соответственно, функции сигнализации о наличии нежелательного влияния.

Список литературы

1. *Фоминич Э.Н.* Средства защиты систем автономного электроснабжения от воздействий мощных электромагнитных импульсов естественного и искусственного происхождения // Электроэнергия. Передача и распределение. - 2018. - №4. - С. 101-105.
2. *Двилянский А.А.* Теоретическая модель экранирующей конструкции, защищающей средства вычислительной техники объектов инфокоммуникационных систем от воздействия деструктивных электромагнитных излучений // Промышленные АСУ и контроллеры. - 2018. - №9. - С. 19-36.
3. *Грабчиков С.С.* Материалы электромагнитной и радиационной защиты для изделий электроники // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. - 2018. - №1. - С. 7-14.
4. *Ашихмин А.С., Родин С.В.* Защита электрооборудования от силового электромагнитного воздействия // Актуальные проблемы гуманитарных и социально-экономических наук. 2018. - №S1. - С. 21-23.
5. *Николашин Ю.Л.* Методы защиты автоматизированных систем управления от электромагнитного воздействия // Морская радиоэлектроника. - 2017. - №2(60). - С. 30-33.

**АННОТАЦИИ
ABSTRACTS****В.В. Харьков, А.Н. Николаев
ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СУХОГО
ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ЗЕРНОБОБОВОГО СЫРЬЯ**

Ключевые слова: воздушная классификация, электростатическая сепарация, измельчение, крахмал, белки. Рассматриваются современные сухие способы классификации зерновых и бобовых культур на крахмальную и белковую фракции. Выделены преимущества и недостатки воздушной и электростатической сепараций измельченного крахмалобелкового сырья по сравнению с традиционными (мокрыми) способами. Проведен анализ количественных подходов к моделированию основополагающих физических параметров, лежащих в основе рассматриваемых сухих способов переработки, таких как степень измельчения, сыпучесть порошка, заряд частиц.

**А.П. Буйносов, К.Г. Шумаков
СПОСОБ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ТОКОПРИЕМНИКА ЭЛЕКТРОВОЗА**

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, электровоз, токоприемник, техническое состояние, диагностика, оценка, способ.

В статье приводятся результаты отказов оборудования электровоза. Приведены полученные полиномиальные зависимости достижения заданной высоты от временного интервала, использование которых можно оценить техническое состояние токоприемника. Установлен критерий оценки исправности токоприемника, отличающийся от существующего в настоящее время (снятия статической характеристики).

**И.В. Грубрин, И.Ю. Лыгина
ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ СО
СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕМ**

Ключевые слова: информация, сверхразрешение, оценивание, сигнал.

В работе предложен комбинированный метод оценки параметров сигналов (мощности, углов прихода), позволяющий превзойти рэлеевский предел разрешения в многоканальных информационно-измерительных системах.

**С.М. Зраенко
АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ
ЗАБОЛОЧЕННЫХ ЛЕСНЫХ УЧАСТКОВ ПО
КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ**

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования Landsat 8, обнаружение болот, алгоритмы контролируемой и неконтролируемой классификации.

В работе представлены результаты исследования алгоритмов обнаружения заболоченных лесных участков по космическим снимкам спутника Landsat. Получено, что погрешности выделения болот для алгоритмов контролируемой классификации методами параллелепипеда и минимального расстояния составляют приблизительно от 1,9% до 5,4%. Для методов кластеризации ISODATA и k-means при этом получены одинаковые ошибки 10,3%, что свидетельствует об их меньшей эффективности при решении данной задачи.

**С.М. Зраенко
ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ОТРАЖЕНИЯ ОТ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО
СНИМКАМ LANDSAT 7**

Ключевые слова: космические снимки спутника Landsat 7, привязка снимков к карте, лесная растительность, статистические характеристики отражения.

В работе представлены результаты определения статистических характеристик отражения от лесной

**V.V. Kharkov, A.N. Nikolaev
MODELLING FEATURES OF GRAINS AND LEGUMES
DRY FRACTIONATION**

Keywords: modelling, air classification, electrostatic separation, milling, starch, protein.

The paper deals with modern dry methods for extraction starch and protein from grain and leguminous crops. Advantages and disadvantages of air classification and electrostatic separation with respect to wet methods are highlighted. The analysis of significant physical factors affecting on dry processing methods of grain and leguminous crops into starch and protein fractions is performed, such as size reduction, powder flowability and powder charging.

**A.P. Buinosov, K.G. Shumakov
METHOD FOR ESTIMATING THE TECHNICAL
CONDITION OF ELECTRIC TRUCK RECEIVER**

Keywords: railway transport, electric locomotive, pantograph, technical condition, diagnosis, assessment, ability.

The article presents the results of failures of electric locomotive equipment. The obtained polynomial dependences of the time interval of reaching a given height are given, the use of which can be estimated its technical condition of the pantograph. The criterion for assessing the serviceability of the pantograph, different from the existing one at the present time (removal of static characteristics).

**I.V. Grubrin, I.U. Lygina
IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF SIGNALS WITH
SUPERRESOLUTION**

Keywords: information, superresolution, estimation, signal.

The paper proposes a combined method for estimating the parameters of signals (power, angles of arrival), which allows to exceed the Rayleigh limit of resolution in multi-channel information-measuring systems.

**S.M. Zraenko
ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF DETECTING
WATERFORGED FOREST SECTIONS BY SPACE IMAGES**

Keywords: remote sensing data Landsat 8, wetlands detection, supervised and unsupervised classification algorithms.

This paper presents the results of a study of wetland forest detection algorithms from satellite images of the Landsat satellite. It was found that the errors in the selection of bogs for algorithms of controlled classification by parallelepiped methods and the minimum distance are approximately 1.9% to 5.4%. For ISODATA and k-means clustering methods, the same errors of 10.3% were obtained, which indicates their lower efficiency in solving this problem.

**S.M. Zraenko
STUDY OF STATISTICAL CHARACTERISTICS OF
REFLECTION FROM FOREST VEGETATION BY
PICTURES OF LANDSAT 7**

Keywords: satellite images of Landsat 7, snap pictures to map, forest vegetation, statistical characteristics of reflection.

The paper presents the results of determining the statistical characteristics of the reflection of forest vegetation from satellite images Landsat 7 on the example of the reserve "Denezhkin

растительности по космическим снимкам спутника Landsat 7 на примере территории заповедника «Денежский камень». Экспериментально доказана стационарность изображений при незначительной облачности на снимке и статистическая независимость пикселей для различных видов растительности. Показана нормальность отражения при различных значениях математического ожидания и дисперсии, зависящих от номера спектрального канала и состава растительного покрова. Определено существенное перекрытие гистограмм яркостей анализируемых объектов. Предложено при кластеризации лесной растительности объединять информацию, используя снимки разных сезонов года, а также нескольких спектральных каналов.

Ю.Н. Кондрашов

РАЗВИТИЕ ХРАНИЛИЩ ДАННЫХ ДЛЯ РАБОТЫ С BIG DATA В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Ключевые слова: хранилище данных, большие данные, Data Vault, Hadoop.

В работе рассматривается развитие хранилищ данных (ХД) для работы с большими данными (Big data) в системах поддержки принятия решений. Рассматриваются причины необходимости изменения классической концепции построения ХД при работе с большими данными, описывается модернизированная архитектура на основе модели Data Vault, её основные компоненты и принципы физической реализации на платформе Hadoop.

**Н.И. Красовская, А.В. Сычева, В.Н. Красовский
КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА**

Ключевые слова: электронный документооборот, система, информация, прибыль, эффективность.

В процессе работы собрана информация о документообороте и программах, уменьшающих затраты времени на различные виды управленческой деятельности на предприятиях. Сделаны выводы, что не все показатели содержатся в единой информационной базе и не всегда фиксируются в явном виде. Поэтому для решения поставленной задачи важно провести детальный анализ информационных систем, определить источники необходимой информации и методы оценки.

Д.А. Охотников, Буй Ши Хань

**АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ
ГРАНИЦ ДОРОГИ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЛОЖЕНИЯ
РАДИОЛОКАТОРА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Ключевые слова: автомобильная РЛС, радиолокационное изображение, дорожные границы.

Рассматриваются алгоритм и результаты вычисления местоположения дорожных границ относительно положения автомобильной радиолокационной системы (АРЛС) предупреждения столкновений (РПС). Приводятся результаты применения алгоритма при обработке радиолокационных изображений (РЛИ), полученных при натурных испытаниях прототипа АРЛС.

**А.В. Самсонова, Л.Л. Ципин, И.Э. Барникова
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФАЗОВОГО
ПРОСТРАНСТВА В ИНФОРМАЦИОННОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ
АНАЛИЗА СПОРТИВНЫХ ДВИЖЕНИЙ**

Ключевые слова: информационное обеспечение анализа спортивных движений, фазовое пространство, фазовые траектории, спортивные движения, эффективность упражнений.

Метод фазового пространства успешно применяется в информационном обеспечении исследований, связанных с изучением механизмов управления движениями и оценкой состояния здоровья человека. В спорте большой информативностью обладают фазовые траектории, построенные в координатах

"stone". The stationarity of images with low clouds in the image and the statistical independence of pixels for different types of vegetation are experimentally proved. The normality of reflection is shown for different values of mathematical expectation and dispersion depending on the number of the spectral channel and the composition of the vegetation cover. A significant overlap of the brightness histograms of the analyzed objects was determined. It is proposed to combine information using images of different seasons of the year, as well as several spectral channels when clustering forest vegetation.

Y.N. Kondrashov

**DEVELOPMENT OF DATA WAREHOUSES FOR
WORKING WITH BIG DATA IN DECISION SUPPORT
SYSTEMS**

Keywords: data warehouse, big data, Data Vault, Hadoop.

The paper discusses the development of data warehouses (DW) for working with big data (Big data) in decision support systems. The reasons for the need to change the classical concept of DW construction when working with big data are considered, the modernized architecture based on the Data Vault model, its main components and the principles of physical implementation on the Hadoop platform are described.

**N.I. Krasovskaya, A.V. Sycheva, V.N. Krasovsky
CRITERIA FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF
ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEMS**

Keywords: electronic document management, system, information, profit, efficiency.

In the process of work, gathered information on circulation and programs that reduce the time spent on different kinds of management activity at the enterprises. Findings that not all indicators are contained in a single database and do not always captured in an explicit form. So to solve the task, it is important to undertake a detailed analysis of the information, identify the sources of information and the methods of evaluation.

D.A. Okhotnikov, Bui Sy Hanh

**BOUNDARY LOCATION CALCULATION ALGORITHM
THE ROAD RELATIVE TO THE POSITION OF THE RADAR
COLLISION AVOIDANCE OF VEHICLES**

Keywords: car radar, radar image, road boundaries.

The algorithm and the results of calculating the location of road boundaries relative to the position of the automotive radar collision avoidance system (ARCAS) are considered. The results of the algorithm application in the processing of radar images obtained during field tests of the ARCAS prototype are presented.

**A.V. Samsonova, L.L. Tsipin, I.E. Barnikova
PERSPECTIVE OF APPLYING A PHASE SPACE IN THE
INFORMATION SUPPORT TO THE ANALYSIS OF SPORTS
MOVEMENTS**

Keywords: information support of sports movements analysis, phase space, phase trajectories, sports movements, exercise efficiency.

The phase space method is successfully used in the information support of research related to the study of motion control mechanisms and assessment of human health. Phase trajectories where the axes are the current muscle length and the speed of muscle length change tend to be the most informative when applied to sports. By using them, the effectiveness of exercises

«текущая длина – скорость изменения длины мышцы». С их помощью произведена оценка эффективности упражнений в спринтерском и барьерном беге, педалировании, беге на средние дистанции, волейболе, атлетизме. Перспективными направлениями использования фазового пространства при анализе спортивных движений являются изучение механизмов активации мышц и их рецепторного аппарата, сравнение основного и специальных упражнений.

Э.С. Соколова, О.П. Тимофеева, С.Н. Капранов
РАЗМЕЩЕНИЕ ОБЪЕКТОВ НА СЕТЕВОЙ АРХИТЕКТУРЕ
С ПОМОЩЬЮ ЭВРИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Ключевые слова: размещение объектов на сетевой архитектуре, оптимизация, эвристические алгоритмы, генетический алгоритм, алгоритм гравитационного поиска. В работе рассматривается задача размещения объектов (предприятий) на уже имеющейся сетевой архитектуре (сеть клиентов). Приводится ее решение эвристическими методами оптимизации - генетическим алгоритмом и алгоритмом гравитационного поиска.

И.В. Афанасьева
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ПРОЦЕССА
СПИРАЛЬНОГО ОРЕБРЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ
СВАРКОЙ И ЛАЗЕРОМ

Ключевые слова: высокочастотная сварка, лазер, оребрение. В работе осуществлено сравнение технических и экономических показателей процессов оребрения высокочастотной сваркой (токами высокой частоты) и лазером. Описано сравнение установки высокочастотной сварки и способ модернизации для лазерной сварки. Приведена оценка характеристик процесса привара с точки зрения скорости, постоянных и переменных издержек. Обоснован объем продукции и соответствующий срок окупаемости применения лазерной сварки относительно использования метода привара токами высокой частоты.

Е.П. Зеленецкая, А.Г. Горюнов
МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСТРАКЦИОННЫМ
БЛОКОМ АФФИНАЖНОГО СТЕНДА

Ключевые слова: экстракционный блок, система управления, математическая модель, ядерная безопасность, компьютерная модель. В работе рассмотрены результаты исследования работы систем управления экстракционным блоком посредством компьютерного моделирования. Приведено скорректированное математическое описание узлов, входящих в экстракционный блок аффинажного стенда. Представлены результаты, подтверждающие возможность распределения системы управления на часть экстракционного блока без снижения качества извлекаемых ядерных материалов.

А.А. Медведев, Н.Е. Конева
АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ
ТВЭЛОВ

Ключевые слова: герметичность, ТВЭЛ, целостность изделий, течеискание, методы контроля целостности, ядерная безопасность. В статье рассмотрены известные методы контроля герметичности изделий и рекомендован оптимальный метод для проверки ТВЭЛов (тепловыделяющих элементов), используемых в качестве топлива для ядерных реакторов. Указывается, что в ядерной отрасли к безопасности предъявляются высокие требования, поэтому метод течеискания должен иметь наибольшую чувствительность, при этом контролируемая среда должна иметь необходимые параметры.

used in sprint, hurdling, pedalling, middle distance running, volleyball, athleticism training routines were evaluated. The most perspective areas of applying the phase space in relation to sport motion analysis are the study of the muscle activation mechanisms and comparison of the primary and secondary exercises in a training routine.

E.S. Sokolova, O.P. Timofeeva, S.N. Kapranov
OBJECTS PLACEMENT ON NETWORK ARCHITECTURE
USING HEURISTIC METHODS

Keywords: objects placement on network architecture, optimization, heuristic algorithms, genetic algorithm, gravitational search algorithm. The paper provides a objects (developments) placement problem on existing network architecture (customer network). This problem are solved by heuristic algorithms (genetic algorithm, gravitational search algorithm).

I.V. Afanasyeva
TECHNICAL AND ECONOMIC COMPARISON OF THE
PROCESS OF SPIRAL FINNING WITH HIGH-FREQUENCY
WELDING AND LASER

Keywords: high-frequency welding, laser, finning. The paper compares technical and economic indicators of the fins by high-frequency welding (high-frequency currents) and a laser. A comparison of a high-frequency welding installation and a modernization method for laser welding is described. An assessment of the characteristics of the weld process in terms of speed, fixed and variable costs. The volume of production and the corresponding payback period for the use of laser welding with respect to the use of the method of welding with high-frequency currents are substantiated.

E.P. Zelenetskaya, A.G. Goryunov
COMPUTER-AIDED MODEL OF EXTRACTION UNIT
MANAGEMENT SYSTEM OF REFINERY PLANT

Keywords: extraction unit, control system, mathematical model, nuclear safety, computer-aided model. The paper provides the results of the extraction unit management systems research data based on computer-aided simulation. The adjusted mathematical description of some nodes included in extraction unit of the refinery plant is provided. The confirmatory evidence for application possibility of the control system spreading to a part of the extraction unit with no loss in extracted nuclear materials performance are presented.

A.A. Medvedev, N.E. Koneva
ANALYSIS OF METHODS FOR THE CONTROL OF THE
TIGHTNESS OF TVELS

Keywords: impermeability, fuel element, product integrity, leak detection, integrity control methods, nuclear safety. The article discusses known methods for monitoring the leaktightness of products and recommends the optimal method for testing fuel rods (fuel elements) used as fuel for nuclear reactors. The nuclear industry places high demands on safety, so the leak detection method should have the highest sensitivity. At the same time, the controlled medium must have the appropriate parameters.

М.В. Овечкин

КОНЦЕПЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ
МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ
РЕНТГЕНОГРАММ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, радиография, распознавание рентгенограмм, диаграмма использования.

В работе представлена концепция использования искусственной нейронной сети в рамках процесса неразрушающего контроля сварных соединений электромагнитными методами. Автоматизированное распознавание результатов контроля позволит избежать наиболее сложной и монотонной задачи – распознавания полученных рентгенограмм. В статье представлены диаграмма использования нейросетевой модели и диаграмма деятельности программиста при работе с искусственной нейронной сетью.

В.Ф. Пегашкин, Г.А. Осипенкова, М.В. Миронова
УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА ОТВЕРСТИЙ
ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ В
ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ДЕТАЛИ

Ключевые слова: отделочно-упрочняющая обработка, осциллирующий инструмент, качество поверхности.

Выявлены корреляционные зависимости между технологическими параметрами отделочно-упрочняющей обработки отверстия осциллирующей детали и показателями качества поверхностного слоя.

С.В. Прохоров

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В
СТРОИТЕЛЬСТВЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРОИЗВОДСТВА

Ключевые слова: строительство, автоматизация процессов, цифровое проектирование, цифровая экономика, системы управления.

В работе представлены результаты изучения современных программных продуктов в области строительного производства, направленных на повышения уровня рентабельности и ресурсосбережения. «Цифровизация» экономики требует применения нового подхода к проектированию объектов, сбору, обработке и передачи информации, а также осуществлению контроля за производством работ. Применение BIM –технологий, беспилотных летающих аппаратов, лазерного сканирования позволяет существенно сократить затраты материальных и людских ресурсов на выполнение строительных работ. Кроме этого, использование современных гибридных силовых и рабочих установок в строительной технике, с интегрированными системами позиционирования и диагностики, позволяет не только снизить эксплуатационные затраты, но и уменьшить выбросы в окружающую среду. Рассмотренные в статье мероприятия направлены на повышение эффективности строительного производства и выведению его на современный мировой уровень.

С.Ю. Городецкий

МЕТОДЫ УЧЕТА МНОГОЭКСТРЕМАЛЬНЫХ
ОГРАНИЧЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОДНОМЕРНОЙ
ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И ИХ ЧИСЛЕННОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ НА ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ КЛАССАХ
ГЛАДКИХ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ

Ключевые слова: глобальная оптимизация, многоэкстремальные ограничения, липшицевы производные, генератор тестовых задач с ограничениями, численные эксперименты.

Разработана программная библиотека для управляемой генерации многоэкстремальных гладких одномерных тестовых задач оптимизации со сложными ограничениями. Построены два численных метода условной глобальной

M.V. Ovechkin

THE CONCEPT OF USING A NEURAL NETWORK MODEL
OF AUTOMATED RECOGNITION OF RADIOGRAPHS OF
WELDED JOINTS

Keywords: neural network, radiograph, x-ray detection, use case diagram.

The paper presents the concept of using an artificial neural network in the process of non-destructive testing of welded joints by electromagnetic methods. Automated recognition of control results will allow to avoid the most difficult and monotonous task-recognition of the received radiographs. The article presents a diagram of the use of a neural network model and a diagram of the programmer's activity when working with an artificial neural network.

G.A. Osipenkova, V.F. Pegashkin, M.V. Mironova
HARDENING HOLES WITH PLASTIC DEFORMATION IN
OSCILLATING PARTS

Keywords: finishing and hardening treatment, oscillating tool, surface quality.

Correlation dependences between the technological parameters of the finishing-hardening treatment of the hole oscillating the part and the quality indices of the surface layer are revealed.

S.V. Prokhorov

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL
PROCESSES IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY TO
IMPROVE PRODUCTION EFFICIENCY

Keywords: construction, process automation, digital design, digital economy, control systems.

The paper presents the results of the study of modern software products in the field of construction production aimed at improving the level of profitability and resource saving. "Digitalization" of the economy requires a new approach to the design of facilities, the collection, processing and transmission of information, as well as the implementation of control over the production of works. The use of BIM –technologies, unmanned aerial vehicles, laser scanning can significantly reduce the cost of material and human resources for construction works. In addition, the use of modern hybrid power and work units in construction equipment, with integrated positioning and diagnostics systems, can not only reduce operating costs, but also reduce emissions into the environment. The measures considered in the article are aimed at improving the efficiency of construction production and bringing it to the modern world level.

S.Yu. Gorodetsky

MULTIEXTREMAL CONSTRAINTS ACCOUNTING
METHODS IN THE UNIVARIATE GLOBAL
OPTIMIZATION PROBLEMS AND THEIR NUMERICAL
RESEARCH USING REPRESENTATIVE CLASSES OF
CONTINUALLY DIFFERENTIABLE TEST PROBLEMS

Keywords: global optimization, multiextremal constraints, Lipschitz derivatives, generator of test problems with constraints, numerical experiments.

A software library has been developed for the controlled generation of univariate multiextremal continually differentiable optimization test problems with complex constraints. Two numerical global optimization methods with constraints were constructed for problems with non-calculated Lipschitz

оптимизации для задач с невычислимыми липшицевыми производными. На двух представительных выборках, включающих по 200 сгенерированных тестовых задач, проведено численное исследование эффективности этих методов в сопоставлении с известным индексным методом учета ограничений. Определен наиболее эффективный метод.

В.Д. Петелина

О РЕШЕНИИ РЕГУЛЯРИЗОВАННЫХ УРАВНЕНИЙ ВОЗМУЩЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА

Ключевые слова: система дифференциальных уравнений возмущенного движения тела, регуляризирующая независимая переменная, возмущение, многочлен, приближение.

Настоящая статья посвящена определению возмущений первого и второго порядка в прямоугольных координатах и составляющих скорости движения тела. С этой целью была построена специальная система дифференциальных уравнений возмущенного движения, правые части которой представляют собой конечные многочлены по степеням независимой регуляризирующей переменной. Данная система позволяет создать единый алгоритм для определения возмущений первого и второго порядка в виде конечных многочленов по степеням регуляризирующих переменных, которые выбираются на каждом шаге аппроксимации. По результатам расчетов с использованием разработанного метода были получены коэффициенты аппроксимирующих многочленов, представляющих собой прямоугольные координаты, а также составляющие регуляризированной скорости тела. Разработанный метод позволяет при помощи аппроксимирующих многочленов вычислять любую промежуточную точку траектории движения тела.

Т.Н. Бобылева

ЭФФЕКТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЛОИСТОГО УПРУГО-ПОЛЗУЧЕГО МАССИВА С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ШАХТОЙ

Ключевые слова: усреднение, ползучесть, слоистый массив. В статье используются теории наследственной ползучести и усреднения для определения напряжений в слоистом упруго-ползучем массиве с вертикальной шахтой. Предложен способ получения усредненных (эффективных) упруго-ползучих характеристик и усредненного поля напряжений по известным свойствам слоев. Задача о неоднородном упруго-ползучем массиве сводится к задаче об однородной трансверсально-изотропной среде. Дано аналитическое решение определения напряженного состояния данного массива для различных краевых условий на поверхности шахты.

Г.М. Гузаиров

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУНКЦИЙ НА С ТИПА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОПЕРАТОРОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ГРУППЫ $GL(2, C)$ В СМЕШАННЫХ БАЗИСАХ

Ключевые слова: представления группы Лоренца, интегральные преобразования, комплексные преобразования Фурье, комплексные преобразования Меллина, интегральные операторы представлений, ядра интегральных операторов, гипергеометрические ряды Куммера.

Комбинируя разложения функций на C в комплексные интегралы Фурье и Меллина, мы получим реализацию представлений группы $GL(2, C)$ интегральными операторами представлений в смешанных базисах. Ядра этих интегральных операторов выражаются через произведения двух гипергеометрических рядов Куммера. С этими ядрами получена новая пара взаимно обратных интегральных преобразований функций на C типа интегральных операторов представлений в смешанных базисах.

derivatives. A numerical study of these methods' effectiveness in comparison with the known index-method of constraints accounting was conducted on two representative sets of 200 generated test problems each. The most effective method was determined.

V.D. Petelina

ABOUT THE DECISION REGULARIZED EQUATIONS OF PERTURBED MOTION BODY.

Keywords: system of differential equations of perturbed movement, regularizing an independent variable, perturbation, polynomial, approximation.

The article deals with determination of the second- and higher-order perturbations in Cartesian coordinates and body motion velocity constituents. A special perturbed motion differential equations system is constructed. The right-hand sides of this system are finite polynomials relative to an independent regularizing variable. This allows constructing a single algorithm to determine the second and higher order perturbations in the form of finite polynomials relative to some regularizing variables that are chosen at each approximation step. Following the calculations results with the use of the developed method, the coefficients of approximating polynomials representing rectangular coordinates and components of the regularized body speed were obtained. The developed methods make it possible to calculate, by the approximating polynomials, any intermediate point of the motion trajectory of the body.

T.N. Bobyleva

EFFECTIVE CHARACTERISTICS OF A STRESSED-DEFORMED STATE OF A LAYERED ELASTIC-CREEPING ARRAY WITH A VERTICAL CYLINDRICAL SHAFT

Keywords: averaging, creep, layered array.

In the paper hereditary creep and homogenization theories are used to determine stresses in the layered elastic creeping array with a vertical shaft. A method is proposed for obtaining averaged (effective) elastic creeping characteristics and an averaged stress field over the known properties of the layers. The problem of an inhomogeneous elastic-creeping array is reduced to the problem of a homogeneous transversely isotropic medium. An analytical solution is given to determine the stress state of a given array for various boundary conditions on the surface of the shaft.

G.M. Guzairov

INTEGRAL TRANSFORMATIONS OF FUNCTIONS ON C TYPE OF INTEGRAL REPRESENTATION OPERATORS OF $GL(2, C)$ IN MIXED BASES

Keywords: representations of the Lorentz group, integral transforms, complex Fourier transforms, complex Mellin transforms, integral representation operators, kernels of integral operators, Kummer hypergeometric series.

Combining the decompositions of functions on C into complex Fourier and Mellin integrals, we obtain the realization of the representations of the group $GL(2, C)$ by the integral operators of representations in mixed bases. The kernels of these integral operators are expressed in terms of the products of two hypergeometric Kummer series. A new pair of mutually inverse integral transformations of functions on C of the type of integral representation operators in mixed bases was obtained with these kernels.

А.Е. Лебедев, И.С. Гуданов, А.Б. Капранова,
А.А. Ватагин, Д.Д. Бахаева
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА
ФОРМИРОВАНИЯ РАЗРЕЖЕННОГО ПОТОКА ЩЕТОЧНЫМ
РАСПЫЛИТЕЛЕМ

Ключевые слова: сегрегация, смешение, компоненты, поток, агрегат.

В работе представлена новая конструкция смесительного аппарата для получения однородных смесей, а также изложена математическая модель формирования разреженного потока щеточным распылителем.

М.Г. Маликов, А.В. Жданов
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРЕЛОЧНОГО
ПЕРЕВОДА С ОСТРЯКАМИ УВЕЛИЧЕННОЙ ДЛИНЫ ДЛЯ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ
МАГИСТРАЛЕЙ

Ключевые слова: стрелочный перевод, математическая модель, высокоскоростная магистраль.

В работе представлены результаты математического моделирования работы стрелочного перевода с остряками увеличенной длины для высокоскоростных железнодорожных магистралей. Показано, что при использовании в стрелочном переводе остряков длиной 13.5 метров достаточно применения двух приводов с передаточным отношением редуктора 0,5 для обеспечения нормативных требований к стрелочному переводу.

Н.А. Мунасыпов, Г.М. Гузаиров
МОДЕЛЬ МАТРИЧНОЙ ИГРЫ В ЗАДАЧЕ ПОСТРОЕНИЯ
ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА СИСТЕМЫ
РАСПОЗНАВАНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ РЕСУРСНЫХ
ОГРАНИЧЕНИЙ И ВНЕШНИХ СРЕДСТВ
ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

Ключевые слова: признаковое пространство, система распознавания, оптимальные стратегии, цена игры, функция выигрыша, ресурсные ограничения.

Рассмотрена теоретико-игровая схема построения оптимального признакового пространства в системе распознавания при наличии некоторой стороны, предпринимающей меры противодействия процессу измерения признаков. В качестве меры близости между объектами признакового пространства выбрана евклидова метрика. Предполагается наличие у каждой стороны ресурсных ограничений, предназначенных для определения значений признаков или противодействия выявлению признаков. Проведён анализ конфликтной ситуации, приводящий к модели матричной игры, указано нахождение оптимальных стратегий и цены игры.

М.К. Хасанов
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ
ПРИ ИНЖЕКЦИИ СЕРОВОДОРОДА В ПОРИСТУЮ СРЕДУ,
НАСЫЩЕННУЮ НЕФТЬЮ И ВОДОЙ

Ключевые слова: математическая модель, пористая среда, фильтрация, газогидраты, сероводород.

Представлена математическая модель инъекции жидкого сероводорода в пористую среду, насыщенную водой и нефтью. Получена зависимость температуры границы образования газогидрата от начального давления. Определены диапазоны значений давления инъекции и начального давления пористой среды, при которых возможно существование промежуточной области, насыщенной смесью воды, сероводорода и его газогидрата, находящихся в состоянии термодинамического равновесия.

А.Г. Шляхова, А.Т. Шляхов,
О.А. Шипилова, М.Ю. Филимонова
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ С
ПРИМЕНЕНИЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Ключевые слова: физические законы, дифференциальные уравнения, методы Лагранжа и Бернулли.

A.E. Lebedev, I.S. Gudanov, A.B. Kapranova,
A.A. Vatagin, D.D. Bahaeva
MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF FORMING
A SPARED FLOW WITH A BRUSH SPRAY

Keywords: segregation, mixing, components, flow, aggregate.
The paper presents a new design of the mixing apparatus for obtaining homogeneous mixtures, as well as a mathematical model of the formation of a rarefied flow brush spray.

M.G. Malikov, A.V. Zhdanov
MATHEMATICAL MODEL OF RAILROAD SWITCH WITH
THE INCREASED LENGTH OF POINTS FOR HIGH-SPEED
RAILWAYS

Keywords: railroad switch, mathematical model, high-speed railways.

The paper presents the results of mathematical modeling of railroad switch with the increased length of points for high-speed railways. It is shown that when using points with 13.5 meters long in the railroad switch, it is sufficient to use two drives with a gear ratio of 0.5 to ensure regulatory requirements for railroad switch.

N.A. Munasypov, G.M. Guzairov
MATRIX GAME MODEL IN THE PROBLEM OF
CONSTRUCTING A TARGET SPACE OF A RECOGNITION
SYSTEM WITH RESOURCE RESTRICTIONS AND
EXTERNAL MEASURES AVAILABLE

Keywords: feature space, recognition system, optimal strategies, game price, payoff function, resource constraints.

The game-theoretic scheme of constructing the optimal attribute space in the recognition system is considered in the presence of some party taking measures to counter the process of measuring attributes. The Euclidean metric is chosen as a measure of proximity between objects of attribute space. It is assumed that each side has resource limitations designed to determine the values of signs or counteract the identification of signs. The analysis of the conflict situation leading to the matrix game model is carried out, the determination of the optimal strategies and the price of the game is indicated.

M.K. Khasanov
THE MATHEMATICAL MODEL OF HYDRATE
FORMATION AT HYDROGEN SODIUM INJECTION IN A
POROUS MEDIUM SATURATED WITH OIL AND WATER
Keywords: mathematical model, porous medium, filtration, gas hydrates, hydrogen sulfide.

A mathematical model for the injection of liquid hydrogen sulfide into a porous medium saturated with water and oil is presented. The temperature dependence of the gas hydrate formation boundary on the initial pressure was obtained. The ranges of the injection pressure and the initial pressure of the porous medium are determined, at which the intermediate region saturated with a mixture of water, hydrogen sulfide and its gas hydrate, which are in a state of thermodynamic equilibrium, can exist.

A.G. Shlyakhova, A.T. Shlyakhov,
O.A. Shipilova, M.Y. Filimonova
MATHEMATICAL MODELING OF PROBLEMS USING
DIFFERENTIAL EQUATIONS

Keywords: physical laws, differential equations, methods of Lagrange and Bernoulli.

В данной работе рассмотрены физические задачи, приводящие к одному и тому же виду дифференциальных уравнений. Получены и проанализированы зависимости физических величин от времени.

Н.П. Мошуров, Ю.Д. Фот

**ЗАЩИТА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ОТ
ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Ключевые слова: защита, электромагнитное излучение, экранирование, система, оборудование, организационно-технические средства.

В статье рассмотрены современные средства и методы защиты автоматизированных систем от преднамеренных электромагнитных воздействий. Отдельное внимание уделено экранированию, использованию современного оборудования. Особый акцент сделан на создании комплексной системы организационных-технических и технологических средств.

In this paper we consider physical problems that lead to the same type of differential equations. The dependences of physical quantities on time are obtained and analyzed.

N.P. Moshurov, Yu.D. Fot

**PROTECTION OF AUTOMATED SYSTEMS FROM
DELIBERATE ELECTROMAGNETIC EFFECTS**

Keywords: protection, electromagnetic radiation, shielding, system, equipment, organizational and technical means.

The article discusses modern means and methods for protecting automated systems from deliberate electromagnetic effects. Special attention is paid to shielding, the use of modern equipment. Particular emphasis is placed on creating a comprehensive system of organizational, technical and technological means.

Публичный лицензионный договор-оферта о правах на статью

Редакция журнала «Научно-технический вестник Поволжья» предлагает Вам присылать свои статьи для публикации на страницах журнала, а также на сайте Научной электронной библиотеки (НЭБ). Предоставление Автором своего произведения является полным и безоговорочным акцептом, т.е. данный договор считается заключенным с соблюдением письменной формы. Присылая для публикации произведение, Автор также предоставляет Редакции журнала права на использование произведения и гарантирует, что он обладает достаточным объемом прав на передаваемое произведение. Также Автор предоставляет редакции журнала право переуступить на договорных условиях частично или полностью полученные по настоящему Договору права третьим лицам без выплаты Автору вознаграждения. Все авторские права регулируются в соответствии с действующим законодательством России.

Договор публичной оферты по обработке персональных данных

В процессе осуществления выпуска журнала "Научно-технический вестник Поволжья", ООО "Рашин Сайнс" осуществляется обработка персональных данных, предоставленных авторами статей в рамках сообщения своих регистрационных данных для осуществления публикации в журнале (имя, фамилия, отчество, адрес автора, контактный телефон и e-mail приводятся в регистрационной форме, заполняемой авторами при отправке статьи в журнал). Обработка осуществляется редакцией журнала для целей надлежащей отправки журнала автору и возможности связи с автором лиц, заинтересованных в результатах труда автора статьи. Под обработкой персональных данных в контексте настоящего согласия понимаются действия редакции по сбору, систематизации, накоплению, хранению, использованию, распространению, уничтожению персональных данных, а также действия по их дальнейшей обработке с помощью автоматизированных систем управления базами данных, и иных программных средств, используемых редакцией журнала. Настоящее согласие автора на обработку персональных данных является бессрочным и может быть отозвано в любой момент путем отказа автора от получения журнала и дальнейшей обработки его персональных данных.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ПОВОЛЖЬЯ

№9 2019

Направления:

**05.13.01 – СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ (технические науки)**

**05.13.06 – АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ
(технические науки)**

**05.13.11 – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ
СЕТЕЙ (физико-математические науки)**

**05.13.11 – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ
СЕТЕЙ (технические науки)**

**05.13.18 – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫЕ
МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ (технические науки)**

**05.13.19 – МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ,
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
(физико-математические науки)**

www.ntvp.ru

Реестровая запись от 08.05.2019 серия ПИ № ФС 77 -75732

Подписано в печать 22.09.2019 Формат А4. Печать цифровая.

Дата выхода в свет 22.09.2019

9,6 усл.печ.л. 11,2 уч.изд.л. Тираж 500 экз. Заказ 2230.

Учредитель: ООО "Рашин Сайнс":

420111, г. Казань, ул. Университетская, 22, помещение 23.

Адрес редакции, издательства, типографии – ООО "Рашин Сайнс":

420111, г. Казань, ул. Университетская, 22, помещение 23.

Цена свободная.

© Рашин Сайнс

тел. (843) 216-30-35

Отпечатано с готового оригинал-макета

ООО «Рашин Сайнс»