

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ВЕСТНИК
ПОВОЛЖЬЯ**

Сборник научных статей

№ 2 2012

Направления:

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ
ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

Казань

2012

УДК 60

ББК 30-1

Н-66

Н-66 Научно-технический вестник Поволжья. №2 2012г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2012. – 332с.

ISSN 2079-5920

Журнал зарегистрирован в Управлении Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций ПИ № ФС77-41672 от 13 августа 2010г.

Журнал размещен в открытом бесплатном доступе на сайте www.ntvp.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» № 12025.

Главный редактор Р.Х. Шагимуллин

Редакционная коллегия

И.Н. Дияров – д.т.н., проф.; Б.Н. Иванов – д.т.н., проф.; В.С. Минкин – д.х.н., проф.; В.К. Половняк – д.х.н., проф.; Х.Э. Харлампиди – д.х.н., проф.; Р.Х. Шагимуллин – к.т.н., проф.

В сборнике научных трудов отражены материалы по теории и практике технических, физико-математических и химических наук.

Материалы сборника 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

© Научно-технический вестник Поволжья, 2012 г.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>А.С. Березин, Т.Т. Зинкичева к.х.н., Р.Р. Назмутдинов д.х.н., В.К. Половняк д.х.н., А.М. Сайфутдинов к.х.н.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА МОЛЕКУЛЯРНОГО ЙОДА ЧЕРЕЗ МЕЖФАЗНУЮ ГРАНИЦУ ВОДА/АЛКАН	10
<i>Б. Н. Иванов д.т.н., Р. Н. Костромин к.т.н., В. С. Минкин д.х.н., В. В. Чистяков к.т.н.</i> ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИФИКАТОРА НА ВУЛКАНИЗАЦИЮ ПОЛИСУЛЬФИДНЫХ ОЛИГОМЕРОВ	18

СЕКЦИЯ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>И.С. Балафендиева, Д.В. Бережной к.ф.-м.н., Д.А. Егоров</i> РАСЧЕТ ОСАДОК В МНОГОСЛОЙНОМ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОМ ГРУНТЕ ПРИ ПРОКЛАДКЕ ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНА	23
<i>А.В. Доль</i> ОДНОМЕРНАЯ СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ КРОВОТОКА В КРУПНЫХ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДАХ	27
<i>В.В. Трегулов к.т.н.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР CdS/Si(p)	31
<i>А.И. Хазбулатов</i> РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОТОЧНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗА ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ	35

СЕКЦИЯ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>А.В. Басов к.т.н., В.Н. Басов д.х.н., О.И. Бахирева к.х.н.</i> ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И ИХ СОЕДИНЕНИЙ	39
<i>А.В. Басов к.т.н., В.Н. Басов д.х.н., О.И. Бахирева к.х.н.</i> ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АМАЛЬГАМ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА	43
<i>В.Н. Басов д.х.н., О.И. Бахирева к.х.н., В.В. Вольхин д.х.н., Л.С. Пан к.х.н.</i> СИНТЕЗ СОРБЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЕРМИКУЛИТА И МИКРООРГАНИЗМОВ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИОНОВ И РАДИОНУКЛИДОВ СТРОНЦИЯ	48

СЕКЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Л.Х. Абдулхаликова</i> РЕШЕНИЕ ОДНОЙ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	53
<i>А.П. Абызов к.т.н., О.И. Тарабарин д.т.н.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ В ВИДЕ ТРЕЩИН	58
<i>С.Н. Алехин к.т.н.</i> ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВИБРАЦИОННОГО ПОЛЯ ПОДВЕСНОЙ ЧАСТИ СТИРАЛЬНЫХ МАШИН	64
<i>В.В. Андреев д.т.н., А.А. Бухалов</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ	70

Ю.А. Анисимов, В.Л. Долганов к.т.н., С.Х. Загидуллин д.т.н., Б.Е. Шенфельд д.т.н. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ГРАНУЛИРОВАННОЙ СЕРЫ В ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМНЕФТЕОРГСИНТЕЗ»	73
Е.А. Архангельская, к.т.н., М.В. Грушичева ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЙ	77
В.И. Астащенко д.т.н., Р.А. Бикулов к.т.н., М.С. Колесников д.т.н., И.О. Леушин д.т.н. ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЗИРОВАННОГО ЧУГУНА ДЛЯ ОПОРНОГО СЛОЯ ЛИТЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ШТАМПОВ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ	82
М.М. Башаров к.т.н., А.Г. Лаптев д.т.н., М.В. Саитбаталов МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В НАСАДОЧНОЙ КОЛОННЕ С ПЕРЕМЕННЫМИ МАССОВЫМИ РАСХОДАМИ ПО ВЫСОТЕ	85
В.Ф. Беккер к.т.н. ДИНАМИКА МЕХАНИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВИЖНОЙ ШАРОВОЙ НАСАДКИ	94
А.В. Беляев к.т.н., А.С. Григоров ОБНАРУЖЕНИЕ АТАК НА БАЗЫ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫПОЛНЕНИЯ SQL- ЗАПРОСОВ	99
Г.Н. Беляев д.т.н., В.Л. Долганов к.т.н., С.Х. Загидуллин д.т.н., Ю.И. Хвастухин д.т.н., Б.Е. Шенфельд д.т.н. ГРАНУЛИРОВАНИЕ ГЛИНИСТО-СОЛЕВЫХ ШЛАМОВ – ОТХОДА ПРОИЗВОДСТВА КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ	105
Р.А. Бикулов к.т.н., Ф.Г. Карих д.т.н., Н.Н. Сафронов д.т.н. ЛИТАЯ ВСТАВКА ШТАМПА ГОРЯЧЕГО ОБЪЁМНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ИЗ ДИСПЕРСНЫХ ОТХОДОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ	112
А.П. Буйносов к.т.н. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РЕСУРСА БАНДАЖЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА	116
А.П. Буйносов к.т.н., И.М. Пышный ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ РАЗНОСТИ ДИАМЕТРОВ БАНДАЖЕЙ С УЧЕТОМ ЗАТРАТ НА РЕМОНТ КОЛЕСНЫХ ПАР ЭЛЕКТРОВЗОВ	122
Т.В. Бурнышева к.т.н., А.Ф. Разин д.т.н., О.А. Штейнбрехер ОЦЕНКА ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ОБОЛОЧЕЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ	127
В.М. Бушуев, Р.К. Мусин д.т.н., И.Л. Синани д.т.н. СТРУКТУРА ШЛИКЕРНОГО ПОДСЛОЯ И ФОРМИРОВАНИЕ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ ПИРОУГЛЕРОДНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ГЕРМЕТИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ УУКМ	132
А.Б. Ветошкин к.т.н., Д.В. Куделин, Т.Н. Несиоловская д.т.н. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ИСПЫТАНИЯ НА ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА УСИЛЕНИЯ НАПОЛНЕННЫХ БУТАДИЕН-СТИРОЛЬНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ	137
Д.В. Вожегов, Д.А. Страбыкин д.т.н. МЕТОД ПАРАЛЛЕЛЬНОГО АБДУКТИВНОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ФАКТОВ	141
В.И. Воловач к.т.н., А.С.О. Мамедов, А.А. Попов к.т.н. АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КОГЕРЕНТНОГО И НЕКОГЕРЕНТНОГО МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ ОХРАНЫ	148
В.И. Воловач к.т.н., А.А. Попов к.т.н., А.В. Савенко РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБНАРУЖЕНИЯ И РАЗЛИЧЕНИЯ СИГНАЛОВ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ ОХРАНЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПРИНЦИПЫ АКТИВНОЙ И ПОЛУАКТИВНОЙ ЛОКАЦИИ	155
Д.А. Габриелян МАГНИТОТЕПЛОВОЙ ДВИГАТЕЛЬ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МАГНИТОТЕПЛОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ	160
А.М. Гирфанов к.т.н., А.В. Дворянкин, Д.В. Неделько к.т.н., С.А. Михайлов д.т.н., Т.А. Мухаметишин К ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОСНОВНЫХ АГРЕГАТОВ ВЕРТОЛЕТА	167

<i>Г.М. Гончаров д.т.н., И.С. Гуданов к.т.н., А.А. Ломов д.т.н., В.С. Черепенин</i>	
ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛАСТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИ ЭКСТРУЗИИ ПРОТЕКТОРНЫХ ЗАГОТОВОК АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН	171
<i>М.С. Гринкруг к.т.н., Н.А. Новгородов, Ю.И. Ткачева к.т.н.</i>	
ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КОММУТАЦИИ НАГРУЗОК	179
<i>А.М. Долганов к.т.н., Т.Н. Иванова к.т.н.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООБМЕНА НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ПЛАСТИН ПО КРОМКЕ	186
<i>А.А. Захаров д.т.н., Е.Р. Кожанова</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТДЕЛЬНОГО КОЛЬЦЕВОГО МАГНИТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ФУНКЦИИ ГАУССА ВТОРОГО ПОРЯДКА	190
<i>М.В. Зильберман д.х.н., Е.А. Пичугин, Н.Б. Ходяшев д.х.н., М.В. Черепанов, Б.Е. Шенфельд д.т.н.</i>	
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОСТАВА БУРОВЫХ ШЛАМОВ НА КЛАСС ОПАСНОСТИ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ	194
<i>С.М. Зраенко к.т.н.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСФОКУСИРОВКИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ	203
<i>А.М. Игнатова</i>	
МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАЛЯХ	208
<i>И.Н. Ищенко</i>	
МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ	212
<i>А.В. Козлова, В.Я. Модорский д.т.н., В.Ю. Петров д.т.н., А.Н. Поник д.т.н.</i>	
ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАСТРОЕК ГАЗОХОДА ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОТВОДА И ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЯЧИХ ГАЗОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК	216
<i>Г.А. Козлова к.х.н., Н.Б. Ходяшев д.т.н., Б.Е. Шенфельд д.т.н.</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТРАБОТАННЫХ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ТРАВЯНЫХ РАСТВОРОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД И ПОЛУЧЕНИЯ ПИГМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	220
<i>Л.М. Котляр д.ф.-м.н., Г.Ю. Шакирова</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОДОМ	223
<i>Д.В. Куделин, Т.Н. Несиоловская д.т.н.</i>	
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТОНКОСТЕННЫХ РЕЗИНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ	229
<i>Л.Е. Мальцев д.ф.-м.н., Т.В. Мальцева д.ф.-м.н., А.В. Минаева, А.В. Набоков к.т.н.</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ АРМИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ПЕСЧАНОГО ЦИЛИНДРА	234
<i>Нгуен Ба Нгок, А.Ф. Тузовский</i>	
ОПТИМИЗАЦИЯ ХРАНЕНИЯ СЛОВАРЯ ТРИПЛЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛОВЫХ ИДЕНТИФИКАТОРОВ	239
<i>Нгуен Ба Нгок, А.Ф. Тузовский</i>	
МЕТОД СЕМАНТИЧЕСКОГО ПОИСКА В КОЛЛЕКЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДОКУМЕНТОВ	246
<i>Д.В. Неделько к.т.н.</i>	
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТОЕМКОСТИ РЕССОР ПОЛОЗКОВОГО ШАССИ ВЕРТОЛЕТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОПРОВЫХ ИСПЫТАНИЙ	255
<i>А.В. Новичихин к.т.н.</i>	
РАЗРАБОТКА ПРОЦЕДУРЫ ПЛАНИРОВАНИЯ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ТОПЛИВНО-СЫРЬЕВОГО РЕГИОНА	261
<i>Д.А. Осипович, С.Г. Ярушин д.т.н.</i>	
ВЫЯВЛЕНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРА И НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ В ПРОМЫШЛЕННЫХ МАСШТАБАХ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА	265

<i>А.В. Садыков к.т.н., Д.А. Садыкова, Д.Б. Вафин д.т.н.</i> ТРЕХМЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТРУБЧАТЫХ ПЕЧЕЙ	270
<i>Д.А. Страбыкин д.т.н., М.Н. Томчук к.т.н.</i> ЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ ДЕДУКТИВНОГО ВЫВОДА	276
<i>Э.В. Урывский</i> АНАЛИЗ АЛГОРИТМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТРЕХМЕРНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ СЦЕН ОКРУЖЕНИЯ	283
<i>А.Н. Фетяев, С.В. Фокин к.т.н.</i> ОБ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПОРУБОЧНЫХ ОСТАТКОВ	291
<i>В.А. Фрилинг</i> ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ избирательной ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКИ ПОВЕРХНОСТИ ОТВЕРСТИЯ НА ГЛУБИНУ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ	295
<i>Г.Ю. Шакирова</i> УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО ПОРОШКА ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ	301
АННОТАЦИИ	306

THE RELEASE MAINTENANCE

<i>A.S. Beresin, T.T. Zinkicheva, R.R. Nazmutdinov, V.K. Polovnyak, A.M. Saifutdinov</i> MODELLING OF MOLECULAR IODINE TRANSFER ACROSS aLCANE/WATER INTERFACE	10
<i>B.N. Ivanov, R.N. Kostromin, V.S. Minkin, V.V. Chistyakov</i> PLASTIFICATOR'S IMPACT ON VULCANIZATION OF POLYSULFIDE OLIGOMERS	18

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

<i>I.S. Balafendieva, D.V. Berezhnoi, D.A. Egorov</i> THE ESTIMATE OF SETTLINGS IN THE MULTILAYER MATERIALLY NONLINEAR GROUND BY THE UNDERGROUND TUNNELS LAYING	23
<i>A.V. Dol</i> 1-DIMENTIONAL SYSTEM OF BLOOD FLOW DYNAMICS IN LARGE-SCALE BLOOD VESSELS	27
<i>V.V. Tregulov</i> OPTIMIZATION OF THE MANUFACTURING TECHNOLOGY OF HETEROSTRUCTURES CdS/Si(p)	31
<i>A.I. Hazbulatov</i> DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE DIRECT FLOWING-CENTRIFUGAL SEPARATOR FOR GAS CLEARING FROM MECHANICAL IMPURITIES	35

CHEMICAL SCIENSEC

<i>A.V. Basov, V.N. Basov, O.I. Bahireva</i> PERIODIC REGULARITY OF CHEMICAL ELEMENTS AND ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF METALS AND THEIR COMPOUNDS	39
<i>A.V. Basov, V.N. Basov, O.I. Bahireva</i> FORECASTING OF ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF AMALGAMS OF METALS ON THE BASIS OF PERIODIC SYSTEM D.I. MENDELEYEV	43
<i>V.N. Basov, O.I. Bakhireva, V.V. Volhin, L.S. Pan</i> SYNTHESIS OF SORPTION MATERIALS BASED ON VERMICULITE AND MICROBIAL EXTRACTION FOR IONS AND STRONTIUM RADIONUCLIDES	48

ENGINEERING SCIENCE

<i>L.H. Abdulhalikova</i> THE SOLUTION OF THE THERMOELASTICITY PROBLEM FOR MULTILAYERED STRUCTURES	53
<i>A.P. Abysov, O.I. Tarabarin</i> DEFINITION OF MACHINE PARTS CONSTRUCTIVE ELEMENTS BEARING CAPACITY WITH REGARD TO DEFECTS IN THE FORM OF CRACKS	58
<i>S.N. Alekhin</i> FEATURES OF FORMATION OF A VIBRATING FIELD OF A PENDANT PART OF WASHING MACHINES	64
<i>V.V. Andreev, A.A. Buhalov</i> DEFINITION OF THE TEST UNDER CYCLIC LOADING USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK	70
<i>U.A. Anisimov, V.L. Dolganov, S.H. Zagidullin, B.E. Shenfeld</i> PERFECTION OF PRODUCTION OF GRANULATED SULPHUR IN LTD. «LUKOIL-PERMNEFTEORGSINTEZ»	73
<i>E.A. Archangelskaja, M.V. Grushicheva</i> THE EFFICIENCY ANALYSIS FOR COMPLEX SOLIDS OF REVOLUTION MEASURING DEVICES	77

<i>V.I. Astashchenko, R.A. Bikulov, M.S. Kolesnikov, I.O. Leushin</i> APPLICATION OF ALUMINUM-BACKED CAST IRON FOR BASIC LAYER OF HOT STRAINING CAST BIMETALLIC PRESS TOOLS	82
<i>M.M. Basharov, A.G. Laptev, M.V. Saitbatalov</i> THE MODEL OF HEAT AND MASS TRANSFER IN PACKED COLUMN WITH VARIABLE MASS FLOWS THROUGH HEIGHT	85
<i>V.F. Bekker</i> DYNAMICS OF MECHANICAL INTERACTION OF THE BALL MOVABLE NOZZLES	94
<i>A.V. Belyaev, A.S. Grigorov</i> DETECTION OF ATTACKS TO DATABASES ON THE BASIS OF THE ASSESSMENT OF INTERNAL STRUCTURE OF RESULTS OF PERFORMANCE OF SQL-REQUESTS	99
<i>G.N. Beljaev, V.L. Dolganov, S.H. Zagidullin, J.I. Hvastuhin, B.E. Shenfeld</i> GRANULATION OF CLAY-SALINE SLUDGE – WASTE PRODUCTION OF POTASSIUM FERTILIZERS	105
<i>R.A. Bikulov, F.G. Karih, N.N. Safronov</i> HOT VOLUME STRAINING CAST INSERT PRESS TOOL MADE OF MACHINE-BUILDING DISPERSE WASTES	112
<i>A.P. Buinosov</i> TECHNIQUE OF THE ESTIMATION OF THE RESOURCE OF BANDAGES OF WHEEL PAIRS TRACTION ROLLING STOCK	116
<i>A.P. Buinosov, I.G. Pishniy</i> DEFINITION OF THE ADMISSIBLE DIFFERENCE OF DIAMETERS OF BANDAGES TAKING INTO ACCOUNT COSTS OF REPAIR OF WHEEL PAIRS OF ELECTRIC LOCOMOTIVES	122
<i>T.V. Burnysheva, A.F. Razin, O.A. Shteinbreher</i> EVALUATION OF THE MUTUAL INFLUENCE OF THE PARTS SHELL STRUCTURES UNDER AXIAL COMPRESSION	127
<i>V.M. Bushuev, R.K. Musin, I.L. Sinani</i> THE STRUCTURE OF SLIP SUB-LAYER AND SURFACE PYROCARBON COATING FORMATION AT MANUFACTURING HERMETIC CONSTRUCTIONS ON THE BASE OF CCCM	132
<i>A.B. Vetoshkin, D.V. Kudelin, T.N. Nesiolovskaya</i> THE INFLUENCE OF TESTING CONDITIONS ON DISPLAY OF REINFORCEMENT EFFECT OF STYREN-BUTADIENE ELASTOMERS	137
<i>D.V. Vozhegov, D.A. Strabikin</i> THE PARALLEL METHOD ABDUCTIVE INFERENCE WITH FACTS DETERMINATION	141
<i>V.I. Volovach, A.S.O. Mamedov, A.A. Popov</i> ANALYSIS OF COHERENT AND INCOHERENT NOISE DETECTION METHODS IN RADIO PROTECTION DEVICES	148
<i>V.I. Volovach, A.A. Popov, A.V. Savenko</i> THE DECISION OF THE PROBLEM OF DETECTION AND DISTINCTION OF SIGNALS IN THE RADIO ENGINEERING DEVICES OF PROTECTION USING PRINCIPLES OF THE ACTIVE AND SEMIACTIVE LOCATION	155
<i>D.A. Gabrielyan</i> THERMOMAGNETIC ENGINE. DEVELOPMENT PROSPECTS OF THERMOMAGNETIC TECHNOLOGY	160
<i>A.M. Girfanov, A.V. Dvorankin, D.V. Nedelko, S.A. Mikhailov, T.A. Mukhametshin</i> TO THE PROBLEM OF DETERMINING THE RESIDUAL LIFE HELICOPTER MAIN UNITS	167
<i>G.M. Goncharov, I.S. Gudanov, A.A. Lomov, V.S. Cherepenin</i> NUMERICAL DETERMINATION OF PARAMETERS OF ELASTIC RECOVERY FOR EXTRUSION PROTECTION BILLET ROAD TIRES	171
<i>M.S. Grinkrug, N.A. Novgorodov, Y.I. Tkatcheva</i> ELEMENTS OF ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORKS RELIABILITY IMPROVING IN LOW VOLTAGE LOADS SWITCHING	179
<i>A.M. Dolganov, T.N. Ivanova</i> RESEARCH OF HEAT EXCHANGE INFLUENCE ON TEMPERATURE FIELD AT GRINDING OF PLATES ON EDGE	186

A.A. Zaharov, E.R. Kozhanova, MATHEMATICAL MODELLING OF THE MAGNETIC FIELD OF THE SEPARATE RING MAGNET WITH USE WAVELET-FUNCTIONS GAUSS OF THE SECOND ORDER	190
M.V. Zilberman, E.A.Pichugin, N.B.Hodyashev, M.V. Cherepanov, B.E. Shenfeld, EVALUATION OF THE INFLUENCE OF DRILL CUTTINGS COMPOSITION ON HAZARD CLASS FOR THE ENVIRONMENT	194
S.M. Zraenko STUDY OF EMPIRICAL ALGORITHMS FOR DETERMINING THE RADAR IMAGE DEFOCUSING	203
A.M. Ignatova MECHANISM OF FORMATION NONMETALLIC INCLUSIONS IN STEEL	208
I.N. Ishchenko A METHOD FOR INCREASING THE PRODUCTIVITY WATERJET CUTTING	212
A.V. Kozlova, V.Ya. Modorsky, V.U. Petrov, A.N. Ponik ENGINEERING TECHNIQUE OF DEFINITION OF SETTING SCHANNEL OF VARIABLE SECTION FOR BRANCHAND COOLINGS OF HOT GASES POWER ENGINE	216
G.A. Kozlova, N.B. Hodyashev, B.E. Shenfeld USE OF WORKED-OUT IRON-CONTAINING ETCHING SOLUTIONS IN GALVANIC PRODUCTION FOR WASTE WATER TREATMENT AND RECEIPT OF PIGMENT MATERIALS	220
L.M. Kotlyar, G.Yu. Shakirova MATHEMATICAL MODEL OF THE ELECTRIC DISCHARGE WITH LIQUID ELECTRODES	223
D.V. Kudelin, T.N. Nesiolovskaya COMPLEX APPROACH TO THING WALLED RUBBER PRODUCTS DESIGN	229
L.E. Maltsev, T.V. Maltseva, A.V. Minayeva, A.V. Nabokov DEFINITION OF DISPLACEMENT REINFORCING ELEMENT SANDY CYLINDER	234
Nguyen Ba Ngoc, A.F. Tuzovski OPTIMIZATION TRIPLE DICTIONARY STORE BASED ON NUMERICAL IDENTIFICATION	239
Nguyen Ba Ngoc, A.F. Tuzovski A SEMANTIC SEARCH APPROACH IN THE INTELLEGT DOCUMENT COLLECTIONS	246
D.V. Nedelko THE ENERGY ANALISIS LABORIOUSNESS OF SPRINGS HELICOPTER SKID LANDING GEAR ON RESULTS OF HOISTING THE TESTS	255
A.V. Novitchihin WORKING OUT THE planning procedure OF SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS IN FUEL RESOURCES REGION	261
D.A. Osipovish, S.G. Yarushin ANALYSIS AND SYSTEMATIZATION PRODUCTION AND APPLICATION ULTRA AND NANOPOWDER TECHNICAL PROBLEMS	265
A.V. Sadykov, D.A. Sadykova, D.B. Vafin THREE-DIMENSIONAL CALCULATIONS OF AERODYNAMICS AND THERMAL CHARACTERISTICS OF CYLINDRICAL TUBULAR FURNACES	270
D.A. Strabykin, M.N. Tomchuk LOGICAL FORECASTING OF SITUATIONS DEVELOPMENT ON THE BASIS OF DEDUCTIVE LOGICAL INFERENCE	276
E.V. Uryvsky ALGORITHM ANALYSIS OF THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION OF SCENES ENVIRONMENT	283
A.N.Fetyaev, S.V.Fokin SIMULATION MODEL OF THE PROCESS OF GRINDING FOREST RESIDUES	291
V.A. Friling INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PROCESSING CONDITIONS OF ELECTION ELECTROMECHANICAL SURFACE OPENINGS IN DEPTH HARDENED LAYER	295
G.Yu. Shakirova TECHNOLOGICAL PLASMA ELECTRO –THERMAL PLANT CONTROL FOR A GIVEN DISPERSION PRODUCTION FERROMAGNETIC POWDER	301
ABSTRACTS	306

**А. С. Березин, Т. Т. Зинкичева к.х.н., Р. Р. Назмутдинов д.х.н.,
В. К. Половняк д.х.н., А. М. Сайфутдинов к.х.н.**

Казанский национальный исследовательский технологический университет
Россия, г. Казань
alex.saifutdinov@gmail.com

Работа частично финансировалась Российским фондом фундаментальных исследований
(РФФИ, грант № 09-03-91001-АНФ_а)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА МОЛЕКУЛЯРНОГО ЙОДА ЧЕРЕЗ МЕЖФАЗНУЮ ГРАНИЦУ ВОДА/АЛКАН

В работе обсуждаются результаты моделирования переноса молекулярного йода через границу раздела фаз между гептаном и водой. Поверхность потенциальной энергии, описывающей перенос иона, построена на основе феноменологических представлений с использованием результатов квантово-химических расчётов. Константа скорости преодоления барьера рассчитывалась с использованием теории Крамерса и методом броуновской молекулярной динамики. Полученные данные позволяют интерпретировать результаты экспериментов по исследованию кинетики окисления тиосульфата йодом на межфазной границе гептан/вода.

Ключевые слова: йод, тиосульфат, межфазная граница жидкость-жидкость, перенос иона, теория Крамерса, броуновская молекулярная динамика.

Ранее в нашей работе [1] сделан вывод о лимитирующем (замедленном) характере стадии переноса молекулярного йода через межфазную область в реакции окисления тиосульфат-аниона на границе между двумя несмешивающимися жидкостями. Именно детальному рассмотрению этой стадии посвящено данное сообщение. Отметим, что моделирование транспорта молекул и ионов через границу раздела между двумя несмешивающимися жидкостями с учётом её микроскопической структуры представляет собой довольно сложную задачу, которую можно решить при помощи молекулярно-динамического моделирования. Мы ограничились более простым способом с использованием двух различных подходов в рамках стохастической теории и упрощённого способа построения поверхности потенциальной энергии. Общей идеей, объединяющей оба подхода, является рассмотрение преодоления барьера как диффузионного движения.

Первый способ заключается в применении теории Крамерса [2], согласно которой скорость переноса частицы через границу раздела фаз можно выразить в виде:

$$v = \kappa \nu_{eff} \cdot \exp \left\{ -\Delta E_a / k_B T \right\}, \quad (1)$$

где κ - трансмиссионный коэффициент, ν_{eff} - эффективная частота колебаний частицы в диффузионной «клетке» растворителя, ΔE_a - энергетический барьер на пути переноса частицы.

Частотный фактор можно оценить по формуле [3]:

$$\nu_{eff} = 16r^2 \sqrt{\frac{\pi k_B T}{M^*}} \cdot n_0, \quad (2)$$

где M^* - приведённая масса (см. формулу (3)), где M_{I_2} и M_{alk} - молекулярные массы йода и алкана; n_0 - число молей жидкого гептана в единице объёма; r - сумма эффективных радиусов объёма атома йода и групп $-CH_2-$ ($4.2 \text{ \AA}$).

$$M^* = \frac{M_{I_2} \cdot M_{alk}}{M_{I_2} + M_{alk}}, \quad (3)$$

Простые вычисления предсказывают значения v_{eff} порядка 1 пс^{-1} .

Трансмиссионный коэффициент в выражении (4) описывает уменьшение вероятности преодоления барьера частицами с достаточной энергией вследствие эффектов трения среды. Данный параметр рассчитывается следующим образом [2]:

$$\kappa = \frac{\sqrt{\gamma^2/4 + \omega_b^2} - \gamma/2}{\omega_b}, \quad (4)$$

где γ - коэффициент трения среды, зависящий от самого продолжительного времени релаксации растворителя в фазе, откуда происходит перенос частицы; ω_b - циклическая частота колебания в «перевернутом» барьере. Этот параметр оценивался из соотношения Эйнштейна:

$$D = \frac{k_B T}{m\gamma}, \quad (5)$$

где m - масса молекулы йода, а D - коэффициент диффузии йода в гептане ($D = 3,4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ [4]).

В работе [5] по данным молекулярно-динамического моделирования построен профиль изменения времени колебательной релаксации молекулы I_2 при переносе через границу раздела $CCl_4/\text{вода}$. Данную зависимость можно рассматривать в качестве своеобразного «маркера» зондирующего транспорт частицы. На основе этих результатов можно судить о толщине эффективной зоны транспорта ($15 \div 20 \text{ \AA}$). Видно, что эта величина того же порядка, что и толщина межфазной границы для систем вода/неполярная фаза. Учёт собственной толщины межфазной границы и особенностей её строения - первая составляющая, способствующая росту барьера. В дальнейшем мы предполагали такую же эффективную толщину барьера и для переноса йода через границу раздела вода/алкан.

В настоящей работе поверхность потенциальной энергии, описывающую транспорт молекулы йода через границу раздела фаз, задавалась феноменологическим уравнением:

$$U(x) = \Delta E_a \left\{ \frac{1}{1 + \exp(6-x)} - \frac{1}{2} \right\} + \frac{\Delta E_a}{2} - \frac{\Delta E_a - 2}{1 + \exp(13-x)}, \quad (6)$$

где ΔE_a - высота барьера (энергия активации диффузии), x - координата диффузии.

Величину барьера ΔE_a на пути переноса молекулы I_2 из неводной фазы в водную можно оценить следующим образом:

$$\Delta E_a = \Delta G_{solv}^{H_2O} - \Delta G_{solv}^{n-hept} + A_\sigma, \quad (7)$$

где $\Delta G_{solv}^{H_2O}$ и ΔG_{solv}^{n-hept} - свободные энергии сольватации йода в воде и гептане, соответственно, A_σ - работа, совершаемая против сил поверхностного натяжения (γ) на границе раздела фаз; $A_\sigma = \gamma \cdot S_{eff}$, где S_{eff} - наименьшая эффективная площадь сечения молекулы йода, пересекающей границу раздела (в нашем случае рассматривалась как площадь круга πr_{eff}^2 ; где r_{eff} - эффективный радиус молекулы йода $2.15 \text{ \AA}$ [6]; $S_{eff} = 14.5 \text{ \AA}^2$).

Квантово-химические расчеты проводились в рамках теории функционала плотности с использованием гибридного функционала B3LYP, встроенного в программный пакет Gaussian-03 [7]. Для атома йода применялся базис CEP-121g, дополненный поляризационными d-орбиталями [7]. Использование поляризационных орбиталей позволяет наилучшим образом описать экспериментальные длины связи I₂ (2.66 Å) [8]. Эффекты сольватации учитывались на основе континуальной модели теории реактивного поля (Polarizable Continuum Model, PCM) [9]. Используемые значения объемной диэлектрической проницаемости воды и гептана составляют 78.40 и 1.95, соответственно.

В таблице 1 приведены свободные энергии сольватации йода в воде и гептане, значения межфазного натяжения для системы вода/гептан, рассчитанные значения A_σ и конечные оценки ΔE_a . Суммируя данные, приведённые в таблице 1 и оценив S_{eff} , можно получить значение 4.46 кДж·моль⁻¹ в качестве оценки A_σ . Тогда суммарная величина барьера составит 9.80 кДж·моль⁻¹. Данное значение, разумеется, представляет собой оценку снизу. Дополнительный вклад в энергетический барьер переноса молекулярного йода может быть связан с эффектом протрузии межфазной границы (см., например, [10-12]).

Таблица 1. Свободная энергия сольватации йода в воде ($\Delta G_{solv}^{H_2O}$) и гептане (ΔG_{solv}^{n-hept}), межфазное натяжение для системы вода/гептан ($\gamma_{H_2O/n-hept}$), работа, совершаемая против сил поверхностного натяжения на границе вода/гептан (A_σ) энергия активации диффузии (ΔE_a).

$\Delta G_{solv}^{H_2O}$, кДж/моль	ΔG_{solv}^{n-hept} , кДж/моль	$\gamma_{H_2O/n-hept}$, кДж/см ²	A_σ , кДж/моль	ΔE_a , кДж/моль
-9.87	-15.20	5.08	4.46	9.80

На рис. 1 представлены зависимости $U(x)$ (см. уравнение (6)) для четырёх различных значений энергии активации переноса ΔE_a (12.6, 14.6, 16.7 и 18.8 кДж/моль).

Результаты расчётов констант скоростей прямого (перенос молекулы I₂ из гептана в воду) и обратного (перенос молекулы I₂ из воды в гептан) процессов приведены в таблице 2. Как видно из таблицы, значения трансмиссионного коэффициента, описывающего прямой перенос (κ_1), заметно меньше единицы. Кроме того, значения обоих трансмиссионных коэффициентов слабо растут с ростом энергии активации переноса, что связано с изменением частоты перевёрнутого барьера (см. уравнение (4)).

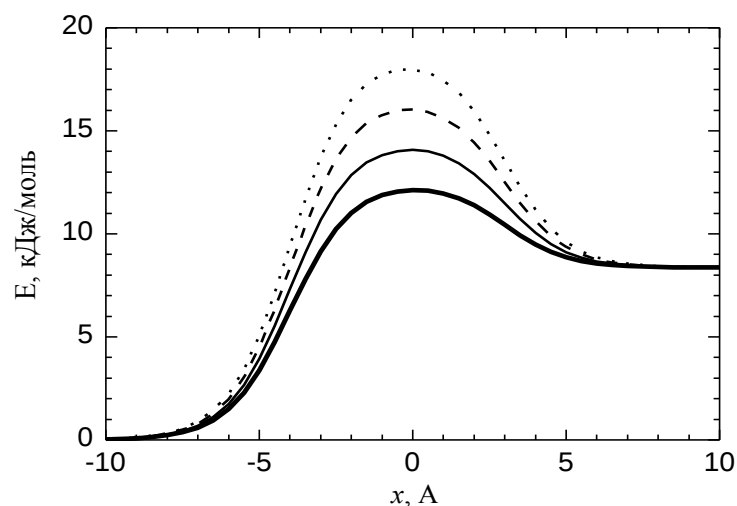


Рис. 1 – Вид феноменологической ППЭ транспорта йода через границу раздела вода/гептан. Высота активационного барьера транспорта из гептановой фазы в водную: (—) - 12.6 кДж/моль, (---) - 14.6 кДж/моль, (- -) - 16.7 и (...) - 18.8 кДж/моль.

Таблица 2. Значения кинетических параметров транспорта молекулы I₂ из гептана в воду (индекс 1) и из воды в гептан (индекс 2), полученных с использованием модели Крамерса.

ΔE_a , кДж/моль	k_1	k_2	κ_1	κ_2
12.6	6.26×10^{-4}	1.12×10^{-2}	5.79×10^{-2}	12.62×10^{-2}
14.6	3.06×10^{-4}	0.55×10^{-2}	6.69×10^{-2}	14.53×10^{-2}
16.7	1.44×10^{-4}	0.26×10^{-2}	7.45×10^{-2}	16.11×10^{-2}
18.8	0.66×10^{-4}	0.12×10^{-2}	8.11×10^{-2}	17.48×10^{-2}

Более реалистичную картину транспорта молекулы йода через межфазную границу можно получить методом ланжевеновской (броуновской) динамики. В рамках такого подхода движение частицы массой m вдоль координаты x описывается уравнением:

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} = \frac{1}{m} \left\{ -\frac{\partial U}{\partial x} - \gamma \cdot \frac{dx}{d\tau} + F_{rand}(\tau) \right\}, \quad (8)$$

где $U(x)$ – поверхность потенциальной энергии (см. уравнение 6), а $F_{rand}(\tau)$ – случайная сила, имитирующая взаимодействие движущейся частицы с молекулами среды. Предполагается, что для модулятора случайной силы справедливо соотношение:

$$\langle F_{rand}(0), F_{rand}(\tau) \rangle = 2\gamma m k_B T \delta(\tau), \quad (9)$$

где $\delta(\tau)$ – дельта функция. Для генерации значений $F_{rand}(\tau)$ использовался алгоритм, предложенный в [13]. Моделирование методом молекулярной динамики проводилось с помощью оригинального кода, написанного в программном пакете «MathLab». При интегрировании уравнения (8) шаг действия случайной силы выбирался равным обратной величине частотного фактора ν_{eff} (см. (2)). Константу скорости переноса молекулы через межфазную границу можно определить следующим образом:

$$k = \frac{1}{\langle \tau^* \rangle} \quad (10)$$

где $\langle \tau^* \rangle$ - среднее время преодоления барьера. Для расчёта этой величины проводилось N испытаний:

$$\langle \tau^* \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i^* \quad (11)$$

Как показали тестовые расчеты, можно ограничиться значением N=50. В таблице 3 представлены результаты расчётов, полученных методом молекулярной динамики.

Таблица 3. Значения кинетических параметров транспорта молекулы I₂ из гептана в воду (индекс 1) и из воды в гептан (индекс 2), полученных методом броуновской молекулярной динамики.

ΔE_a , кДж/моль	k_1	k_2	κ_1	κ_2
12.6	9.47×10^{-5}	0.76×10^{-3}	1.45×10^{-2}	0.41×10^{-2}
14.6	7.19×10^{-5}	0.66×10^{-3}	2.55×10^{-2}	0.82×10^{-2}
16.7	5.62×10^{-5}	0.36×10^{-3}	4.61×10^{-2}	1.04×10^{-2}
18.8	4.48×10^{-5}	0.24×10^{-3}	8.51×10^{-2}	1.59×10^{-2}

Как видно из таблицы 3, константы скорости рассчитанные методом молекулярной динамики, на порядок меньше по сравнению с оценками в рамках теории Крамерса (см. таблицу 2). Кроме того, молекулярная динамика предсказывает значительно меньшие значения κ для обратного переноса. Важно отметить, что оба подхода дают величины констант скоростей элементарного акта, происходящего в молекулярном масштабе. Для перехода к константе переноса йода через границу раздела фаз, сопоставимой с экспериментальными значениями, следует решать диффузионную задачу с использованием законов Фика. Это отдельная проблема, осложнённая отсутствием точной информации о краевых условиях (в частности, толщине диффузионного слоя); в данной работе она не рассматривалась.

Ранее в работе [1] сообщалось о наблюдении интересного эффекта: кинетическая зависимость для реакции $I_2 + S_2O_3^{2-}$, протекающей на границе вода/гептан в линеаризованных координатах, имеет точку излома в районе 1 минуты эксперимента (см. рис. 2). Это говорит об отклонении исследуемой реакции в выбранных условиях от кинетики псевдопервого порядка.

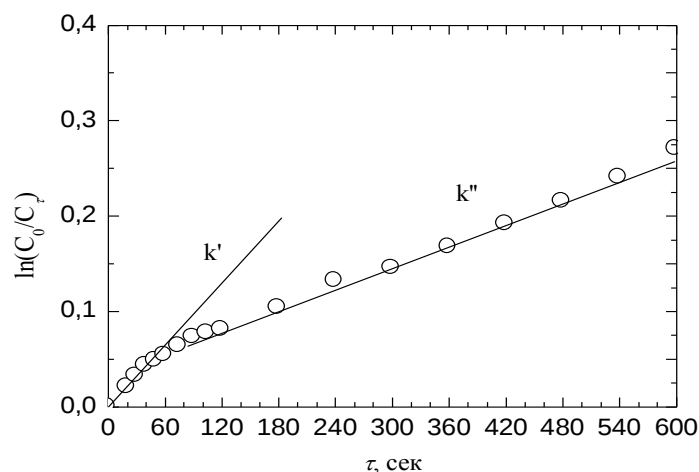


Рис. 2 – Кинетические зависимости для реакции $I_2 + S_2O_3^{2-}$ на границе раздела вода/гептан в линеаризованных координатах.

Для интерпретации экспериментальных данных запишем формальную схему исследуемой реакции на границе раздела фаз:



где A и A^* соответствуют молекулярному йоду в гептановой и водной фазах соответственно, B представляет собой йодид-анион образующийся в результате химического взаимодействия; k_1 и k_2 описывают обратимый транспорт молекулы йода через межфазную границу, а k_3 соответствует быстрой химической стадии. Данная схема описывается системой трёх кинетических уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dC_A}{d\tau} &= -k_1 C_A + k_2 C_A^*, \\ \frac{dC_A^*}{d\tau} &= k_1 C_A - k_2 C_A^* - k_3 C_B, \\ \frac{dC_B}{d\tau} &= k_3 C_B, \end{aligned} \quad (13)$$

где C_A , C_A^* и C_B – концентрации веществ.

Система дифференциальных уравнений решалась численно с использованием программного пакета «MathLab». На рисунках 3а и 3б показаны кинетические зависимости для переноса йода в линеаризованных координатах (как для реакции первого порядка) полученные интегрированием системы уравнений (13). В расчётах использовались константы скорости k_1 и k_2 , вычисленные в рамках теории Крамерса и полученные методом броуновской молекулярной динамики; предполагалось, что $k_3/k_1 = 10$. Величины барьера варьировались в определённом ранее диапазоне. Как видно из рисунков, для небольших барьеров оба метода предсказывают нелинейный характер зависимости кинетических данных от времени.

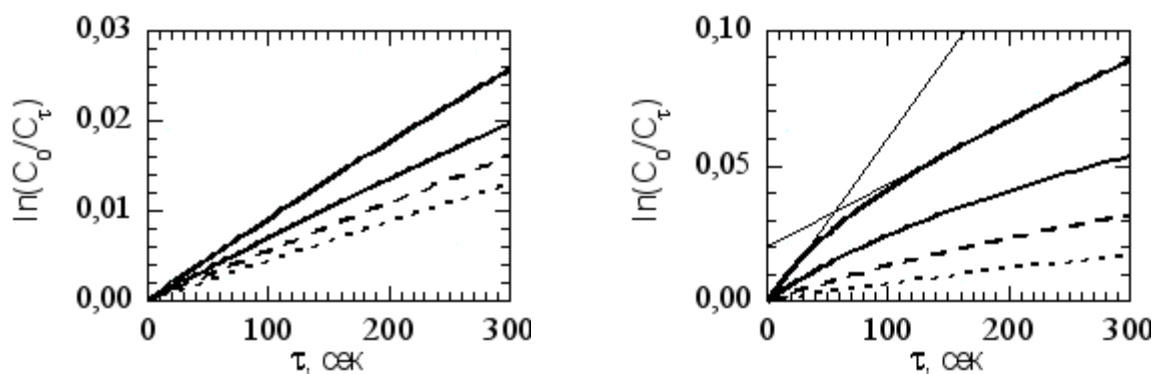


Рис. 3. Линеаризация вычисленных кинетических закономерностей транспорта I_2 через границу раздела вода/гептан (а) по методу Крамерса и (б) моделированием методом броуновской динамики при различной высоте модельного активационного барьера прямого переноса: (—) - 12,6 кДж/моль, (- -) - 14,6 кДж/моль; (- -) - 16,7 кДж/моль; (···) - 18,8 кДж/моль.

Построенные кривые описывают элементарный акт исследуемой реакции в молекулярном масштабе, поэтому количественное сопоставление с экспериментом не имеет смысла. Тем не менее, наблюдаемый качественный эффект (наличие двух наклонов) удаётся описать.

Список литературы:

1. Назмутдинов, Р.Р. Влияние структуры реакционного слоя на механизм окисления тиосульфат-аниона йодом / Р. Р. Назмутдинов, Т. Т. Зинкичева, А. М. Сайфутдинов, В. К. Половняк // Вестник КГТУ. – 2009. – № 6. – С. 3-13.
2. Kramers, H.A. Brownian motion in a field of force and the diffusion model of chemical reactions / H.A. Kramers // Physica. – 1940. – V.7. – I.4. – P. 284-304.
3. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика в десяти томах. Том 9. Статистическая физика. Ч. 2. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц – Физматлит, 2004. – 496 с.
4. Stokes, R.H. The diffusion of iodine in some organic solvents / R.H. Stokes, P.J. Dunlop, J.R. Hall // *Trans. Faraday Soc.* – 1953. – V. 49. – I. 7. – P. 886-890.
5. Benjamin, I. Vibrational relaxation at the liquid/liquid interface / I. Benjamin // *J. Chem. Phys.* – 2004. – V.121. – P. 10223-10232.
6. Ф. Коттон, Дж. Уилкинсон. Современная неорганическая химия, т.1. Изд-во Мир, 1969. 224с.
7. Gaussian 03, Revision B.04, M. J. Frisch, G. W. Trucks, H. B. Schlegel, G. E. Scuseria, M. A. Robb, и др., Gaussian, Inc., Pittsburgh PA, 2003.
8. Huber, K.P. Molecular Spectra and Molecular Structure IV. Constants of Diatomic Molecules / K.P. Huber, G. Herzberg. – N. Y.: Van Nostrand Reinhold Company, 1979. – 716 p.
9. Tomasi, J. Molecular Interactions in Solution: An Overview of Methods Based on Continuous Distributions of the Solvent Title / J. Tomasi, M. Persico // *Chem. Rev.* – 1994. – № 7. – P. 2027–2094.
10. L.I. Daikhin, A.A. Kornyshev, A.M. Kuznetsov, M. Urbakh. *Chem.Phys.* **319**, 253–260 (2005).
11. 12. Kornyshev, A.A. Surface Polaron Effect on the Ion Transfer across the Interface of Two Immiscible Electrolytes / A.A. Kornyshev, A.M. Kuznetsov, M. Urbakh // *Russian J. Electrochem.* – 2003. – № 2. – P.131-137.
12. Molecular transport across fluid interfaces: coupling between solute dynamics and interface fluctuations / A. Gupta, A. Chauhan, D.I. Kopelevich // *Phys. Rev. E.* – 2008. – № 4. – P. 041605-1–041605-10.
13. Allen M.P., Tildesley D.J. Computer Simulation of Liquids. -Clarendon Press, Oxford, 1987.

**Б. Н. Иванов¹ д.т.н., Р. Н. Костромин² к.т.н., В. С. Минкин³ д.х.н.,
В. В. Чистяков³ к.т.н.**

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет
кафедра общей химической технологии
Россия, г. Казань
ivanovbn@rambler.ru

²Казанский национальный исследовательский технологический университет
кафедра химической технологии переработки нефти и газа
Россия, г. Казань
kostromin-rn@rambler.ru

³Казанский национальный исследовательский технологический университет
Кафедра физики
Россия, г. Казань
yerus@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИФИКАТОРА НА ВУЛКАНИЗАЦИЮ ПОЛИСУЛЬФИДНЫХ ОЛИГОМЕРОВ

Выявлено влияние пластификатора на второй момент линии ЯМР при низких температурах для вулканизатов ПСО. Определена прямая корреляция между плотностью эффективных цепей полимерной сетки и значениями времен спин-спиновой релаксации вулканизатов. Предложен способ контроля скорости процесса вулканизации по изменению времени спин-спиновой релаксации, который легко осуществляется в лабораторных условиях и может рассматриваться как экспресс-метод изучения кинетики отверждения олигомеров.

Ключевые слова: полисульфидные олигомеры, пластификатор, вулканизация, ядерный магнитный резонанс.

В состав вулканизирующих паст на основе полисульфидных олигомеров (ПСО) дополнительно вводятся регулятор скорости процесса вулканизации, тиксотропные добавки [1, 2]. В качестве пластификатора обычно применяют дибутилфталат [2], но имеются сведения об использовании хлористого дифенила, арохлора 1254, смесей терфенилов, рубракса, битумов, каменноугольных или иных смол [1].

Нами оценено влияние пластификатора на кинетику процесса формирования полимерной сетки из полисульфидных олигомеров.

Введение дибутилфталата в состав композиций на основе полисульфидных олигомеров способствует формированию более плотной полимерной сетки. На рис.1 приведены кинетические кривые процесса вулканизации полисульфидного олигомера диоксидом марганца в присутствии пластификатора (вулканизирующая паста № 9) и без него. Ранее нами было показано [3, 4] что сравнение скоростей процессов отверждения полисульфидных олигомеров можно проводить по значениям $1/\tau_{\min}$, где $\tau_{\min}$ – время, за которое достигается минимальное значение времени спин-спиновой релаксации T_2 . С увеличением концентрации дибутилфталата в композициях на основе полисульфидных олигомеров заметно ускоряется отверждение олигомера (рис.2), а скорости процесса, найденные как $1/\tau_{\min}$, изменяются симбатно с дозировкой пластификатора:

количество дибутилфталата, %	$1/\tau_{\min} \cdot 10^{-3}, \text{ мин}^{-1}$
масс	
0,25	3,33
0,33	4,17
0,47	5,55

Это связано, по-видимому, с влиянием полярности среды на скорость окисления олиготиолов. Действительно, при использовании одного и того же количества пластификатора (0,47% масс) с увеличением его полярности наблюдается закономерное возрастание константы скорости вулканизации:

	гексан	дибутил- фталат	диметилфор- мамид
Дипольный момент по данным [4]:	0,08	2,75	3,88
Эффективная константа ¹ скорости вулканизации до гель-точки, $\text{К} \cdot 10^{-3}, \text{ мин}^{-1}$	0,96	1,90	2,84

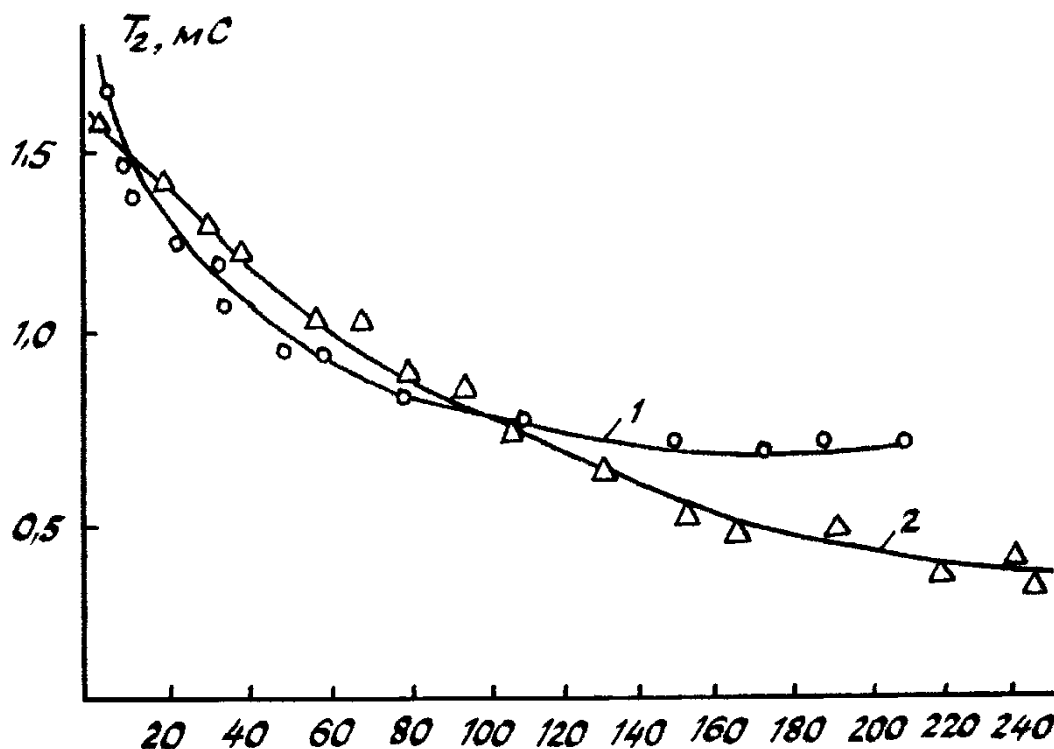


Рис.1 – Изменение времени спин-спиновой релаксации T_2 в процессе вулканизации полисульфидного олигомера диоксидом марганца при 25°C; 1 - в присутствии дибутилфталата (вулканизирующая паста № 9), 2 - без дибутилфталата.

¹ Значения эффективных констант вулканизации найдены по изменению вязкости композиций при 25°C с использованием известной методики [1, 2].

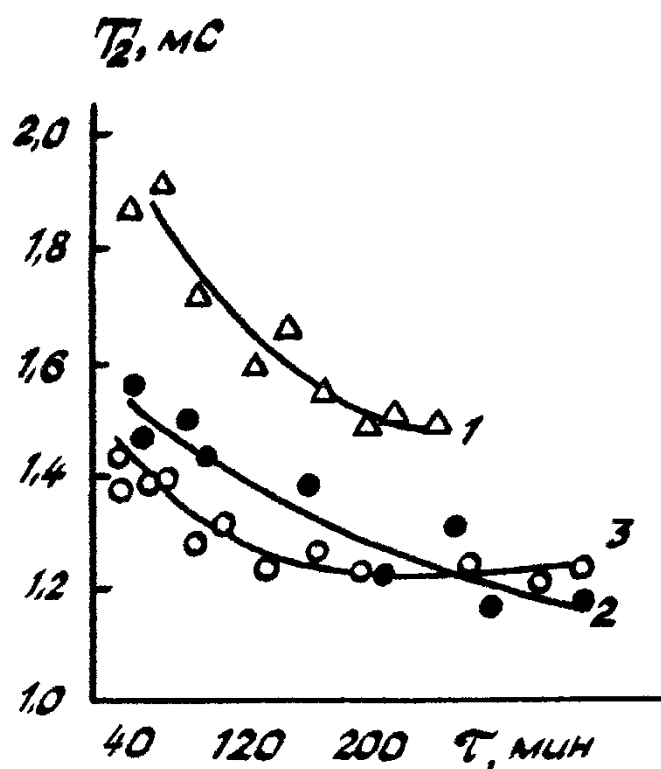


Рис.2 – Влияние количества дибутилфталата на изменение времени спин-спиновой релаксации T_2 в процессе вулканизации полисульфидного олигомера диоксидом марганца при 25°C. Количество дибутилфталата, % масс: 1 - 0,25; 2 - 0,33; 3 - 0,47.

Однако, повышенные дозировки дибутилфталата могут привести к чрезмерному ускорению процесса, что нежелательно, поскольку высокие скорости вулканизации оказываются причиной повышенной дефектности полимерной сетки [2, 3]. Действительно, рассчитанные по экспериментальным данным значения вторых моментов линии поглощения ЯМР при низких температурах для вулканизатов, полученных при использовании значительных количеств пластификатора, имеют более низкие значения, чем вулканизаты, полученные в отсутствии дибутилфталата (табл.1 и рис. 3).

Таблица 1 – Значения вторых моментов линии ЯМР (ΔH_2^2 , Гс²) вулканизатов при температуре = -80 °С.

Содержание ДБФ, % масс.	ΔH_2^2 , Гс ²
1	2
-	30,2
40	28,2
50	26,4
75	25,2
100	23,8

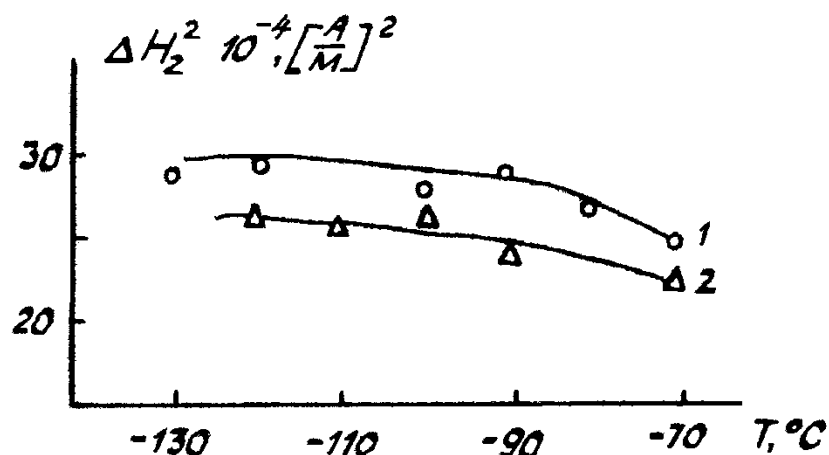


Рис. 3 – Влияние пластификатора на второй момент линии ЯМР при низких температурах для вулканизатов ПСО, полученных в присутствии дибутилфталата (1) и без него (2). Эквивалентное соотношение $\text{PbO}_2:\text{SH} = 4:1$

Следовательно, дибутилфталат способствует ускорению процесса отверждения полисульфидного олигомера, но при высоких его дозировках не достигается высокая плотность химически сшитых цепей сетки.

Контроль за скоростью процесса вулканизации по изменению времени спин-спиновой релаксации может быть легко осуществлен в лабораторных условиях и может рассматриваться как экспресс-метод изучения кинетики отверждения олигомеров. Кроме того, существует прямая корреляция между плотностью эффективных цепей полимерной сетки и значениями времен спин-спиновой релаксации вулканизатов (рис 4). Поэтому, зависимость $T_2 = f(v_{\text{эф}})$ и экспериментально найденные значения T_2 , позволяет оценить эффективность процесса формирования полимерной сетки.

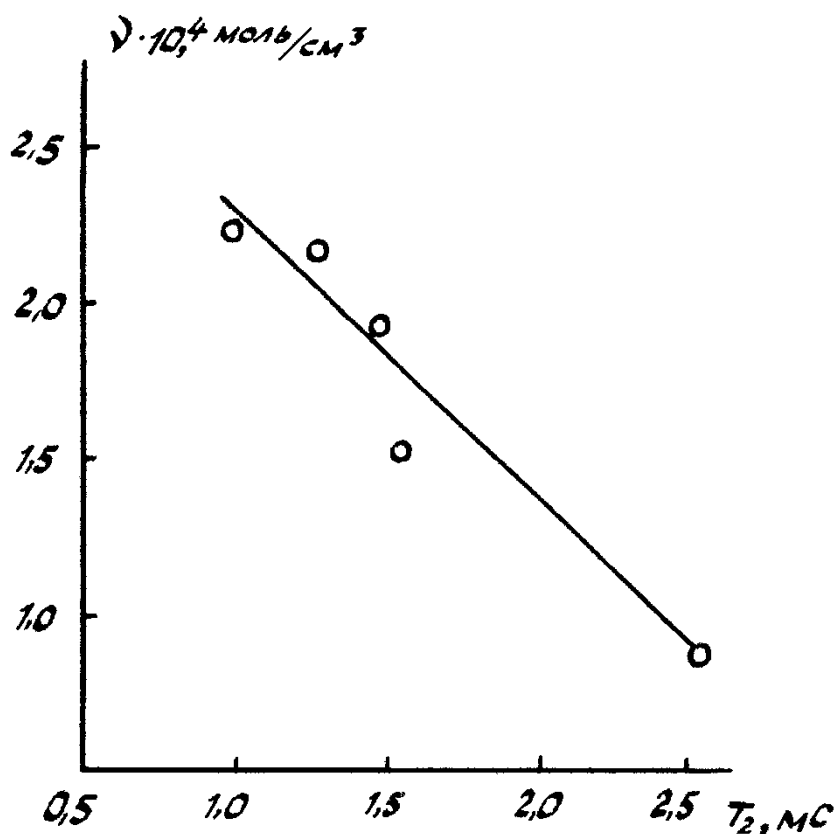


Рис. 4 – Зависимость времени спин-спиновой релаксации T_2 от плотности эффективных цепей сетки в вулканизатах полисульфидного олигомера.

Список литературы:

1. Минкин В.С., Дебердеев Т.Р., Палютин Ф.М., Хакимуллин Ю.Н. Промышленные полисульфидные олигомеры. Казань. Новое знание. 2004. 175 с.;
2. Хакимуллин Ю.Н., Минкин В.С., Палютин Ф.М., Дебердеев Т.Р. Герметики на основе полисульфидных олигомеров: синтез, свойства, применение. М.. Наука. 2007. 302 с.;
3. Минкин В.С. ЯМР в промышленных полисульфидных олигомерах. Казань. Абак. 1997. 222 с.;
4. Суханов П.П., Минкин В.С. Исследование процессов структурирования олигомерных композиций методами радиоспектроскопии. Казань. КГТУ. 2011. 223 с.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

01.02.04

И. С. Балафендиева¹, Д. В. Бережной¹ к.ф.-м.н., Д. А. Егоров²

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет
институт математики и механики и им. Н. И. Лобачевского
кафедра теоретической механики
Россия, г. Казань
e_xo@mail.ru

²Казанский государственный архитектурно-строительный университет
кафедра «Систем автоматизированного проектирования»
Россия, г. Казань

РАСЧЕТ ОСАДОК В МНОГОСЛОЙНОМ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОМ ГРУНТЕ ПРИ ПРОКЛАДКЕ ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНА

В работе представлена методика решения задач деформирования элементов конструкций, взаимодействующих между собой и с окружающим их физически нелинейным грунтом. Описан специальный контактный конечный элемент. В качестве примера приведен расчет осадки грунта над прокладываемыми тоннелями метрополитена.

Ключевые слова: пластическое деформирование грунта, контактный конечный элемент, метод конечных элементов.

Целью настоящей работы является разработка и численная реализация методики решения задач определения напряженно-деформированного состояния элементов конструкций подземных, промышленных и транспортных сооружений с учетом контактного взаимодействия с окружающим их физически нелинейно-деформируемым грунтовым массивом. В качестве примера приводится расчет осадки грунта в зоне прокладки тоннелей метрополитена.

Геометрически расчетная область представляет собой многослойный грунтовый массив, в котором параллельно поверхности прокладываются два тоннеля цилиндрической формы. Практически одновременно поверхность тоннелей облицовывается сегментными блоками, однако технология проходки предполагает появление между облицовкой тоннеля и грунтом небольшого технологического зазора. Наличие пустот между обделкой тоннеля и грунтом предполагает, что грунт над тоннелями будет проседать.

Грунты в зоне прокладки тоннеля являются физически нелинейными средами и подчиняются закону Гука лишь в небольшом диапазоне прикладываемых нагрузок. Существуют многочисленные математические модели, позволяющие описать процесс их деформирования, которые различаются сложностью разрешающих уравнений. В настоящей работе используется модель, аналогичная модели идеально пластического тела. В соответствии с ней предполагается, что до предельного состояния справедлив закон Гука, а после его достижения среда начинает деформироваться без увеличения воспринимаемой нагрузки, что приводит к перераспределению напряжений во всем

объеме. Построение вычислительного алгоритма основано на дискретизации расчетной области в рамках конечно-элементной методики [1-3].

Наиболее точно прогноз деформаций поверхности при горных работах можно выполнить путем решения пространственной задачи, моделирующей все особенности щитовой проходки. Однако, расчеты по пространственной модели трудоемки, дороги и требуют больших временных затрат. Поэтому в данной работе использована плоская упругопластическая модель, получившая реализацию в виде конечно-элементной (МКЭ) модели.

На рисунке 1 приведено характерное расчетное сечение. В таблице приведены механические характеристики грунтов в разрезе, где γ_c - плотность, E - модуль Юнга, μ - коэффициент Пуассона, c - сцепление, φ - угол внутреннего трения.

В основе используемой расчетной модели МКЭ по прогнозированию деформаций поверхности лежат следующие основные положения. Перед проходкой выработки в грунте действуют напряжения, вызванные его собственным весом.

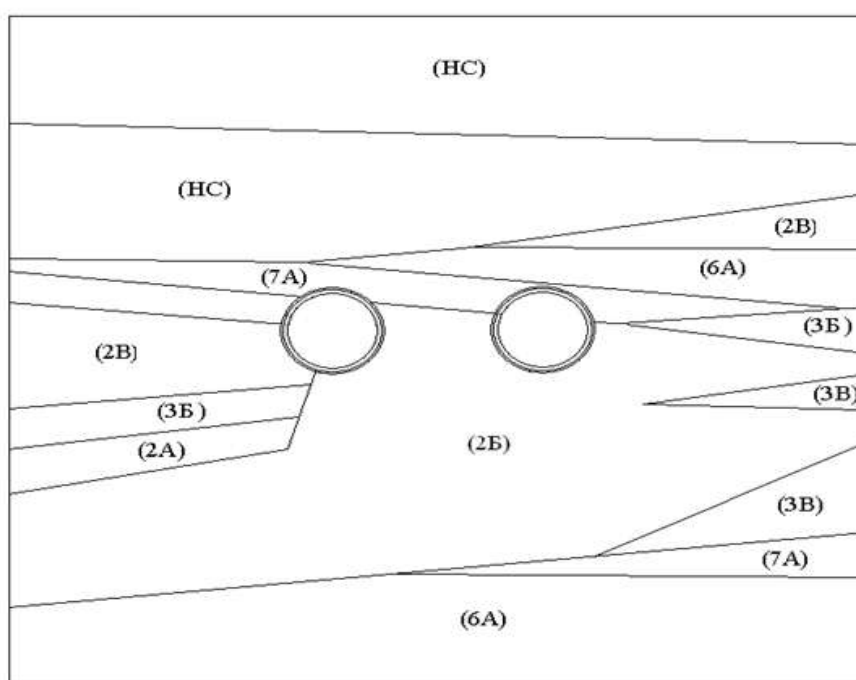


Рис.1. Разрез грунтов в зоне прокладки тоннелей метрополитена.

Таблица – Механические характеристики грунтов

Основной грунт (условное обозначение)	γ_c [кг/м ³]	E [Мпа]	μ	c [КПа]	φ [гр]
Насыпной грунт (НС)	1680	7.9	0.36	35	9
Глина твердая, полутвердая (2А)	1840	15	0.42	32	16
Глина тугопластичная (2Б)	1850	10	0.42	20	13
Глина мягкопластичная (2В)	1870	6	0.42	16	10
Суглинок тугопластичный (3Б)	1960	12	0.35	24	19
Суглинок мягкопластичный (3В)	1940	6.2	0.35	15	14
Песок мелкий (6А)	2040	28	0.3	1.3	31
Песок средней крупности (7А)	2080	35	0.3	1.3	32

Разработка грунта снимает нормальные и касательные напряжения, сложившиеся на поверхности выработки до ее образования. Вокруг выработки образуется зона концентрации напряжений и происходят деформации, которым ранее препятствовал заполнявший выработку грунт. Если полные напряжения не превосходят прочности грунта, то происходят только упругие деформации, если же прочность грунта ниже возникающих напряжений, то деформации происходят до тех пор, пока грунт не заполнит технологический зазор и деформация не будет остановлена сопротивлением обделки.

Внешней силовой нагрузкой является нагрузка от собственного веса грунтового массива. Поскольку на рассматриваемом участке проходка будет осуществляться двумя тоннелями и проходка второго будет отставать от первого, то решение задачи делится на два этапа при описании проходки первого тоннеля и на три этапа, когда в моделируемом сечении попадает второй тоннель. Окончательное решение строится как суперпозиция решений для каждого из этапов нагружения.

Механизм взаимодействия сегментов обделки тоннеля с грунтом может быть проиллюстрирован на рисунке 2, где изображены различные варианты деформирования контактного слоя (для наглядности воспроизведенного в виде двух накладок) в зависимости от усилий воздействия контактирующих массивов друг на друга.

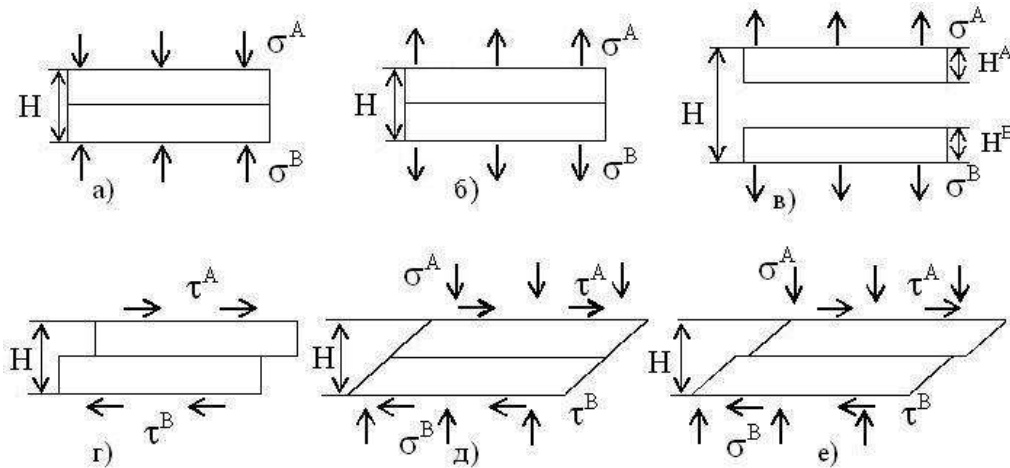


Рис.2. Механизм контактного взаимодействия.

Для решения сформулированной физически нелинейной задачи на базе уравнения виртуальных работ строится итерационный процесс, являющийся комбинацией метода начальных напряжений и метода дополнительной деформации. Базовым для определения k -й итерации является следующее вариационное уравнение

$$\sum_m \iiint_{\Omega_m} \{\sigma^k\}^T \{\delta \varepsilon\} d\Omega + \sum_k \iiint_{\Omega_k} (\varepsilon_H^k E_H \delta \varepsilon_H + \gamma_H^k G_H \delta \gamma_H) d\Omega_k =$$

$$= \sum_m \left(\iiint_{\Omega_m} \rho \{g\}^T (\delta V) d\Omega + \iint_{S_m^\sigma} \{p\}^T \{\delta v\} ds \right) + \sum_k \iiint_{\Omega_k} (\hat{\sigma}_H^k \delta \varepsilon_H + \hat{\tau}_H^k \delta \gamma_H) d\Omega_k,$$

где $\hat{\sigma}_H^k$ и $\hat{\tau}_H^k$ определяются как разности между соответствующими значениями, полученными по линейным соотношениям теории упругости, и их реальными величинами, которые зависят от механизма контактного взаимодействия.

На рисунке 3 приведены результаты расчетов прогнозируемых сдвижений земной поверхности от влияния горных работ. Первый график соответствует вертикальным сдвигениям грунта (в метрах), второй график – горизонтальным (в метрах).

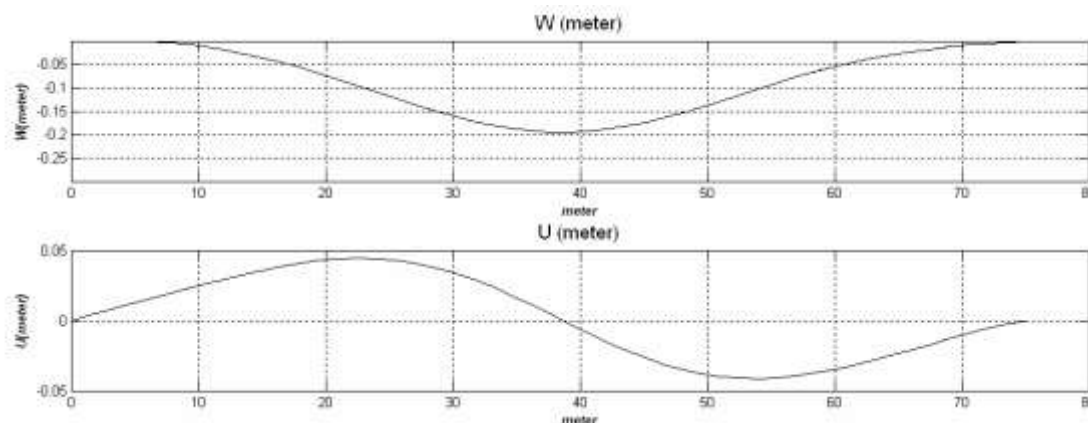


Рис.3. Вертикальные и горизонтальные сдвижения грунта.

Результаты расчетов позволяют определить зоны и масштабы влияния горнопроходческих работ. Максимальные ожидаемые величины деформаций и сдвижений земной поверхности, полученные расчетным путем, в большинстве случаев не превышают своих пороговых значений, то есть остаются в допустимых пределах.

Список литературы:

1. Балафендиева И.С., Бережной Д.В., Карамов А.В. Трехмерное деформирование железобетонной опоры мостовой переправы, расположенной в многослойном водонасыщенном грунте // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. – № 4. Часть 5. – С. 1995-1996.
2. Бережной Д.В., Голованов А.И., Луканкин С.А., Секаева Л.Р. Моделирование поведения железобетонной обделки тоннеля в деформируемом грунте с учетом одностороннего контактного взаимодействия ее блоков через упругие прокладки // Вестник Казанского государственного технического университета, 2010. – №2. – С. 4-9.
3. Бережной Д.В., Голованов А.И., Паймушин В.Н., Пискунов А.А. Расчет напряженно-деформированного и предельного состояний железобетонных конструкций, взаимодействующих с грунтовым основанием // Проблемы прочности и пластичности. – Н. Новгород, 2001. – Вып. 63. – С. 170-179.

А. В. Доль

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
механико-математический факультет
кафедра математической теории упругости и биомеханики
Россия, г. Саратов
dzero@pisem.net

ОДНОМЕРНАЯ СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ ДИНАМИКИ КРОВОТОКА В КРУПНЫХ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДАХ

В работе рассмотрена математическая модель гемодинамики крупных кровеносных сосудов. Предложена одномерная замкнутая система уравнений, описывающая движение крови по сосудам. Приведены основные этапы осреднения трехмерной основной замкнутой системы динамики кровотока.

Ключевые слова: кровоток, кровеносный сосуд, система уравнений.

Одномерные уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости применяются для моделирования динамики кровотока в крупных артериях.

Эти уравнения положены в основу создания быстродействующих многопараметрических моделей артериальных систем, которые достаточно быстро и точно могут численно описывать динамику кровотока в соответствующей части артериальной системы применительно к конкретному индивидууму. Используемый в настоящее время вариант уравнений, полученный с помощью осреднения уравнений Навье-Стокса для осесимметричного течения вязкой несжимаемой жидкости и некоторых упрощающих предположений [1] не полностью отражает характер течения жидкости в случае осевой симметрии потока.

В данной работе предлагается новый, более строгий математический подход к выводу одномерных уравнений осесимметричных движений вязкой жидкости. При этом существенно сокращается число дополнительных гипотез. В частности, непосредственно закон Пуазейля, справедливый только для установившихся течений в тонких жестких трубках, здесь не используется.

Предположим, что происходит осесимметричное нестационарное течение вязкой несжимаемой жидкости в предварительно натянутой гибкой цилиндрической трубке. В цилиндрической системе координат, где ось z направлена по оси потока, ось полярных координат r направлена по радиусу сосуда, а поле скоростей крови V_r, V_z зависит от переменных z, r, t (время), линейные уравнения Навье-Стокса имеют вид [2]:

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right); \\ \rho \frac{\partial v_r}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial(rv_z)}{\partial z} &= 0.\end{aligned}\tag{1}$$

ρ - плотность крови, μ - вязкость крови, p - давление.

Из этих уравнений вытекает уравнение для давления p :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0. \quad (2)$$

Осредняя уравнение (2) по площади поперечного сечения круглой трубки номинального радиуса R и вводя среднее по сечению давление в потоке жидкости по формуле

$$p_c = \frac{2}{R^2} \int_0^R r p dr,$$

получим следующее соотношение:

$$\left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r=R} = -\frac{R}{2} \frac{\partial^2 p_c}{\partial z^2}. \quad (3)$$

Осреднение первого уравнения системы (1) по радиусу трубки приводит к известному одномерному уравнению движения для объёмного расхода жидкости Q [1]:

$$\rho \frac{\partial Q}{\partial t} = -\pi R^2 \frac{\partial p_c}{\partial z} + 2\pi R \mu \left. \frac{\partial v_z}{\partial r} \right|_{r=R} + \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial z^2}, \quad (4)$$

$$Q = 2\pi \int_0^R r v_z dr$$

Аналогично преобразуется уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости

$$v_r|_{r=R} = -\frac{1}{2\pi R} \frac{\partial Q}{\partial z}. \quad (5)$$

Запишем второе уравнение системы (1) с учетом равенства (3) на границе контакта жидкости и стенки трубки:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} v_r|_{r=R} = \frac{R}{2} \frac{\partial^2 p_c}{\partial z^2} + \mu \left(-\frac{\partial}{\partial z} \left(\left. \frac{\partial v_z}{\partial r} \right|_{r=R} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} v_r|_{r=R} \right). \quad (6)$$

Легко показать, что уравнение (6) будет выполнено, если будет выполнено уравнение (4). Для этого нужно из уравнения (6) исключить с помощью уравнения неразрывности (5) радиальную скорость стенки трубы.

Найдем давление на контактной поверхности. Для этого второе уравнение системы (1) умножим на r^2 и проинтегрируем по частям. После применения к соответствующим интегралам теоремы о среднем значении окончательно получим:

$$p|_{r=R} = p_c - \rho \frac{R}{2} \frac{\partial}{\partial t} v_r|_{r=R} - \rho \frac{1}{8\pi} \frac{\partial^2 Q}{\partial t \partial z} + \mu \left[-\frac{\partial v_z}{\partial z} \Big|_{r=R} + \frac{2}{R} v_r|_{r=R} + \frac{R}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} v_r|_{r=R} + \frac{1}{8\pi} \frac{\partial^3 Q}{\partial z^3} \right]. \quad (7)$$

Из уравнения неразрывности вытекает следующее равенство:

$$\left. \frac{\partial v_r}{\partial r} \right|_{r=R} = -\frac{1}{R} v_r|_{r=R} - \frac{\partial v_z}{\partial z} \Big|_{r=R}. \quad (8)$$

Запишем уравнения осесимметричных колебаний круглой цилиндрической оболочки с учетом предварительного натяжения её стенок в продольном и поперечном направлениях [3]. Материал стенок предполагаем линейно упругим и изотропным. Деформации оболочки считаются малыми.

$$\begin{aligned}
\rho_{cm} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{\partial s}{\partial z} + \frac{s_0 - T_0}{R} \frac{\partial w}{\partial z} + \tau, \\
\rho_{cm} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= -\frac{T}{R} + \frac{T_0}{R^2} w + s_0 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + q, \\
s &= \frac{Eh}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \nu \frac{w}{R} \right), \quad T_0 = \frac{Eh}{1-\nu^2} \left(\frac{w}{R} + \nu \frac{\partial u}{\partial z} \right),
\end{aligned} \tag{9}$$

где h – толщина оболочки, E – модуль Юнга материала, ν – коэффициент Пуассона, s_0 , T_0 – соответственно мембранные силы предварительного продольного и поперечного натяжений оболочки, ρ_{cm} – плотность материала, u , w – соответственно продольные и радиальные перемещения оболочки.

Для уравнений гидроупругости необходимо написать кинематические и статические контактные условия на поверхности контакта стенки оболочки с жидкостью.

Условие безотрывного обтекания и условия прилипания частиц жидкости к внутренней стенке оболочки:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = v_z \Big|_{r=R}, \quad \frac{\partial w}{\partial t} = v_r \Big|_{r=R} \tag{10}$$

Статические контактные условия, выражающие условие непрерывности нормальных и касательных напряжений на поверхности контакта:

$$q = p \Big|_{r=R} - 2\mu \frac{\partial v_r}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad \tau = \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} \Big|_{r=R} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \Big|_{r=R} \right) \tag{11}$$

Определенная трудность возникает при нахождении скорости деформации сдвига на стенке трубы $\frac{\partial v_r}{\partial z} \Big|_{r=R}$.

Здесь можно предложить следующий приближенный метод. Введем в рассмотрение среднее по сечению трубки скорость деформации частиц жидкости:

$$\left(\frac{\partial v_z}{\partial r} \right)_{cp} = \frac{2}{R^2} \int_0^R r \frac{\partial v_z}{\partial r} dr = \frac{2}{R} (v_z \Big|_{r=R} - \frac{Q}{\pi R^2}) = \frac{2}{R} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{Q}{\pi R^2} \right). \tag{12}$$

В случае установившегося течения вязкой жидкости в круглых трубках с жесткими стенками (течение Пуазейля) отношение скорости деформации сдвига на стенке трубки к средней по сечению трубки скорости деформации сдвига близко к двум. Предположим, что такое же отношение справедливо и для гибких трубок в общем случае осесимметричного неустановившегося течения. Тогда будем иметь:

$$\frac{\partial v_r}{\partial z} \Big|_{r=R} = 2 \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} \right)_{cp} = \frac{4}{R} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{Q}{\pi R^2} \right). \tag{13}$$

Из формулы (13), как частный случай, следует известное выражение скорости деформации сдвига на жесткой стенке при установившемся течении ($\frac{\partial u}{\partial t} = 0$).

Кроме того, можно получить простую формулу, связывающую скорость продольного перемещения стенки сосуда с объёмным расходом жидкости и осевой скоростью потока. Для этого определим среднюю скорость деформации сдвига частиц жидкости по-другому:

$$\left(\frac{\partial v_z}{\partial r} \right)_{cp} = \frac{1}{R} \int_0^R \frac{\partial v_z}{\partial r} dr = \frac{1}{R} (v_z \Big|_{r=R} - v_z(0)) = \frac{1}{R} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - v_z \Big|_{r=0} \right). \tag{14}$$

Вычитая почленно из формулы (12) формулу (14), окончательно получим:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{R} \left(\frac{2Q}{\pi R^2} - v_z \Big|_{r=0} \right). \quad (15)$$

Измеряя методом доплерографии объёмный расход крови Q и максимальную осевую скорость потока, по формуле (15) можно найти скорость продольного перемещения стенки сосуда.

Теперь запишем систему одномерных уравнений гидроупругости, которая может быть использована при моделировании пульсирующего кровотока в системе крупных артерий.

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial Q}{\partial t} &= -\pi R^2 \frac{\partial p_c}{\partial z} + 2\pi R \mu \frac{\partial v_z}{\partial r} \Big|_{r=R} + \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial z^2}, \\ Q &= 2\pi \int_0^R r v_z dr, \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= -\frac{1}{2\pi R} \frac{\partial Q}{\partial z}, \\ \rho_{cm} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{\partial s}{\partial z} + \frac{s_0 - T_0}{R} \frac{\partial w}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z \partial t} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \Big|_{r=R} \right), \\ \rho_{cm} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= -\frac{T}{R} + \frac{T_0}{R^2} w + s_0 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + p \Big|_{r=R} - 2\mu \frac{\partial v_r}{\partial r} \Big|_{r=R}, \\ s &= \frac{Eh}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \nu \frac{w}{R} \right), \\ T &= \frac{Eh}{1-\nu^2} \left(\frac{w}{R} + \nu \frac{\partial u}{\partial z} \right), \\ p \Big|_{r=R} &= p_c + \rho \frac{1}{4\pi} \frac{\partial^2 Q}{\partial t \partial z} - \rho \frac{1}{8\pi} \frac{\partial^2 Q}{\partial t \partial z} - \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial z \partial t} + \frac{1}{\pi R^2} \frac{\partial Q}{\partial z} + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial^3 Q}{\partial z^3} \right], \\ \frac{\partial v_r}{\partial r} \Big|_{r=R} &= -\frac{1}{R} \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial t} = \frac{1}{2\pi R^2} \frac{\partial Q}{\partial z} - \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial t}, \\ \frac{\partial v_r}{\partial z} \Big|_{r=R} &= \frac{4}{R} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{Q}{\pi R^2} \right), \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{R} \left(\frac{2Q}{\pi R^2} - v_z \Big|_{r=0} \right). \end{aligned}$$

Система замкнута, так для определения десяти искоемых функций $Q, u, w, s, T, p_c, p \Big|_{r=R}, v_x \Big|_{r=0}, \frac{\partial v_r}{\partial r} \Big|_{r=R}, \frac{\partial v_z}{\partial r} \Big|_{r=R}$ имеем десять уравнений.

Путем исключения ряда искоемых функций эту систему можно сократить до пяти уравнений.

Список литературы:

1. Гуляев Ю.П., Коссович Л.Ю. Математические модели биомеханики в медицине: учебное пособие для студентов механико-математического факультета / Саратов. гос. ун-т. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2001. – С. 12
2. Кончин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. – М.: Физматгиз, 1963. – Ч.2. – 728 с.
3. Педли Т. Гидродинамика крупных кровеносных сосудов. – М.: Мир, 1983. – 400 с.

В. В. Трегулов к.т.н.

Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина
Физико-математический факультет, кафедра физики
Россия, Рязань
trww@yandex.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР CdS/Si(p)

Приведены результаты исследования влияния факторов технологического процесса изготовления гетероструктур CdS/Si(p) на величину плотности поверхностных состояний и электрофизические характеристики. Установлено оптимальное соотношение компонентов при гидрохимическом методе формирования гетероструктур.

Ключевые слова: гетероструктура, гидрохимическое осаждение, поверхностные состояния, фотоэлектрический преобразователь.

На основе гетероструктур CdS/Si(p) могут быть изготовлены фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) солнечной энергии с эффективностью преобразования до 26% [2]. Для изготовления ФЭП на основе гетероструктур CdS/Si(p) хорошо подходит технология гидрохимического осаждения тонких пленок. Основными достоинствами этой технологии является возможность выращивания качественных поликристаллических пленок CdS на подложках с большой площадью поверхности, а также простота процесса и низкая стоимость.

Эффективность преобразования ФЭП на основе гетероструктур зависит от поверхностных состояний с глубокими энергетическими уровнями (ГУ), которые являются центрами рекомбинации носителей заряда. Причинами их возникновения являются несоответствие параметров кристаллических решеток контактирующих полупроводников, химические примеси, введенные в процессе изготовления [2].

В данной работе исследуется влияния факторов технологического процесса изготовления гетероструктур CdS/Si(p) на величину плотности поверхностных состояний N_{SS} и основные электрофизические характеристики. Целью этого исследования является оптимизация технологического процесса.

Тонкие пленки CdS формировались на поверхности кремниевых подложек методом осаждения из водных растворов хлорида кадмия $CdCl_2$ и тиомочевины N_2H_4CS .

В качестве подложек использовался монокристаллический кремний p-типа проводимости с удельным сопротивлением 1 Ом·см. Предварительная обработка кремниевых пластин заключалась в травлении в водном растворе KOH (20%) в течение 5 минут в режиме кипения. После травления пластины отмывались в дистиллированной воде.

Технологический процесс изготовления гетероструктуры CdS/Si(p) представлял следующую последовательность действий.

1) Подготавливались водные растворы $CdCl_2$ с концентрацией 0.44М и N_2H_4CS с концентрацией 0.22М.

2) К водному раствору $CdCl_2$ добавлялся концентрированный раствор аммиака NH_4OH до полного растворения выпадающего осадка.

3) К раствору $CdCl_2+NH_4OH$ добавлялся водный раствор тиомочевина. Важно отметить, что качественные пленки CdS на поверхности кремниевых подложек формировались в диапазоне отношения растворов $(CdCl_2+NH_4OH)/N_2H_4CS$ от 1/0.1 до 1/2.0 по объему. За пределами этого соотношения пленки CdS получались пористыми, неоднородными по толщине, с плохой адгезией к подложке.

4) Рост пленок CdS в подготовленном растворе в течение 20 минут при температуре $T=90^\circ C$ и значении показателя $pH=11$.

5) Травление образцов в 10%-м водном растворе HCl в течении 20 секунд при $T=20^\circ C$ для удаления аморфной фазы CdS .

6) Промывка дистиллированной водой и сушка при $T=70^\circ C$.

7) Изготовление омических контактов к кремниевой подложке и пленке CdS посредством пайки индия с последующей формовкой электрическим импульсом.

Было изготовлено 9 образцов с разным соотношением компонентов $(CdCl_2+NH_4OH)/N_2H_4CS$ по объему (таблица). Пленки CdS для всех образцов имели проводимость n-типа, толщина составила 2.5 ± 0.3 мкм.

Измерения электрофизических характеристик всех образцов проводились при $T=300 K$, результаты представлены в таблице.

Таблица – Электрофизические характеристики гетероструктур $CdS/Si(p)$.

№ обр.	Соотношение компонентов	V_d , В	N_{ss} , cm^{-2}	U_{xx} , мВ	n , отн.ед.	U_{np} , В
1	1/0.1	0.29	$6.54 \cdot 10^{13}$	138	2.7	-
2	1/0.2	0.40	$2.35 \cdot 10^{13}$	139	2.5	-
3	1/0.3	0.52	$1.04 \cdot 10^{12}$	240	2.1	6.8
4	1/0.5	0.55	$7.10 \cdot 10^{11}$	253	2.1	7.2
5	1/0.7	0.67	$7.06 \cdot 10^{11}$	295	2.0	7.8
6	1/1.0	0.66	$5.30 \cdot 10^{11}$	295	2.0	8.0
7	1/1.125	0.50	$1.22 \cdot 10^{12}$	210	2.1	7.7
8	1/1.5	0.39	$1.42 \cdot 10^{13}$	200	2.8	-
9	1/2.0	0.30	$4.23 \cdot 10^{13}$	130	2.9	-

Прямые ветви вольт-амперных характеристик (ВАХ) гетероструктур $CdS/Si(p)$ при $T=300 K$ могут быть представлены зависимостью

$$I = I_0 \cdot \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right), \quad (1)$$

где I_0 – ток насыщения, q – заряд электрона, V – напряжение, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, n – показатель идеальности [2]. Для всех исследованных образцов $n \geq 2.0$ (таблица), следовательно, токи, протекающие через гетеропереход, определяются процессами генерации и рекомбинации носителей в области пространственного заряда.

Анализ обратных ветвей ВАХ показал, что наибольшие значения пробивного напряжения U_{np} имеют образцы №5 и №6 (таблица). Для образцов №1, №2, №8 и №9 обратные ветви ВАХ насыщения не имеют и соответствуют так называемому «мягкому пробою», поэтому для них величина U_{np} не может быть определена корректно.

Измерение напряжения холостого хода в стандартном режиме освещения АМ 1.5 показало, что наибольшее значение U_{xx} имеют образцы №5 и №6 (таблица).

Вольт-фарадные характеристики образцов измерялись с помощью цифрового измерителя иммитанса Е7-20. Амплитуда синусоидального измерительного сигнала составляла 40 мВ. Высокочастотные вольт- фарадные характеристики (ВЧВФХ) измерялись на частоте 1 МГц, низкочастотные (НЧВФХ) – на частоте 1 кГц.

При высокой частоте процессы перезарядки глубоких энергетических уровней (ГУ) поверхностных состояний не успевают следовать за переменной составляющей измерительного сигнала и не дают вклад в измеряемую емкость. При низких частотах процессы перезарядки ГУ успевают следовать за измерительным сигналом, что приводит к возрастанию емкости. Таким образом, измеряя НЧВФХ и ВЧВФХ гетероструктуры, можно определить величину N_{SS} [1].

Для всех образцов ВЧВФХ в виде $C^{-2} = f(V)$ имела вид прямой линии в диапазоне обратных напряжений смещения от 0 до 2 В. Следовательно, в указанном диапазоне напряжений гетеропереход $CdS/Si(p)$ можно считать резким. Экстраполяция ВЧВФХ $C^{-2}(V) \rightarrow 0$ позволила определить величину контактной разности потенциалов V_d (таблица). Наибольшее значение V_d имеют образцы №5 и №6.

Кривые НЧВФХ $C^{-2} = f(V)$ для всех образцов на начальном участке отклоняются от линейной зависимости. Это свидетельствует о том, что величина заряда поверхностных состояний Q_{SS} зависит от приложенного напряжения обратного смещения V .

Заряд Q_{SS} связан с НЧВФХ $C_{HЧ}(V)$ следующим образом:

$$Q_{SS} = q(N_{am}\delta + N_{SS})S = \int_0^{E_{g1}-\Phi} C_{HЧ}(V) dV, \quad (2)$$

где N_{am} – концентрация мелкой акцепторной примеси в базовой области гетероструктуры (в кремнии), определяется из ВЧВФХ; δ – ширина области, в которой происходит перезарядка ГУ; S – площадь гетероперехода; E_{g1} – ширина запрещенной зоны базовой области гетероструктуры – $Si(p)$; Φ – значение контактной разности потенциалов гетероперехода при низких частотах измерительного сигнала, учитывающее влияние ГУ (определяется из НЧВФХ).

Уравнение (2) получено на основе общих представлений о частотной зависимости емкости барьерного слоя, представленных в [1] с учетом зависимости заряда Q_{SS} от приложенного постоянного напряжения.

Уравнение (2) справедливо для резких, несимметричных гетеропереходов, к которым относятся исследуемые образцы.

Величина δ определяется следующим образом [1]:

$$\delta = \frac{\epsilon_p \epsilon_0 S}{C_{HЧ}(V)} - \sqrt{\frac{2\epsilon_p \epsilon_0 (E_{SS} - E_{Fp})}{q^2 N_{am}}}, \quad (3)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, ϵ_p – диэлектрическая проницаемость $Si(p)$, $(E_{SS} - E_{Fp})$ – энергетическое положение поверхностного ГУ E_{SS} относительно квазиуровня Ферми для дырок E_{Fp} .

Значения N_{SS} для всех образцов определялись по уравнению (2) и представлены в таблице. Минимальное значение N_{SS} имеет образец №6.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы. Наилучшие значения электрофизических характеристик имеют образцы №5 и №6. Эти образцы имеют одинаковые значения U_{XX} . Величины V_d практически совпадают с точностью до погрешности. В то же время, образец №6 имеет более низкое значение N_{SS} . Отклонение соотношения $(CdCl_2 + NH_4OH)/N_2H_4CS$ от значений 1/0.7 и 1/1.0

приводит к росту N_{ss} (таблица), что свидетельствует о повышении концентрации дефектов с ГУ на гетерогранице. При этом возрастает интенсивность генерационно-рекомбинационных процессов в области пространственного заряда, о чем свидетельствует рост величины n и одновременное снижение U_{np} . Снижение величин V_d и U_{xx} в [1] и [2] объясняется ростом концентрации ГУ, эта тенденция наглядно прослеживается в таблице. Величина U_{xx} напрямую определяет эффективность ФЭП [2], поэтому образцы №5 и №6 наилучшим образом подходят для применения в качестве этих приборов.

Таким образом, в исследуемом технологическом процессе изготовления гетероструктур $CdS/Si(p)$ оптимальное соотношение компонентов $(CdCl_2+NH_4OH)/N_2H_4CS$ составляет от 1/0.7 до 1/1.0.

Список литературы:

1. Берман, Л.С. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках / Л.С. Берман, А.А. Лебедев. – Л.: Наука, 1981. – 176 с.
2. Шарма, Б.Л. Полупроводниковые гетеропереходы: пер. с англ. / Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. – М.: Сов. радио, 1979. – 232 с.

А. И. Хазбулатов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева
кафедра специальных двигателей
Россия, Казань
hazbulatov_artur@mail.ru

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОТОЧНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗА ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ

Представлено устройство для очистки газа (воздуха) – прямоточно-центробежный сепаратор. Выявлены оптимальные параметры работы и установлена зависимость степени очистки данного устройства от размеров частиц механических примесей.

Ключевые слова: вихревая камера, сепарационная щель, тангенциальный лопаточный завихритель, степень очистки.

Одной из наиболее распространенных проблем в промышленности является очистка газа (воздуха) от механических или жидких частиц, например, в газоперекачивающих агрегатах (ГПА). В качестве привода компрессора в ГПА в основном используются газотурбинные установки. Механические примеси (пыль и др.), находящиеся в воздухе, проходя через газотурбинную установку, приводят к загрязнению лопаток компрессора и турбин и их абразивному износу. Поэтому на входе в ГПА ставят воздухоочистительные устройства (ВОУ). Основными требованиями к ВОУ для ГПА являются высокая эффективность (степень очистки), малое гидравлическое сопротивление и простота конструкции.

Анализ известных ВОУ, таких как циклоны и вихревые пылеуловители [3], показал их довольно высокую степень очистки 86...92% и 96,5...98% соответственно, однако, они имеют существенные недостатки – большое гидравлическое сопротивление и необходимость дополнительно затрачивать энергию, например, на вращение вентилятора для нагнетания или отсоса воздуха в том или ином случае.

Так, согласно [4] гидравлическое сопротивление вихревых пылеуловителей составляет 2,8...3,7 кПа , что существенно выше регламентируемых техническими условиями ГПА $\sim 600 \text{ Па}$. К недостаткам вихревых пылеуловителей также можно отнести сложную конструкцию и эксплуатацию аппаратов.

Для циклонных аппаратов противоточного действия гидравлическое сопротивление составляет 1,2...1,5 кПа [1], так как в них применяются элементы, изменяющие направление движения пылегазового потока на 180° , что способствует росту газодинамического сопротивления и усилению процесса турбулентного газообмена, сопровождаемого выносом части мелких фракций восходящим вихревым потоком.

В прямоточных циклонах частично устраняются недостатки, которые присущи противоточным циклонам. Но в связи с вынужденным отсосом воздуха из бункера уловленной примеси, который увеличивает эффективность сепарации, затрачивается дополнительная энергия.

Цель данной статьи – разработка конкурентоспособного устройства для очистки газа (воздуха) – прямоточно-центробежного сепаратора, отвечающего техническим

требованиям первой ступени ГПА, а также определение оптимальных параметров работы созданного устройства.

Согласно [2] при осевом подводе газа наблюдаются значительные осевые скорости, которые не позволяют при небольшой высоте циклона в достаточной степени отсепарировать примесь. Более благоприятные условия для закручивания потока и сепарации примеси у циклонов со спиральным или тангенциальным подводом потока [2]. Поэтому в данной работе был применен тангенциальный лопаточный завихритель (ТЛЗ), обеспечивающий степень закрутки $W_t/W_0 = 2$, где W_t – тангенциальная скорость на входе в вихревую камеру, W_0 – среднерасходная скорость через ПЦС.

В процессе работы была предложена следующая схема ПЦС (рис. 1).

В газодинамической лаборатории Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева был изготовлен стенд ПЦС в натуральную величину по данной схеме.

Устройство работает следующим образом. Воздух с примесью входит в ТЛЗ 4 под действием разряжения создаваемого вентилятором, работающим на отсасывание (не показано), далее, приобретя крутку, направляется в вихревую камеру (трубу) 5, где разделяется на два потока.

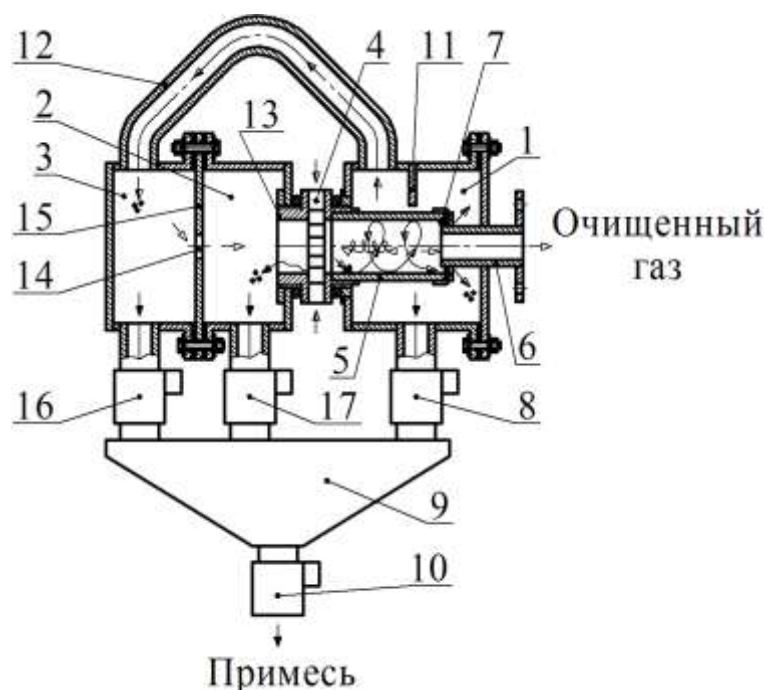


Рис. 1- Схема ПЦС с перепуском воздуха.

Первый поток, содержащий очищенный воздух, движется в приосевой зоне вихревой камеры 5, и выходит из нее через отводящий патрубок 6. Второй поток, в котором наибольшее количество примеси, движется по периферии вихревой камеры 5. Под действием центробежной силы происходит практически полное отделение примеси от очищаемого воздуха. Примесь, движущаяся в спиральном потоке по периферии вихревой камеры 5, захватывается сепарационным кольцом 7 и затем под действием сил тяжести и инерции попадает в секцию 1, из которой отводится через сбросный клапан 8 в общий бункер 9. Общий бункер 9 также снабжен сбросным клапаном 10. Незначительная часть воздушного потока, попавшая через сепарационное кольцо 7 в секцию 1, огибая отбойник 11, движется в зону перепуска воздуха, откуда

по изогнутой перепускной трубе 12 попадает в секцию 3. Через патрубок 13 происходит отсос перепускного газа из секции 3 в вихревую камеру 5 через отверстие 14, находящееся в перегородке 15 разделяющей секции 2 и 3.

Так как в вихревой камере 5 воздушный поток движется по спиральной траектории, то при выходе воздуха из ТЛЗ 4, в вихревой камере 5 образуется зона обратного течения газа. Под действием разрежения в зоне обратных токов, некоторое количество воздуха с примесью из ТЛЗ 4, двигаясь в обратном направлении относительно основного потока, попадает в секцию 2. Так как скорость движения восходящих потоков в секциях 3 и 2 по сечению не велика, то примесь в них оседает, а затем выводится через сбросные клапаны 16 и 17 соответственно в общий бункер 9.

Перепускной воздух, попавший в секцию 3 из секции 1, а далее в секцию 2 из-за разности давлений в них и частично очищенный закрученный поток газа, поступивший в секцию 2 из завихрителя 4, направляются в вихревую камеру 5 через патрубок 13, т. е. из зоны повышенного давления в зону пониженного давления, чем ликвидируется возрастание подпора в секции 1, и кроме того, воздух получает дополнительную очистку, проходя повторно через вихревую камеру 5.

Перепад давления на ПЦС измерялся с помощью *U*-образного манометра и во всех экспериментах поддерживался в пределах 600 Па.

Степень очистки определялась как отношение массы отсепарированной механической примеси в бункере к исходному количеству механической примеси.

При проведении экспериментов в работе использовались три типа механических примесей: просеянный речной песок с размерами частиц от

64 до 250 мкм, плотностью $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$, минерал $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ (микротальк) с размерами частиц от 1 до 56 мкм, $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$ и оксид алюминия Al_2O_3 с размерами частиц от 1 до 125 мкм, $\rho = 3,8 \text{ г/см}^3$.

В работе было проведено специальное экспериментальное исследование влияния длины вихревой камеры, ширины сепарационной щели, перепуска воздуха в вихревую камеру на степень очистки. В результате экспериментов были получены оптимальные их значения.

Ввиду ограниченности статьи по объёму приведём некоторые полученные результаты. На рис. 2 приведена гистограмма зависимости степени очистки ПЦС от размеров частиц механических примесей. Видно, что наилучшая степень очистки 99,9 % для частиц с размерами от 26 до 40 мкм. Отметим, что степень очистки для частиц с размерами от 64 до 125 мкм ниже, это объясняется отскоком частиц от стенки вихревой камеры. Также необходимо отметить, что согласно техническим требованиям ГОСТа 19284-79 на микротальк, массовая доля частиц с размерами до 56 мкм распределяется по электропрепитационному методу следующим образом: частицы менее 5 мкм – 45 %, от 5 до 56 – 55 %, исходя из вышесказанного и рис. 2, можно предположить, что частицы менее 5 мкм в данном ПЦС улавливаются с вероятностью 25...30 %.

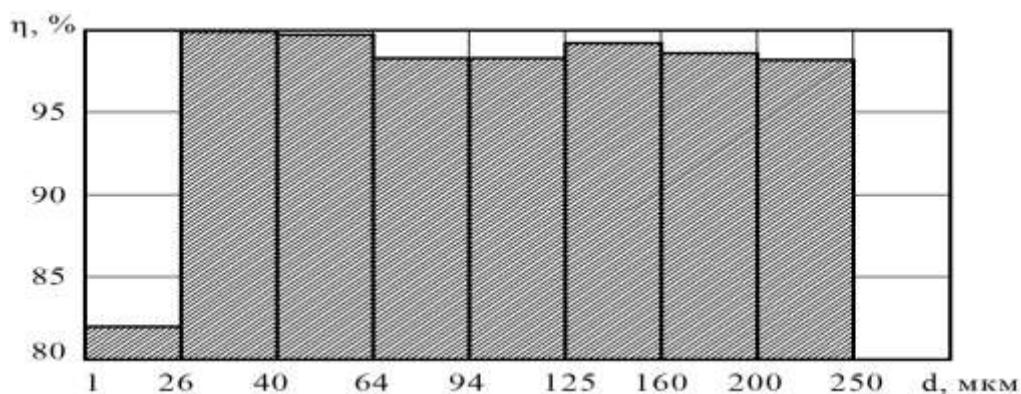


Рис. 2- Гистограмма зависимости степени очистки ПЦС от размеров частиц механических примесей.

Таким образом, предлагаемое устройство позволяет исключить дополнительные затраты энергии, благодаря улучшенной рециркуляции воздуха в ПЦС, повысить эффективность сепарации, а также обеспечить удобство эксплуатации и ремонтпригодность, так как используются стандартные соединения элементов конструкции. Данное устройство может быть использовано в различных отраслях промышленности, например газовой, нефтяной, химической, энергетической, пищевой и др.

Список литературы:

1. Алиев, Г. М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов [Текст]: справ. / Гасан Мамед-Али оглы Алиев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Банит Ф. Г., Мальгин А. Д. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1979. – 351., ил. – (Охрана окружающей среды).
3. Гупта, А. К. Закрученные потоки [Текст] / А. К. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред. – М.: Мир, 1987. – 588 с.
4. Лукин, В. Д. Очистка вентиляционных выбросов в химической промышленности [Текст] / В. Д. Лукин, М. И. Курочкина.; ред. Романкова П. Г. – Л.: Химия, 1980. – 232 с.

СЕКЦИЯ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

02.00.01

А. В. Басов¹ к.т.н., В. Н. Басов² д.х.н., О. И. Бахирева² к.х.н.

¹Пермская государственная фармацевтическая академия
кафедра аналитической химии
Россия, г. Пермь
basov81@mail.ru

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет
химико-технологический факультет
кафедра химии и биотехнологии
Россия, г. Пермь
basov81@mail.ru

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И ИХ СОЕДИНЕНИЙ

Рассмотрена возможность прогнозирования электрохимических свойств металлов и их соединений на примере электропревращения вспомогательного реактива в гальваностатической кулонометрии. При построении графической зависимости «Разность между химической энергией гидратации – граничный потенциал области преобладания» выявлено 3 семейства кривых, где кривая 1 включает элементы с незаконченным 18-электронным внешним слоем, кривая 2 – законченным 2, 8 и 18-электронными внешними слоями, кривая 3 – элементы III группы. При сравнении с пирамидальной формой таблицы Д.И. Менделеева указанных кривых выявлено в основном их соответствие соединительным линиям для выражения реальных смещений элементов, соответствующих различию их электронных строений.

Ключевые слова: электрохимические свойства металлов, электропревращение, кулонометрия, электрогенерация.

Рассмотрим возможность прогнозирования электрохимических свойств металлов и их соединений на примере электропревращения вспомогательного реактива в гальваностатической кулонометрии.

Способы электрогенерации промежуточных реагентов и условия проведения кулонометрического титрования отличаются разнообразием протекающих процессов.

При получении титрантов изменяются электронные состояния реагентов и их внутримолекулярная конфигурация. Индивидуальность электрохимического поведения отдельных молекул или ионов определяется не только их внешней электронной структурой, но и строением в целом (заряд ядра, радиусы, состояние электронов в отдельных слоях).

К параметрам, влияющим на эффективность процесса, можно отнести соответствующие закономерности химического взаимодействия определяемого соединения и титранта, связанные с положением соответствующих элементов в периодической системе. Это позволяет рассматривать кулонометрическое титрование как сложную физико-химическую систему (ФХС).

С целью разработки обобщенного подхода к теории генерации кулонометрических титрантов рассмотрим изучаемую ФХС на основе периодического закона Д.И. Менделеева. Процесс электрогенерации титрантов из вспомогательного реактива на индифферентных электродах имеет сложный характер. При рассмотрении возможности получения кулонометрических титрантов указанным способом определенную информацию может дать электронное строение вспомогательного реактива и фонового электролита. Так, для электрохимического восстановления известно соотношение между потенциалом полуволны и энергией низшей молекулярной орбитали.

$$E_{1/2} = a_{n+1} \cdot \beta - A$$

где, a_{n+1} – коэффициент, характеризующий энергию низшей вакантной молекулярной орбитали; β – обменный или резонансный интеграл; A – $E_{1/2}$ первой волны соединения, принятого за стандарт. Как видно, при увеличении энергии нижней вакантной орбитали восстановление затрудняется и, наоборот.

При электрохимическом окислении имеется связь между потенциалом полуволны и энергией высшей заполненной молекулярной орбитали (электрон удаляется с высшей занятой молекулярной орбитали).

Приведенные соотношения отражают роль электронного строения вспомогательного реактива и фонового электролита. По значениям энергий их молекулярных орбит можно судить о выходе по току титранта. Однако отсутствие надежных данных о строении ионов в растворе и на поверхности электрода не позволяет в настоящее время выполнить эти расчеты.

Обобщая теоретические положения и экспериментальные данные, можно заключить, что электрохимическое превращение вспомогательного реактива протекает с высокой скоростью, когда электронные структуры вспомогательного реактива и промежуточного реагента идентичны, отличаясь лишь электронами, могущими занять вакантную устойчивую орбиту.

Электропревращение вспомогательного реактива будет замедлено или вообще отсутствовать, когда все электронные орбиты комплекса заняты, а низшей орбитой является σ -разрыхляющая орбиталь со сравнительно высокой энергией. Причиной медленного переноса электронов может быть и существенное изменение состава координационной сферы или ее деформация, что связано с изменением длины связи между лигандом и центральным атомом при переходе из одной степени окисления в другую. При этом следует учитывать энергетический барьер с соответствующей энергией активации. Величина активационного сверхпотенциала генерации титранта с такими факторами, как плотность тока, температура, строение двойного электрического слоя генераторного электрода зависит от комплексообразующих свойств вспомогательного реактива. Определяющей в комплексе является донорно-акцепторная связь, которую в случае d-электронных пар центрального иона усиливает дативное взаимодействие.

Акцепторами являются ионы и атомы с большим сродством к электрону, имеющие вакантные орбитали, а лигандами – электронейтральные молекулы или отрицательные ионы, выступающие в роли доноров свободных или неподеленных электронных пар.

Комплексообразующая способность элементов находит свое закономерное изменение в периодической системе. Способность к образованию комплексных соединений монотонно возрастает в периодах системы элементов слева направо, то есть от щелочных металлов до галогенов. При этом следует полагать, что к

комплексным соединениям следует отнести также и все сложные кислородосодержащие анионы. Зависимость электродного потенциала от комплексообразования выражается уравнением [1]:

$$\Delta E = \frac{RT}{nF} \ln \varphi$$

где, ΔE – изменение величины электродного потенциала; φ – закомплексованность.

Используя эту зависимость, можно добиться соответствующего различия потенциалов электропревращения вспомогательного реактива и фонового электролита для обеспечения 100%-ного выхода по току промежуточного реагента.

При рассмотрении возможности взаимодействия промежуточных реагентов с анализируемыми соединениями следует учитывать их реакционные свойства.

Сопоставляя общие данные о восстановительной и окислительной способности элементов с характеристиками катионо- и анионообразующей способности элементов, а также их кислотно-основных свойств, Ляликов и Клячко [3] показали, что все эти свойства изменяются в периодической системе симбатно. Среди ряда теорий кислот и оснований следует выделить протонно-электронно-гидридную концепцию (ПЭГ), которая выражает единство всех химических свойств [2]. В соответствии с этой концепцией кислотные функции присущи протонам или носителям протонов (например, сольватированные протоны), а основные – электронам или носителям электронов (например, сольватированные электроны или гидрид-ионы). Характеристикой, определяющей возможность химической реакции, является электроотрицательность. Как показано в [3], при значительных различиях во внешних электронных оболочках более электроотрицательного атома происходит окислительно-восстановительная реакция. При меньших различиях в электронных оболочках и наличии электронных вакансий в оболочке более электроотрицательного атома происходят реакции координирования между атомами, ионами или молекулами.

Общие закономерности химических свойств элементов, связанные со структурой периодической системы в целом, позволяют в первом приближении судить о возможности взаимодействия промежуточного реагента с определяемым соединением. Для получения более точной информации необходимо учитывать индивидуальные для каждого титранта значения энергии валентных электронов.

В качестве источников кулонометрических титрантов находят применение металлы (активные электроды), изменение свойств которых в процессе электролиза объясняется их соответствующей электронной структурой. В периодической зависимости от порядковых номеров находятся первые потенциалы ионизации, являющиеся характеристиками прочности связи электронов в атоме.

Другая важная характеристика атома – электроотрицательность, позволяющая судить о средней величине энергии связи внешних электронов при ионизации валентных состояний.

Кинетика анодного растворения металлов зависит не только от природы последних, но и от состава фонового электролита. Для применения активного электрода в титровании ограничивающим условием является 100%-ный или постоянный выход по току соответствующего продукта поляризации.

Величины электродных потенциалов изменяются параллельно с изменением разности величин химической энергии гидратации ионов в растворе и работы удаления ионов из кристаллической решетки. Представляет теоретический и практический интерес рассмотреть указанную зависимость для металлов, использование которых возможно в качестве активных электродов. Естественно, что выбор этих электродов должен быть ограничен областью термодинамической устойчивости фонового

электролита. Эти результаты могут послужить основой для синтеза условий выполнения кулонометрического титрования.

При выборе условий генерации кулонометрических титрантов из металлических электродов целесообразно использовать диаграммы Цурбе, позволяющие выбрать диапазон рН и потенциалов металлического электрода для генерации титранта-иона этого металла в определенной степени окисления. Естественно, термодимические данные диаграммы Цурбе требуют экспериментального подтверждения в каждом конкретном случае разработки метода растворения электрода с фарадеевским выходом по току продукта поляризации (соответствие теоретической области преобладания металла в определенной степени окисления экспериментальным данным).

При построении графической зависимости «Разность между химической энергией гидратации – граничный потенциал области преобладания» выявлено 3 семейства кривых, где кривая 1 включает элементы с незаконченным 18-электронным внешним слоем, кривая 2 – законченным 2, 8 и 18-электронными внешними слоями, кривая 3 – элементы III группы.

При сравнении с пирамидальной формой таблицы Д.И. Менделеева указанных кривых выявлено в основном их соответствие соединительным линиям для выражения реальных смещений элементов, соответствующих различию их электронных строений.

На рисунке 1 граничный потенциал области преобладания представлен как функция изменения электроотрицательности. Как видно, с увеличением электроотрицательности граничный потенциал смещается в сторону более положительных значений.

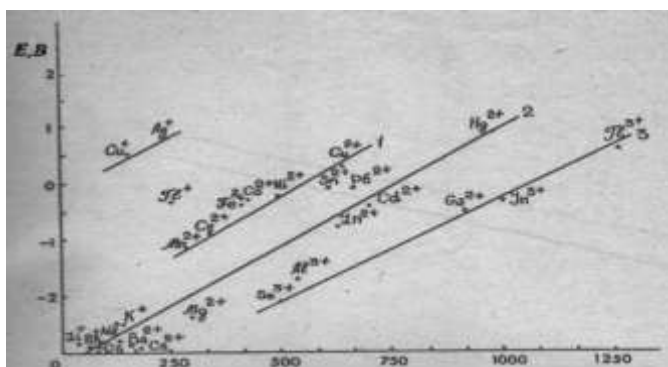


Рис. 1 – Разность между химической энергией гидратации и энергией ионизации – граничный потенциал области преобладания.

Проведенный анализ позволяет сделать заключение о периодической зависимости граничного потенциала области преобладания от разности между химической энергией гидратации и энергией ионизации, а также и от электроотрицательности.

Список литературы:

1. Делимарский Ю.К., Электролиз. Теория и практика., Киев, Техника, 1982.
2. Крешков А.П. Аналитическая химия неводных растворов. Москва, Химия, 1982.
3. Ляликов Ю.С., Клячко Ю.С., Теоретические основы современного качественного анализа. Москва, Химия, 1978.

А. В. Басов¹ к.т.н., В. Н. Басов² д.х.н., О. И. Бахирева² к.х.н.

¹Пермская государственная фармацевтическая академия
кафедра аналитической химии
Россия, г. Пермь
basov81@mail.ru

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет
химико-технологический факультет
кафедра химии и биотехнологии
Россия, г. Пермь
basov81@mail.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АМАЛЬГАМ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

Показана возможность прогнозирования электрохимических свойств амальгам металлов исходя из их положения в периодической системе. Требованиям проведения электролиза с эффективностью по току 100 % отвечают р-элементы подгрупп галлия, германия, мышьяка, цинка.

Ключевые слова: электрохимические свойства металлов, амальгамы металлов, кулонометрия.

Еще в 1952 г. академик М.Г. Козловский отметил целесообразность разработки кулонометрических методов с использованием процесса анодного окисления амальгам. Преимущество применения амальгамы металла перед металлическим активным электродом выявляется тогда, когда выход по току титранта из металла не соответствует расчетному значению по закону Фарадея. Это несоответствие может быть вызвано как анодной дезинтеграцией, так и стадийным протеканием реакции [1]. Применение амальгам может устранять дезинтеграцию металлов. Так, выход по току олова (II) таллия (I), цинка (II), свинца (II), висмута (III) из их амальгам составляет 100 %. В этом случае свойства амальгам металлов следует рассматривать, исходя из следующих условий:

- растворимость металлов в ртути, включая и химическое взаимодействие;
- электрохимические свойства амальгамы, влияющие на выбор условий генерации титрантов;
- возможность применения продукта поляризации амальгамы в качестве кулонометрического титранта.

Для обеспечения высокой скорости электродной реакции анодное растворение амальгам металлов целесообразно вести в условиях конвективной диффузии. При перемешивании амальгам, когда отвод продуктов электролиза происходит как за счет диффузии, так и конвекции, возрастают величины плотности тока со 100%-ной эффективностью генерации промежуточного реагента. В этом случае концентрация металла в амальгаме должна выбираться с учетом фактора растворимости.

Растворимость металлов в ртути увеличивается по периодам периодической системы с понижением потенциалов ионизации металлов. По типу диаграмм состояния и виду кривой ликвидуса системы ртуть – металл делятся на 3 типа: системы с явно

выраженным взаимодействием; системы с отсутствием взаимодействия и плавным ходом кривой ликвидуса; системы с практически нерастворимыми металлами.

Свободная внешняя d-оболочка металла амальгамы характерна для систем с явно выраженным взаимодействием; полностью заполненная внешняя d-оболочка – система с плавным ходом кривой ликвидуса, а не полностью заполненная внешняя d-оболочка – практически не растворимые в ртути переходные металлы.

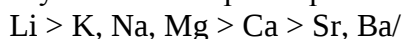
В таблице 1 приведена растворимость металлов в ртути в соответствии с их положением в периодической системе. Показано, что по электрохимическому поведению амальгамные электроды можно классифицировать по группам, исходя из строения внешних электронных оболочек атомов.

Таблица 1

Растворимость металлов в ртути (ат. %)

Группа	Подгруппа	Металл – растворимость
I	A	Li – 12; Na – 5,3; K – 2,3; Rb – 3,15; Cs – 6,48
I	Б	Cu – $7,9 \cdot 10^{-3}$; Ag – $7,9 \cdot 10^{-2}$; Au – $1,33 \cdot 10^{-1}$
II	A	Mg – 3,0; Ca – 1,48; Sr – 2,5; Ba – 0,48
II	Б	Zn – 6,4; Cd – 10,6
III	A	Al – $1,5 \cdot 10^{-2}$; Ga – 3,6; In – 70,26; Tl – 43,73
III	Б	La – $1,3 \cdot 10^{-2}$; Eu – 1,78; Yb – $4,0 \cdot 10^{-1}$; U – $1,17 \cdot 10^{-4}$; Pu – $1,6 \cdot 10^{-2}$
IV	A	Ge – нерастворим; Sn – 1,21; Pb – 1,93
IV	Б	Ti – $4,2 \cdot 10^{-5}$; Zr – нерастворим; Hf – $1,4 \cdot 10^{-2}$
V	A	As – нерастворим; Sb – $3,4 \cdot 10^{-4}$; Bi – 1,6
V	Б	V – $2 \cdot 10^{-4}$
VI	Б	Cr – $1,6 \cdot 10^{-6}$; Mo – $2 \cdot 10^{-7}$; W – $6 \cdot 10^{-8}$
VII	Б	Mn – $5,5 \cdot 10^{-3}$; Re – нерастворим
VIII	Б	Fe – $1,8 \cdot 10^{-6}$; Co – $3,4 \cdot 10^{-6}$; Ni – $7 \cdot 10^{-6}$; Pt – $5 \cdot 10^{-2}$

Первая группа включает в себя s-элементы (щелочные и щелочно-земельные металлы), образующие с ртутью интерметаллические соединения. Большие токи обмена и высокие коэффициенты диффузии обуславливают незначительную анодную поляризацию этих систем. Растворы водных электролитов разлагают амальгамы. С учетом убывания скорости разложения амальгамы можно расположить в ряд:



Вторую группу составляют f-элементы, образующие с ртутью интерметаллические соединения. Анодное окисление амальгам скандия, иттрия, лантаноидов и актиноидов характеризуется перенапряжением, связанным с соответствующими коэффициентами диффузии.

К третьей группе относятся p-элементы (металлы подгрупп галлия, германия, мышьяка), а также подгруппа цинка. Они не образуют с ртутью прочных химических соединений. Потенциалы анодного окисления амальгам незначительно отличаются от реальных потенциалов этих металлов и равновесных потенциалов насыщенных амальгам.

В четвертую группу включены d-элементы, амальгамы которых представляют собой тонкодисперсные взвеси металлов в ртути (хром, железо, кобальт) или растворы труднорастворимых интерметаллических соединений с ртутью (марганец, никель, титан, цирконий).

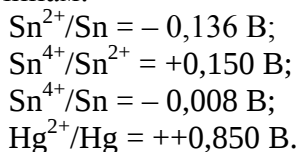
Исходя из рассмотренных зависимостей растворимости металлов в ртути и электрохимических свойств амальгам этих металлов, можно аргументированно, основываясь на их положении в периодической таблице, выбрать систему, отвечающую условию ее применения в качестве активного электрода. Так, по условию растворимости металлов в ртути можно рассматривать амальгамы металлов, имеющих свободную или полностью заполненную внешнюю s-оболочку. Однако амальгамы, образованные s-металлами, применять неперспективно вследствие их разложения водными растворами электролитов. Требованиям проведения электролиза с большой скоростью отвечают р-элементы подгрупп галлия, германия, мышьяка, а также цинка.

В настоящее время известны способы электрогенерации титрантов из амальгамы олова, свинца, висмута. Можно предсказать возможность применения и амальгам цинка, кадмия, галлия, индия, таллия.

Естественно, на эффективность тока генерации промежуточных реагентов из амальгам может оказать влияние состав электролитов, обладающих комплексообразующими или осадительными свойствами, а также концентрация металла в амальгаме. Условия проведения генерации в каждом конкретном случае уточняются изучением кривых поляризации амальгамы и ртути на различных фонах.

Активный электрод – амальгама р-элемента периодической системы. Металлы с таким строением внешних электронных оболочек не образуют с ртутью прочных химических соединений, а потенциалы анодного окисления амальгам незначительно отличаются от реальных потенциалов этих металлов и равновесных потенциалов насыщенных амальгам. Олово в амальгаме находится в атомарном состоянии. Его растворимость в ртути 0,6 вес. %.

Стандартные потенциалы исследуемых систем соответствуют следующим величинам:



На основании этих данных можно предположить, что при анодной поляризации амальгамного электрода в первую очередь будет происходить растворение олова с образованием его ионов. В качестве фоновых растворов целесообразно использовать растворы кислот и щелочей, не образующих прочных комплексных или нерастворимых соединений с ионами олова. Применение таких растворов может устранить пассивацию генераторного электрода.

В связи с тем, что материал электрода непосредственно способен восстанавливать анализируемые соединения, целесообразно использование внешней генерации титранта. Такой прием позволяет устранить несовместимость условий генерации титранта с химическими условиями определения окислителей.

Исследовали электрохимический процесс анодного растворения амальгамы, при котором доставка атомов олова к поверхности электрода осуществлялась как за счет диффузии, так и диффузии и конвекции. В первом случае с уменьшением концентрации деполяризатора в амальгаме происходит сдвиг потенциала начала анодного растворения в область отрицательных значений, а также уменьшение скорости электродного процесса, что можно объяснить малой скоростью диффузии атомов олова к поверхности амальгамы и образованием пассивной пленки на электроде. Во втором случае скорость электродной реакции заметно увеличивается.

Оптимальным содержанием олова в амальгаме является 0,3 – 20 вес. %, поскольку амальгама с концентрацией выше 20 % трудно перемешивается, а

использование амальгам с содержанием олова ниже 0,3 % становится неудобным из-за обеднения активного электрода в процессе электролиза.

На основании кривых анодной поляризации (рис. 1) ртути и амальгам, содержащих 0,31; 0,54; 1,17; 1,57; 1,94; 10 и 20 % олова, можно заключить, что скорость электродного процесса на фоне кислот и оснований (HCl , H_2SO_4 , HClO_4 , H_3PO_4 , CH_3COOH , NaOH , KOH , NH_4OH) возрастает с увеличением концентрации кислоты или основания. В 0,01; 0,1; 1 и 4 моль/дм³ растворах HCl , H_2SO_4 , HClO_4 и H_3PO_4 электрохимическое растворение амальгамы олова происходит независимо от состава электролита в диапазоне потенциалов: $-0,45 \div -0,2$; $-0,5 \div -0,3$; $-0,5 \div -0,4$ и $-0,55 \div -0,45$ В при плотности тока $< 3,5$; 20; 20 и 20 мА/см² соответственно.

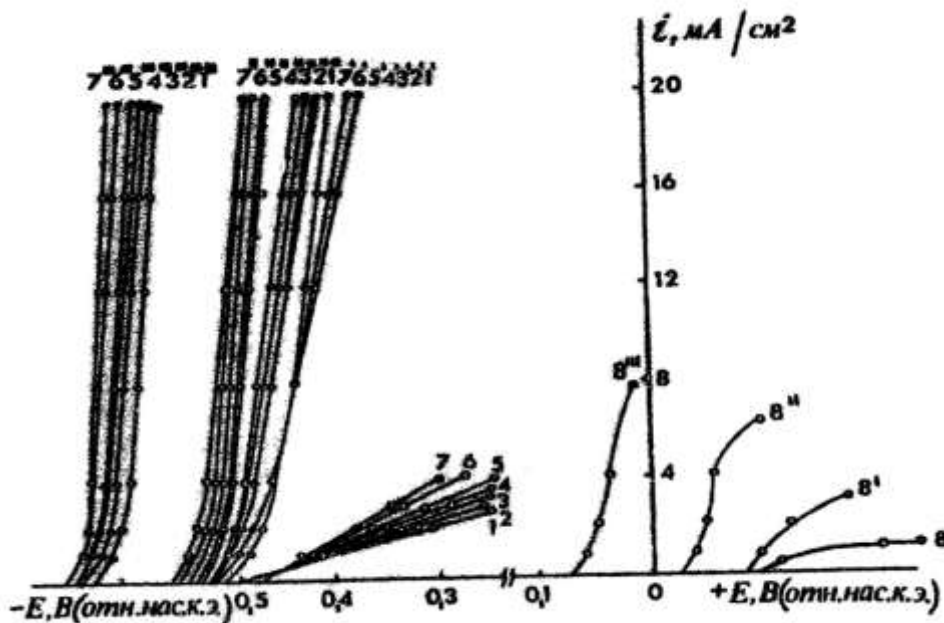


Рис. 1 – Кривые анодной поляризации амальгам ртути в растворах хлороводородной кислоты: 1, 1', 1'', 1''' – амальгама 0,31 %; 2, 2', 2'', 2''' – 0,54 %; 3, 3', 3'', 3''' – 1,17 %; 4, 4', 4'', 4''' – 1,57 %; 5, 5', 5'', 5''' – 1,94 %; 6, 6', 6'', 6''' – 10 %; 7, 7', 7'', 7''' – 20 % олова в ртути на фоне 0,01; 0,1; 1,0 и 4,0 моль/дм³ HCl , соответственно; 8, 8', 8'', 8''' – ртуть на фоне 0,01; 0,1; 1,0 и 4,0 моль/дм³ HCl , соответственно.

Анодное растворение амальгамы в растворах уксусной кислоты тех же концентраций происходит при потенциалах $-0,42 \div -0,27$; $-0,44 \div -0,28$; $-0,46 \div -0,30$ и $-0,49 \div -0,35$ В, но при меньших плотностях тока: $< 0,15$; 1; 2 и 3 мА/см² соответственно.

Электрохимическое растворение амальгамы в растворах щелочей (кроме NH_4OH) указанных выше концентраций происходит в диапазоне потенциалов $-0,95 \div -0,65$; $-1,08 \div -0,76$; $-1,16 \div -1,0$; $-1,23 \div -1,13$ В при плотностях тока < 2 ; 14; 20 и 20 мА/см² соответственно.

Электрогенерация олова (II) на фоне гидроксида аммония возможна лишь в > 1 моль/дм³ его растворах при тех же потенциалах, но при плотности тока $< 1,4$ мА/см².

Анодное растворение ртути наблюдается в основном (кроме щелочной среды и 4 моль/дм³ раствора хлороводородной кислоты) в положительной области потенциалов.

Резюмируя результаты вольт-амперных исследований можно отметить, что с уменьшением концентрации кислот и оснований, независимо от их состава, происходит смещение потенциалов исследуемых амальгам в сторону менее отрицательных значений, что, по-видимому, связано с ограничением скорости диффузии атомов олова и пассивацией электрода. Меньшим перенапряжением при анодном растворении обладают амальгамы олова на фоне 0,1; 1 и 4 моль/дм³ растворов кислот и оснований.

Дальнейшее уменьшение кислотности или щелочности фона приводит к пассивации амальгам и резкому снижению скорости анодного растворения.

На основании вольт-амперных кривых рассчитан выход по току олова (II) при использовании внешнего источника тока.

100 %-ный выход по току из амальгамного генераторного электрода наблюдается в интервале потенциалов $-0,6 \div -0,3$ В при плотности тока $< 3,5; 20; 20$ и 20 мА/см² в 0,01; 0,1; 1 и 4 моль/дм³ растворах HCl, H₂SO₄, HClO₄ и H₃PO₄, соответственно, а также на фонах NaOH и KOH тех же концентраций при потенциалах $-1,2 \div -0,7$ В и плотности тока 2; 14; 20 и 20 мА/см².

Список литературы:

1. Багоцкий В.С., Основы электрохимии., Москва, Химия, 1988.

В. Н. Басов д.х.н., О. И. Бахирева к.х.н., В. В. Вольхин д.х.н., Л. С. Пан к.х.н.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
химико-технологический факультет
кафедра химии и биотехнологии
Россия, г. Пермь
bahirevy@mail.ru

СИНТЕЗ СОРБЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЕРМИКУЛИТА И МИКРООРГАНИЗМОВ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИОНОВ И РАДИОНУКЛИДОВ СТРОНЦИЯ

Рассмотрена возможность создания сорбционных материалов на основе природного минерала вермикулита и культуры микроорганизмов, способной поглощать ионы стронция из водных растворов. Исследованы условия применения полученных биосорбентов для очистки растворов от ионов стронция в повторяющихся циклах сорбция – десорбция – регенерация.

Ключевые слова: сорбционные материалы, биосорбенты, сорбция, десорбция, регенерация.

Широкое применение радиоактивных элементов в современной технике, несмотря на все меры, связанные с радиационной безопасностью, приводило и приводит к попаданию радионуклидов в окружающую среду, что требует проведения мероприятий по очистке воды, дезактивации территорий и объектов. К наиболее важным, с точки зрения очистки, радионуклидам, определяющим радиационную обстановку на длительный срок, чаще всего относят ^{90}Sr и ^{137}Cs . Их источником являются предприятия атомной энергетики. Только на предприятиях Минатома России (ПО «Маяк», Сибирский химический комбинат, Красноярский горно-химический комбинат) сосредоточены 600 млн. м³ РАО с суммарной активностью 1,5 млрд. Ки.

Известны методы извлечения ионов и радионуклидов стронция из производственных растворов и природных вод, такие как осаждение, соосаждение, поглощение, экстракция, ионный обмен. Применение этих методов затруднено присутствием в воде ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , которые являются конкурирующими с ионами Sr^{2+} , поэтому возникает необходимость освоения новых методов, в том числе и биохимических [6,7].

Целью настоящей работы является синтез биосорбентов, позволяющих извлекать ионы стронция из растворов, работающих в многократно повторяющихся циклах сорбции-десорбции-регенерации. В ходе работы были выделены микроорганизмы, способные поглощать стронций, исследована динамика роста полученной культуры в присутствии различных концентраций стронция, изучена возможность создания и использования биосорбентов на основе вермикулита.

Иннокулятом для выделения чистых культур микроорганизмов являлась проба воды, взятая из источника, где предположительно могли содержаться соли стронция.

Накопительную и чистую культуры получали, руководствуясь стандартными методиками [1]. В качестве твердой и жидкой питательных сред использовали мясопептонный агар (МПА) и мясопептонный бульон (МПБ) соответственно. Для определения оптимальной концентрации стронция готовили жидкие питательные

среды с концентрациями Sr^{2+} 0,01; 0,1; 1 и 10 г/л. Наращивание биомассы проводили при 28°C на орбитальных шейкерах со скоростью 128 об/мин. Прирост биомассы фиксировали по увеличению оптической плотности (D) на спектрофотометре КФК-2 при $\lambda=690$ нм. Для сравнения интенсивности роста микроорганизмов в присутствии разных концентраций Sr^{2+} строили кривые роста в координатах $\text{LnD} - t$, мин. Измерение остаточной концентрации ионов стронция в культуральной жидкости проводили на атомно-адсорбционном спектрофотометре ААС-30.

В качестве исходного сорбционного материала использовали Вермикулит - природный, нетоксичный материал, производится в специальных печах путём обжига природного минерала. Свойства вермикулита вспученного:

1. Химический состав: SiO_2 (39-42%), Al_2O_3 (11-13%), MgO (12-16%), CaO (1,5-2,5%), K_2O (3-6%), Fe_2O_3 (6-8%), $\text{PH}(\text{H}_2\text{O})$ (10-12%), Другие(0,5-2%)
2. Емкость водопоглощения - до 400%;
3. Инертный, химически и биологически стойкий;
4. Не содержит тяжелых металлов;
5. Температура плавления - 1350 °С;
6. Диапазон рабочих температур: от -260°C до +1200°C;
7. Коэффициент звукопоглощения 0,7-0,8

Вермикулит является новым видом минерального сырья, имеющим важное экологическое значение. Это минерал, образовавшийся в результате природных процессов гидратизации и других изменений магнезиально-железистых слюд (флогопита и биотита). Процесс преобразования этих слюд в вермикулит заключается почти в полном выносе щелочей, переходе закисных соединений железа в окисные и резком увеличении количества воды. Основным и наиболее ценным свойством вермикулита является способность его при прокаливании резко и необыкновенно сильно увеличивать свой объем в 10-20 раз. Это явление объясняется тем, что при прокаливании молекулярная вода в чешуйках и пачках вермикулита превращается в пар, под напором которого раздвигаются листочки слюды всегда в одном направлении, перпендикулярном спайности слюды. Вспученный таким образом вермикулит при охлаждении сохраняет приобретенный им объем с тончайшими прокладками воздуха взамен водяного пара между листочками слюды, что и придает минералу многие его ценные свойства. Обожженные массы вермикулита характеризуются повышенной огнестойкостью, высокой звукопоглощающей способностью, низкой теплопроводностью. Вермикулит химически почти инертный материал. Он обладает высокой кроющей способностью, хорошо сопротивляется выветриванию, не конденсирует влагу, характеризуется малым коэффициентом температурного расширения.

В настоящее время вермикулит применяется для очистки сточных вод от нефтепродуктов, как катализатор при переработке нефти, в качестве промышленного сорбента высокорadioактивных радия-137 и стронция-90 из отходов ядерных предприятий, смягчения воды и др.[3,4].

Предварительно вермикулит подготовили к работе: простерилизовали, промыли водой и высушили на воздухе.

Процесс адсорбционной иммобилизации проводили методом перемешивания, который заключается в том, что контакт адсорбента с суспензией клеток в культуральной среде происходит при непрерывном перемешивании в течение нескольких часов. Перемешивание осуществляли на орбитальных шейкерах со скоростью 128 об/мин. Далее биосорбент промывали несколько раз средой, в которой были суспендированы клетки, после чего биосорбент готов к употреблению [5].

Культивирование микроорганизмов на средах с различным содержанием Sr^{2+} показало, что присутствие в питательной среде высоких концентраций стронция (10 г/л) является губительным для микроорганизмов. Наиболее активно росли микроорганизмы при концентрациях Sr^{2+} в питательной среде 0,01 и 0,1 г/л.

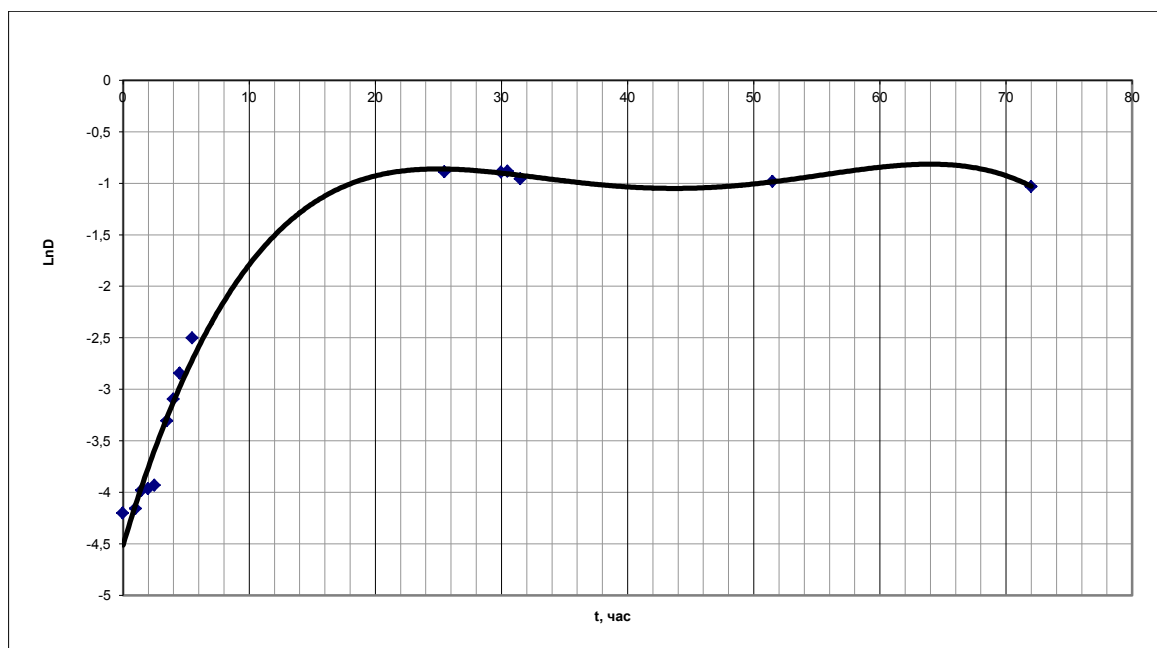


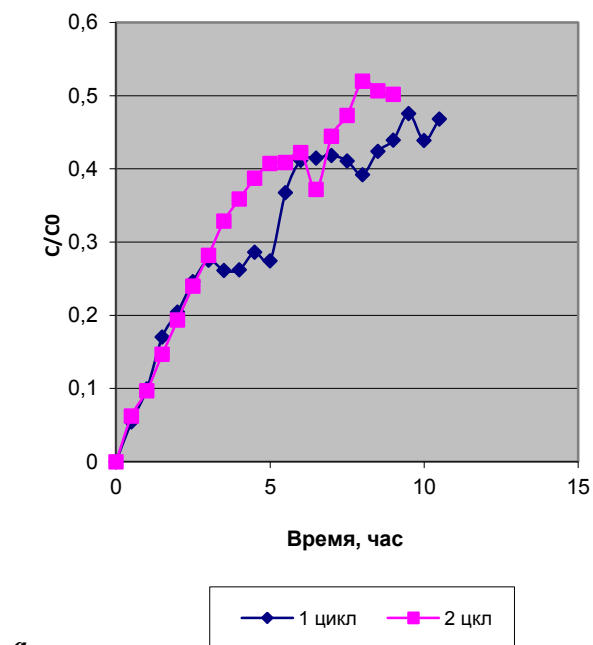
Рис.1 – Кинетическая кривая роста микроорганизмов при концентрации ионов стронция 0,1 г/л.

Зависимость, представленная на рис. 1 отражает динамику роста полученной культуры. Из графика видно, что продолжительность основных фаз бактериального роста составляет: лаг-фаза – от 0 до 3 часов; экспоненциальная фаза – от 3 до 8 часов; фаза замедления роста – от 8 до 26 часов; стационарная фаза – от 26 часов и более.

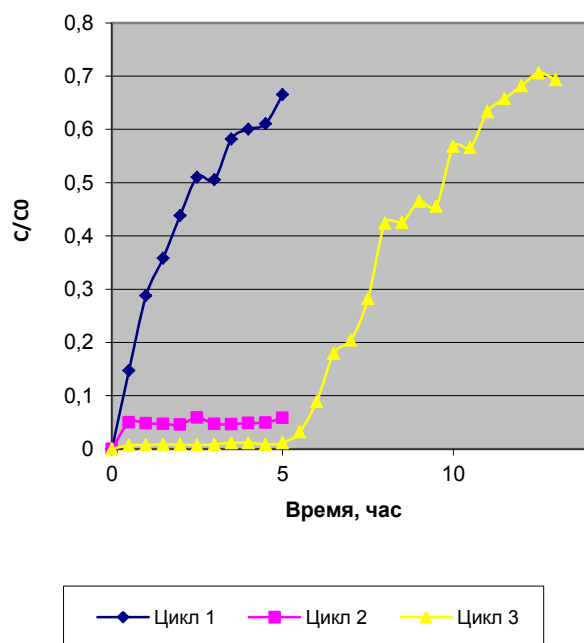
В динамических условиях исследована сорбционная способность вермикулита и биовермикулита. Полученные данные показывают, что изученные сорбенты поглощают ионы стронция. При этом иммобилизация клеток микроорганизмов на природный носитель приводит к увеличению величины его обменной емкости. В динамических условиях проведена десорбция ионов стронция с вермикулита и биовермикулита. По результатам десорбции, которую проводили 0,2 М HNO_3 , видно, что ионы стронция практически полностью десорбируются как с вермикулита, так и с биовермикулита, что предоставляет возможность проводить регенерацию после десорбции и использовать сорбент в следующем цикле.

Исследованы сорбционные свойства вермикулита и биовермикулита при работе в циклах сорбции-десорбции-регенерации.

На Рис. 2 приведены выходные кривые сорбции, при анализе которых видно, что при переходе к каждому последующему циклу емкость биосорбента возрастает.



а



б

**Рис. 2 – Выходные кривые сорбции ионов Sr^{2+} :
а – вермикулит, б – биовермикулит.**

Например, емкость биовермикулита в 3-ем цикле работы возросла в 6 раз по сравнению с 1-м циклом (Рис.3). Этого не происходит в случае применения вермикулита без участия микроорганизмов. Очевидно, микроорганизмы используют в качестве элементов питания обменные ионы, содержащиеся в межплоскостных пространствах вермикулита в 1-м цикле. Во втором и последующих циклах, при отсутствии этих ионов, микроорганизмы поглощают ионы стронция.

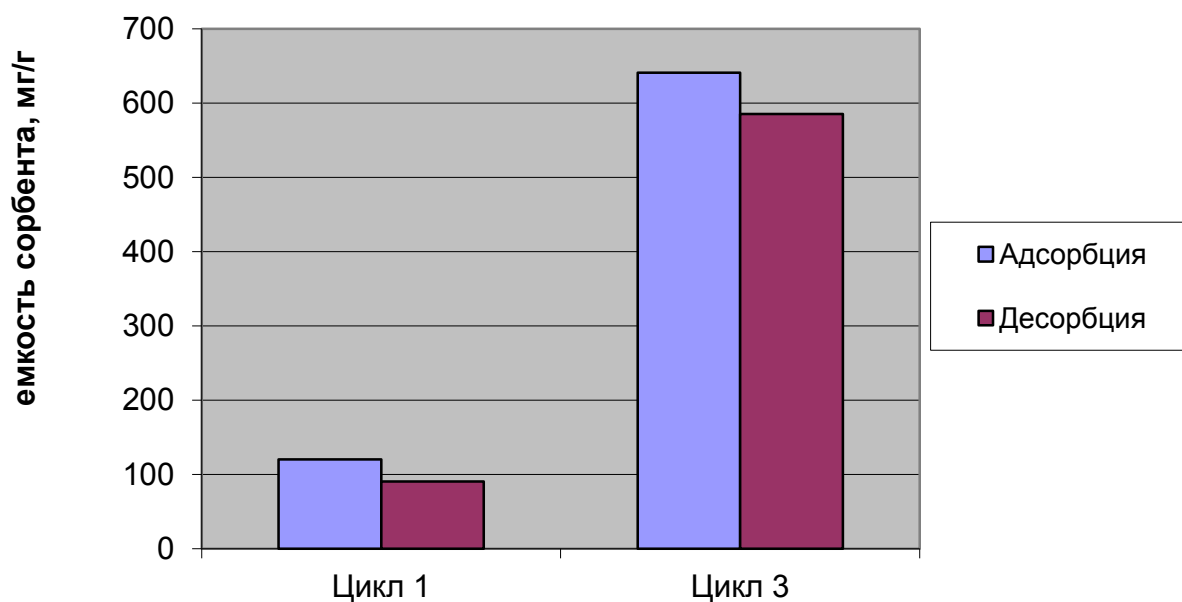


Рис. 3 Емкостные характеристики биовермикулита.

Такие свойства вермикулита позволяют использовать его как носитель для создания биосорбентов и их применения в непрерывных циклах очистки стоков от ионов стронция.

Список литературы:

1. *Егоров Н. С.* Практикум по микробиологии. Издательство московского университета, 1976г.
2. *Лебедев В.Н.* Очистка жидких радиоактивных отходов / В.Н. Лебедев //Радиохимия. 2003. Т. 45. № 2. С. 140-141.
3. *Ратько А. И.* Сорбция ^{137}Cs и ^{90}Sr модифицированными сорбентами на основе клиноптилолита / А. И. Ратько, А. С. Панасюгин // Радиохимия. 1996. Т. 38. Вып. С 66-68.
4. *Самонин В.В.* Изучение закономерностей адсорбции бактериальных клеток на пористых носителях / В.В. Самонин, Е.Е. Еликова // Микробиология. 2004. Т. 73. № 6. С. 810-816.
5. *Синицын А.П.* Имобилизованные клетки микроорганизмов. / Синицын А.П., Райнина Е.И., Лозинский В.И., Спасов С.Д. - М.: Изд-во МГУ, 1994. - 288 с.
6. *Balarama Krishna M.V.* Removal of ^{137}Cs and ^{90}Sr from actual low level radioactive waste solutions using moss as a phyto-sorbent / M.V. Balarama Krishna, S.V. Rao, J. Arunachalam, M.S. Murali, Surendra Kumar, V.K. Manchanda // Separation and Purification Technology. 2004. V 38. P. 149–161
7. *Chakraborty Dipjyoti.* Biosorption of cesium-137 and strontium-90 by mucilaginous seeds of *Ocimum basilicum* / Dipjyoti Chakraborty, Samir Maji, Abhijit Bandyopadhyay, Sukalyan Basu // Bioresource Technology. 2007. V 98. P. 2949–2952.

Л. Х. Абдулхаликова

Оренбургский государственный педагогический университет
физико-математический факультет
кафедра математического анализа и методики преподавания математики
Россия, г. Оренбург
radlira@mail.ru

РЕШЕНИЕ ОДНОЙ ЗАДАЧИ ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В статье обобщены точные методы решения задач термоупругости для многослойных конструкций. Для решения нестационарной задачи теплопроводности для двухслойного полого цилиндра с граничными условиями 4-го рода на поверхности контакта слоев и неоднородными несимметричными граничными условиями 3-го рода на внешних границах использован метод конечных интегральных преобразований.

Ключевые слова: термонапряжения, перемещения, многослойная конструкция.

Необходимость моделирования процессов формирования полей термонапряжений и остаточных напряжений при производстве полимерных изделий продиктована тем, что все расчетные методы (а именно они дают возможность спрогнозировать заранее уровень термонапряжений в изделии и, тем самым, оценить конкретный технологический процесс) базируются на модельном представлении исследуемой среды. Рассмотрим пример решения задачи термоупругости, используемой при моделировании температурных полей и полей термонапряжений элементарных областей пресс-формы при производстве, например, лонжеронов лопастей для вертолетов.

Процесс изготовления лонжерона методом полимеризации из многослойного композиционного материала (МКМ) в пресс-форме состоит из трех этапов. На первых двух стадиях процесса полимеризации происходит прогрев конструкции до температуры полимеризации и последующее отверждение МКМ. На третьей стадии процесса происходит охлаждение изделия вместе с технологической оснасткой до температуры окружающей среды. С завершением процесса отверждения изделия, его рассматриваем как сплошное твердое тело. Поэтому на 3-ем этапе технологического процесса решается задача термоупругости для двухслойного полого цилиндра (исследуются термонапряжения, которые вызываются особенностями механических и теплофизических свойств, взаимодействием ограничительной (формирующей) технологической оснасткой)

Постановка задачи по радиальной схеме в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\frac{d^2 \sigma_{ri}}{dr_i^2} + \frac{3}{r_i} \frac{d\sigma_{ri}}{dr_i} = -\frac{\chi_i}{r_i} \frac{dT_i}{dr}, \quad R_{i-1} \leq r_i \leq R_i, \quad i = 1, 2; \quad (1)$$

$$\sigma_{r1}|_{r=R_0} = 0, \quad \sigma_{r2}|_{r=R_2} = 0; \quad (2)$$

$$\sigma_{r1}|_{r=R_1} = \sigma_{r2}|_{r=R_1}; \quad (3)$$

$$U_1|_{r=R_1} = U_2|_{r=R_1}; \quad (4)$$

где r_i – пространственная координата, t – время, $\sigma_{ri}(r_i, t)$, $U_i(r_i, t)$, $T_i(r_i, t)$ – соответственно нормальное напряжение в радиальном направлении, радиальное перемещение, температурное поле i -й области; E_i , ν_i , α_i – соответственно модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент теплового расширения вещества i -й области, $\chi_i = (E_i \alpha_i) / (1 - \nu_i)$.

Интегрирование системы (1) приводит к следующим соотношениям для определения радиальных напряжений и перемещений [1, 2]:

$$\sigma_{ri} = -\chi_i \frac{1}{r_i^2} \int_{R_{i-1}}^{r_i} T_i(r_i, t) r_i dr_i + \varphi_i C_{1i} - \gamma_i \frac{C_{2i}}{r_i^2}, \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

$$U_i = \psi_i \frac{1}{r_i} \int_{R_{i-1}}^{r_i} T_i(r_i, t) r_i dr_i + r_i C_{1i} + \frac{C_{2i}}{r_i}, \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

где $\varphi_i = \frac{E_i}{(1 + \nu_i)(1 - 2\nu_i)}$, $\gamma_i = \frac{E_i}{1 + \nu_i}$, $\psi_i = \frac{\alpha_i(1 + \nu_i)}{1 - \nu_i}$ и C_{1i} , C_{2i} ($i=1, 2$) – постоянные интегрирования, определяемые из граничных и начальных условий и условий сопряжения (2)–(4).

Подставляя (5)–(6) в (2)–(4), для определения C_{1i} , C_{2i} получим следующую систему алгебраических линейных уравнений

$$\varphi_1 C_{11} - \frac{\gamma_1}{R_0^2} C_{21} = 0;$$

$$\varphi_1 C_{11} - \frac{\gamma_1}{R_1^2} C_{21} - \varphi_2 C_{12} + \frac{\gamma_2}{R_1^2} C_{22} - \frac{\chi_1}{R_1^2} A_1 = 0;$$

$$R_1 C_{11} + \frac{1}{R_1} C_{21} - R_1 C_{12} - \frac{1}{R_1} C_{22} + \frac{\psi_1}{R_1} A_1 = 0;$$

$$\varphi_2 C_{12} - \frac{\gamma_2}{R_2^2} C_{22} - \frac{\chi_2}{R_2^2} A_2 = 0,$$

$$\text{где } A_i = \int_{R_{i-1}}^{R_i} T_i(r_i, t) r_i dr_i, \quad i=1, 2.$$

Температурное поле $T_i(r_i, t)$ на стадии охлаждения моделируется решением нестационарной задачи теплопроводности для двухслойного полого цилиндра с граничными условиями 4-го рода на поверхности контакта слоев и неоднородными несимметричными граничными условиями 3-го рода на внешних границах. В приводимой постановке задача записывается в следующем виде:

$$\frac{\partial T_i(r_i, \tau)}{\partial \tau} = a_i^2 \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial r_i^2} + \frac{1}{r_i} \frac{\partial T_i}{\partial r_i} \right), \quad i = 1, 2, \quad R_{i-1} \leq r_i \leq R_i, \quad t > 0. \quad (7)$$

$$T_i(r_i, 0) = T_0; \quad (8)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(R_0, t)}{\partial r_1} - h_1 (T_1(R_0, t) - T_{c1}) = 0; \quad (9)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(R_2, t)}{\partial r_2} - h_2(T_2(R_2, t) - T_{c2}) = 0; \quad (10)$$

$$T_1(R_1, t) = T_2(R_1, t); \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1(R_1, t)}{\partial r_1} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(R_1, t)}{\partial r_2}. \quad (11)$$

где a_i, λ_i – соответственно температуропроводности, теплопроводность вещества i -й области; h_1, h_2 – коэффициенты конвективной теплоотдачи от внешних поверхностей в окружающую среду, T_0 – начальная температура, T_{c1}, T_{c2} – температура окружающей среды.

Решение задачи (7)–(11) с неоднородными граничными условиями ищем в виде суммы стационарной и нестационарной составляющих:

$$T_i(r_i, t) = S_i(r_i) + P_i(r_i, t), \quad i = 1, 2.$$

Где $S_i(r_i)$ – решение стационарной задачи с неоднородными граничными условиями

$$\frac{\partial^2 S_i(r_i)}{\partial r_i^2} + \frac{1}{r_i} \frac{\partial S_i}{\partial r_i} = 0, \quad i = 1, 2, \quad R_{i-1} \leq r_i \leq R_i, \quad (12)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial S_1(R_0)}{\partial r_1} - h_1(S_1(R_0) - T_{c1}) = 0; \quad (13)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial S_2(R_2)}{\partial r_2} - h_2(S_2(R_2) - T_{c2}) = 0; \quad (14)$$

$$S_1(R_1) = S_2(R_1); \quad \lambda_1 \frac{\partial S_1(R_1)}{\partial r_1} = \lambda_2 \frac{\partial S_2(R_1)}{\partial r_2}. \quad (15)$$

Решение задачи (12)–(15) имеет вид: $S_i(r_i) = A_i + B_i \ln(r_i)$, где

$$A_1 = T_{c1} - B_1 \left(\ln(R_0) - \frac{\lambda_1}{h_1 R_0} \right); \quad B_1 = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{\ln\left(\frac{R_1}{R_0}\right) + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) + \lambda_1 \left(\frac{1}{R_2 h_2} + \frac{1}{R_0 h_1} \right)};$$

$$B_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} B_1; \quad A_2 = A_1 + B_1 \ln(R_1) \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right).$$

$P_i(r_i, t)$ – решение нестационарной задачи с однородными граничными условиями:

$$\frac{\partial P_i(r_i, t)}{\partial t} = a_i^2 \left(\frac{\partial^2 P_i}{\partial r_i^2} + \frac{1}{r_i} \frac{\partial P_i}{\partial r_i} \right), \quad i = 1, 2, \quad R_{i-1} \leq r_i \leq R_i, \quad t > 0. \quad (16)$$

$$P_i(r_i, 0) = T_0 - S_i(r_i); \quad (17)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial P_1(R_0, t)}{\partial r_1} - h_1 P_1(R_0, t) = 0; \quad (18)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial P_2(R_2, t)}{\partial r_2} + h_2 P_2(R_2, t) = 0; \quad (19)$$

$$P_1(R_1, t) = P_2(R_1, t); \quad \lambda_1 \frac{\partial P_1(R_1, t)}{\partial r_1} = \lambda_2 \frac{\partial P_2(R_1, t)}{\partial r_2}. \quad (20)$$

Решение задачи (16)–(20) может быть получено методом конечных интегральных преобразований [3]. Для перехода к изображениям используется формула:

$$U(\mu, t) = \sum_{m=1}^2 \frac{\lambda_m}{a_m^2} \int_{R_{m-1}}^{R_m} r_m P_m(r_m, t) W_m(r_m, \mu) dr_m,$$

где $W_m(r_m, \mu) = C_{m,n} J_0\left(\frac{\mu_n r_m}{a_m}\right) + D_{m,n} Y_0\left(\frac{\mu_n r_m}{a_m}\right) -$ ядро интегрального

преобразования, определяемое из задачи Штурма-Лиувилля с соответствующими однородными граничными условиями с точностью до постоянного множителя.

Обратный переход осуществляется по формуле:

$$P_m(r_m, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U(\mu_n, t) W_m(r_m, \mu_n)}{Z_{m,n}}.$$

Решение задачи (7)–(11) примет вид:

$$T_i(r_i, t) = A_i + B_i \ln(r_i) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{Z_{m,n}} \left(C_{i,n} J_0\left(\frac{\mu_n r_i}{a_i}\right) + D_{i,n} Y_0\left(\frac{\mu_n r_i}{a_i}\right) \right) \times \\ \times e^{-\mu_n^2 t} \sum_{m=1}^2 \frac{\lambda_m}{a_m^2} \int_{R_{m-1}}^{R_m} r_m (T_0 - A_m - B_m \ln(r_m)) \times \left(C_{i,n} J_0\left(\frac{\mu_n r_m}{a_m}\right) + D_{i,n} Y_0\left(\frac{\mu_n r_m}{a_m}\right) \right) dr_m,$$

где J_0, J_1, Y_0, Y_1 – функции Бесселя первого и второго рода, нулевого и первого порядка соответственно,

$$C_{1,n} = 1, D_{1,n} = \frac{\frac{\lambda_1 \mu_n}{a_1} J_1\left(\frac{\mu_n R_0}{a_1}\right) - h_1 J_0\left(\frac{\mu_n R_0}{a_1}\right)}{h_1 Y_0\left(\frac{\mu_n R_0}{a_1}\right) - \frac{\lambda_1 \mu_n}{a_1} Y_1\left(\frac{\mu_n R_0}{a_1}\right)},$$

$$C_{2,n} = \frac{C_{1,n} J_0\left(\frac{\mu_n R_1}{a_1}\right) + D_{1,n} Y_0\left(\frac{\mu_n R_1}{a_1}\right) - D_{2,n} J_0\left(\frac{\mu_n R_1}{a_2}\right)}{J_0\left(\frac{\mu_n R_1}{a_2}\right)},$$

$$D_{2,n} = \frac{\frac{\lambda_1 a_2}{\lambda_2 a_1} J_0\left(\frac{\mu_n R_1}{a_2}\right) \left(C_{1,n} J_1\left(\frac{\mu_n R_1}{a_1}\right) + D_{1,n} Y_1\left(\frac{\mu_n R_1}{a_1}\right) \right) - J_1\left(\frac{\mu_n R_1}{a_2}\right) \left(C_{1,n} J_0\left(\frac{\mu_n R_1}{a_1}\right) + D_{1,n} Y_0\left(\frac{\mu_n R_1}{a_1}\right) \right)}{J_0\left(\frac{\mu_n R_1}{a_2}\right) Y_1\left(\frac{\mu_n R_1}{a_2}\right) - J_1\left(\frac{\mu_n R_1}{a_2}\right) Y_0\left(\frac{\mu_n R_1}{a_2}\right)}$$

$$Z_{m,n} = \sum_{m=1}^2 \frac{\lambda_m}{a_m^2} \int_{R_{m-1}}^{R_m} r_m W_m^2(r_m, \mu_n) dr_m = \sum_{m=1}^2 \frac{\lambda_m}{a_m^2} \left(\frac{R_m^2 C_{m,n}^2}{2} \left(J_0^2\left(\frac{\mu_n R_m}{a_m}\right) + J_1^2\left(\frac{\mu_n R_m}{a_m}\right) \right) + \right. \\ \left. + R_m^2 C_{m,n} D_{m,n} \left(J_0\left(\frac{\mu_n R_m}{a_m}\right) Y_0\left(\frac{\mu_n R_m}{a_m}\right) + J_1\left(\frac{\mu_n R_m}{a_m}\right) Y_1\left(\frac{\mu_n R_m}{a_m}\right) \right) + \right. \\ \left. + \frac{R_m^2 D_{m,n}^2}{2} \left(Y_0^2\left(\frac{\mu_n R_m}{a_m}\right) + Y_1^2\left(\frac{\mu_n R_m}{a_m}\right) \right) - \frac{R_{m-1}^2 C_{m,n}^2}{2} \left(J_0^2\left(\frac{\mu_n R_{m-1}}{a_m}\right) + J_1^2\left(\frac{\mu_n R_{m-1}}{a_m}\right) \right) - \right. \\ \left. - R_{m-1}^2 C_{m,n} D_{m,n} \left(J_1\left(\frac{\mu_n R_{m-1}}{a_m}\right) Y_1\left(\frac{\mu_n R_{m-1}}{a_m}\right) + J_1\left(\frac{\mu_n R_{m-1}}{a_m}\right) Y_1\left(\frac{\mu_n R_{m-1}}{a_m}\right) \right) - \right.$$

$$-\frac{R_{m-1}^2 D_{m,n}^2}{2} \left(Y_0^2 \left(\frac{\mu_n R_{m-1}}{a_m} \right) + Y_1^2 \left(\frac{\mu_n R_{m-1}}{a_m} \right) \right),$$

μ_n – n -ый положительный корень уравнения

$$C_2 \left(J_0 \left(\frac{\mu R_2}{a_2} \right) - \frac{\mu \lambda_2}{a_2 h_2} J_1 \left(\frac{\mu R_2}{a_2} \right) \right) + D_2 \left(Y_0 \left(\frac{\mu R_2}{a_2} \right) - \frac{\mu \lambda_2}{a_2 h_2} Y_1 \left(\frac{\mu R_2}{a_2} \right) \right) = 0.$$

Решение задачи может быть использовано для расчета нестационарных температурных полей и термонапряжений в многослойных цилиндрических изделиях, цилиндрических элементах аппаратов, конструкций и сооружений в цилиндрических образцах, у которых теплофизические параметры функционально зависят от температуры.

Список литературы:

1. Кудинов В.А., Карташов Э.М., Калашников В.В. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций: Учеб. пособие/ В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, В.В. Калашников. — М.: Высш. шк., 2005. — 430 с.
2. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости, перев. с англ/ С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. — Главная редакция физико-математической литературы из-ва «Наука», 1975. — 576 с.
3. Тюков Н.И., Акимов И.А., Акимов А.И. Теоретические и экспериментальные исследования теплофизических процессов изготовления изделий из композиционных материалов: монография/ Н.И. Тюков, И.А. Акимов, А.И. Акимов.— Уфа: РИО БашГУ, 2003.— 216 с.

А. П. Абызов к.т.н., О. И. Тарабарин д.т.н.

Камская государственная инженерно-экономическая академия
Россия, г. Набережные Челны
toil_kampi@rambler.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ В ВИДЕ ТРЕЩИН

Приводятся результаты комплексного исследования влияния дефектов конструктивных элементов деталей конструкций машин и трубопроводов в виде трещин на несущую способность. Получены аналитические формулы, позволяющие рассчитать коэффициенты трещиностойкости в зависимости от геометрических параметров трещины, а так же коэффициенты, определяемые протяженностью и направлением дефекта. Численные значения коэффициентов позволяют оценить влияние дефектов на прочностные характеристики конструктивных элементов.

Ключевые слова: трещина ; временное сопротивление материала; разрушающее напряжение.

1.Расчеты по критериям статической трещиностойкости

За количественный критерий сопротивления конструктивных элементов с трещинами при статическом нагружении принимается разрушающее напряжение в нетто-сечении плоского образца с боковой трещиной (Рис. 1.)

по ГОСТ 25.506-85.

$$\sigma_v^{TP} = \alpha_{тр} \cdot \sigma_v$$

где $\alpha_{тр}$ - параметр трещиностойкости стали ($\alpha_{тр} < 1,0$); σ_v - временное сопротивление стали. Параметр трещиностойкости $\alpha_{тр}$ определяется на плоских образцах с боковой трещиной (рис. 1) при фиксированной глубине h образцов из листового проката. Рекомендуется ширину b и длину l принимать равными соответственно: $b = 25\text{мм}$, $l=200\text{мм}$.

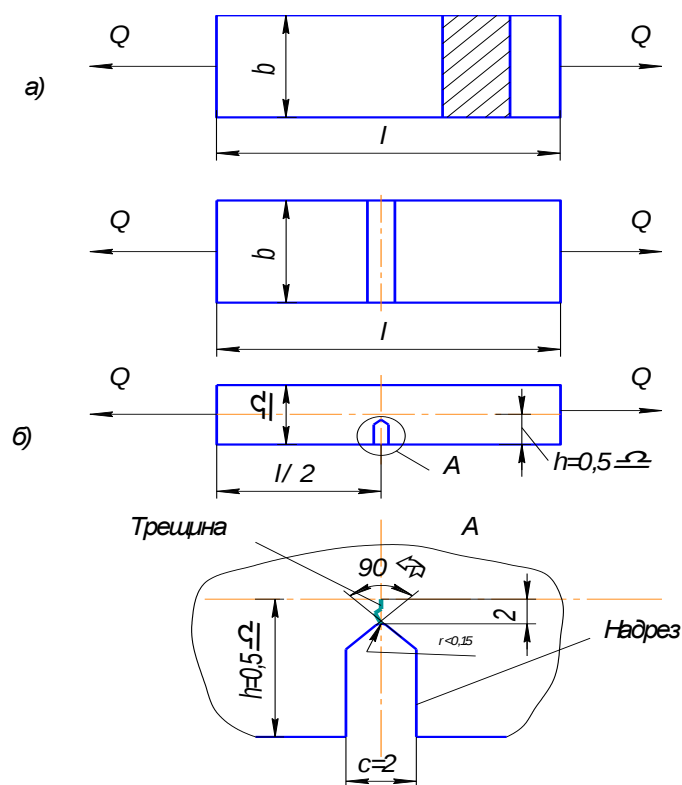


Рис. 1- Схемы образцов для испытаний на статическую прочность (а) и трещиностойкость (б).

При оценке технического состояния эксплуатирующегося оборудования образцы можно вырезать из конструктивных элементов, причем продольная ось должна совпадать с направлением действия максимальных напряжений. Затем на вырезанные заготовки фрезой наносятся острые v-образные надрезы.

Требования к испытаниям и испытательному оборудованию должны соответствовать ГОСТ 25.506-85, РД 39-0147103-387-87 и ГОСТ 699-66.

При испытаниях образцов фиксируется максимальная (разрушающая) нагрузка Q_c и параметр трещиностойкости $\alpha_{тр}$ определяется при $h=0,5\delta$ по соотношению

$$\alpha_{тр} = \frac{Q_c}{b \cdot \delta \cdot \sigma_B}, *$$

В случаях, когда глубина трещины h отличается от вышеуказанного значения, величина $\alpha_{тр}$ корректируется с использованием такой зависимости:

$$\alpha_{тр} = \frac{Q_c}{b \cdot \delta \cdot \sigma_B (1 - \bar{h})},$$

где $\bar{h} = h/\delta$ - относительная глубина трещин.

Зависимость параметра трещиностойкости от относительной глубины трещины приведена на рис. 2.

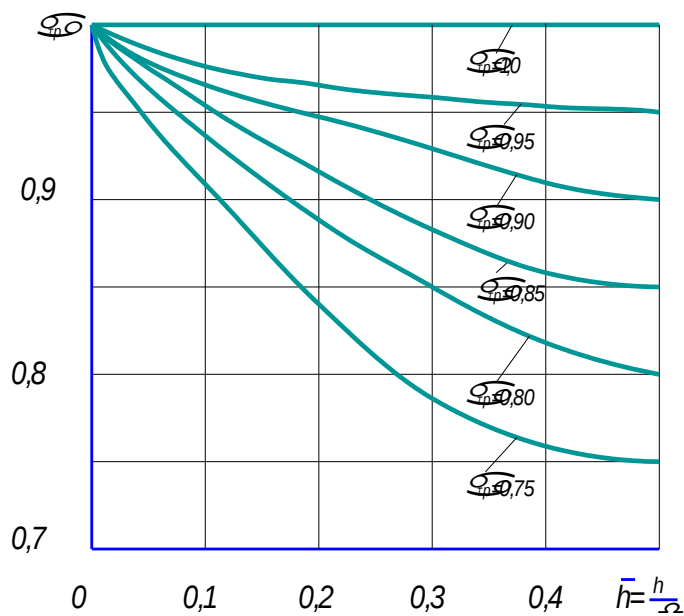


Рис. 2- Зависимость параметра трещиностойкости от относительной глубины трещины.

Параметр трещиностойкости характеризует чувствительность металла к острым концентраторам (трещинам) напряжений. Если $\alpha_{tr}=1,0$, то металл является не чувствительным к острым концентраторам напряжений при статическом растяжении, при этом разрушающее напряжение в нетто сечении образца равно временному сопротивлению σ_s . Чем меньше α_{tr} тем чувствительнее металл к острым концентраторам. Уменьшение параметра трещиностойкости свидетельствует о снижении разрушающих напряжений в нетто—сечении по сравнению с временным сопротивлением металла конструктивного элемента.

2. Определение предельных нагрузок конструктивных элементов оборудования с трещиноподобными дефектами.

Дадим классификацию трещин в элементах деталей машин.

Поверхностные трещины по ориентации к оси элемента разделим на продольные, кольцевые и наклонные (Рис.3, а, б, в). Кольцевые трещины в зависимости от расположения по радиусу разделим на наружные (1), двухсторонние (2) и внутренние (3).

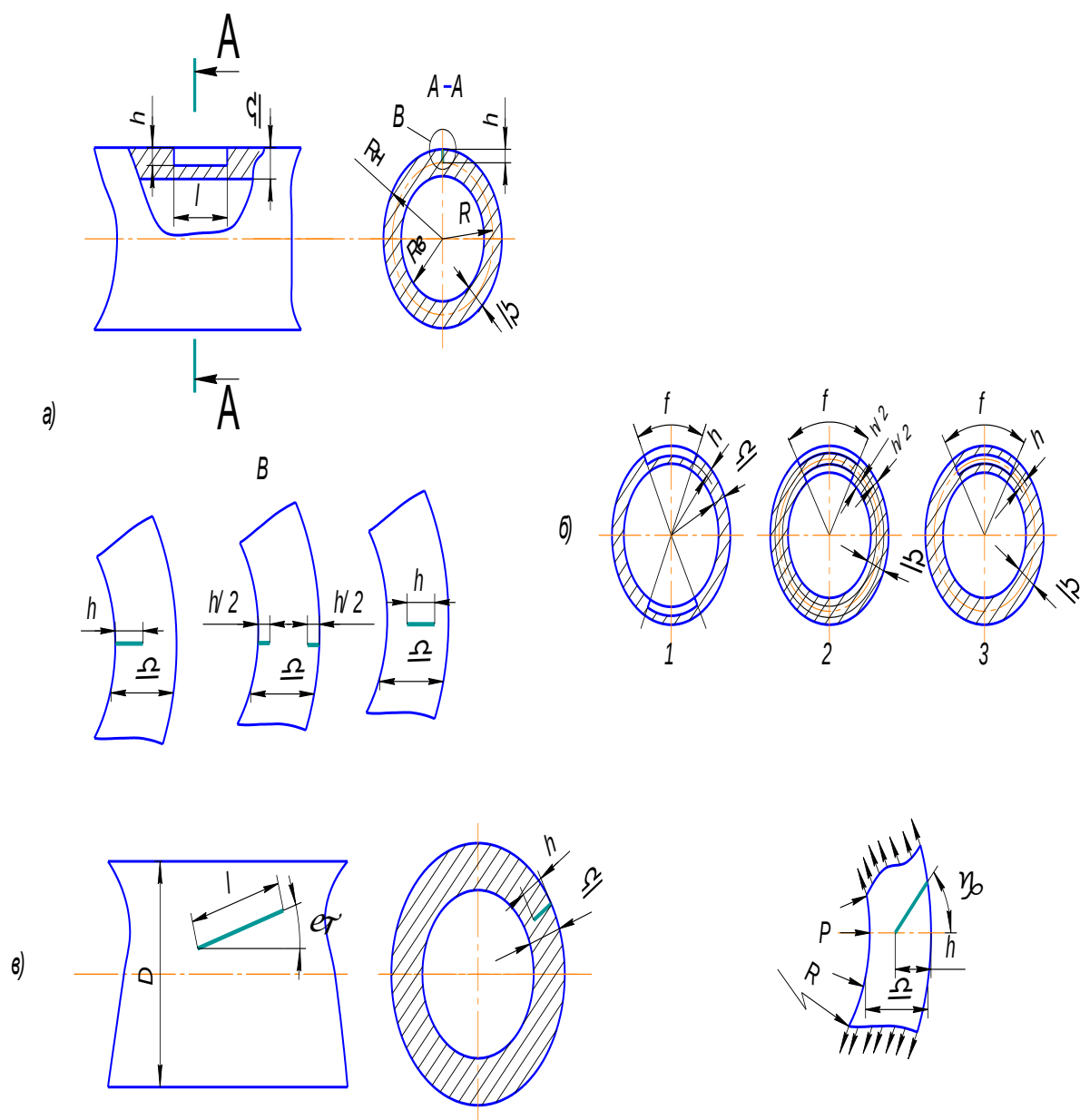


Рис.3- Поверхностные трещины
а) продольные; б) кольцевые; 1-наружные, 2-двухсторонние, 3- внутренние; в) наклонные

В общем случае разрушающее напряжение σ_{1c} конструктивного элемента под действием статической нагрузки определяется в соответствии с формулой (*), а также с учетом размеров и расположения трещины:

$$\sigma_{1c} = \alpha_{tp} \cdot K_h \cdot K_l \cdot K_\phi \cdot K_\gamma \cdot \sigma_b,$$

где K_h , - коэффициент, учитывающий степень ослабления рабочего сечения конструктивного элемента;

K_l - учитывает относительную длину трещин ;

K_ϕ - учитывает наклон трещины к продольной оси;

K_γ - учитывает наклон трещины к радиальному направлению.

Коэффициент степени ослабления элемента трещиной определяется по формуле

$$K_h = 1 - \bar{h},$$

где $\bar{h} = h/\delta$ – суммарная глубина трещины, отнесенная к толщине элемента.

Для сталей нечувствительных к трещинам ($\alpha_{тр} = 1$) несущая способность элементов прямо пропорционально снижается с увеличением $\bar{h}$. Чувствительные к трещинам стали обуславливают более резкое снижение σ_{1c} с увеличением степени ослабления элемента конструкции $\bar{h}$, что показано на рис 4.

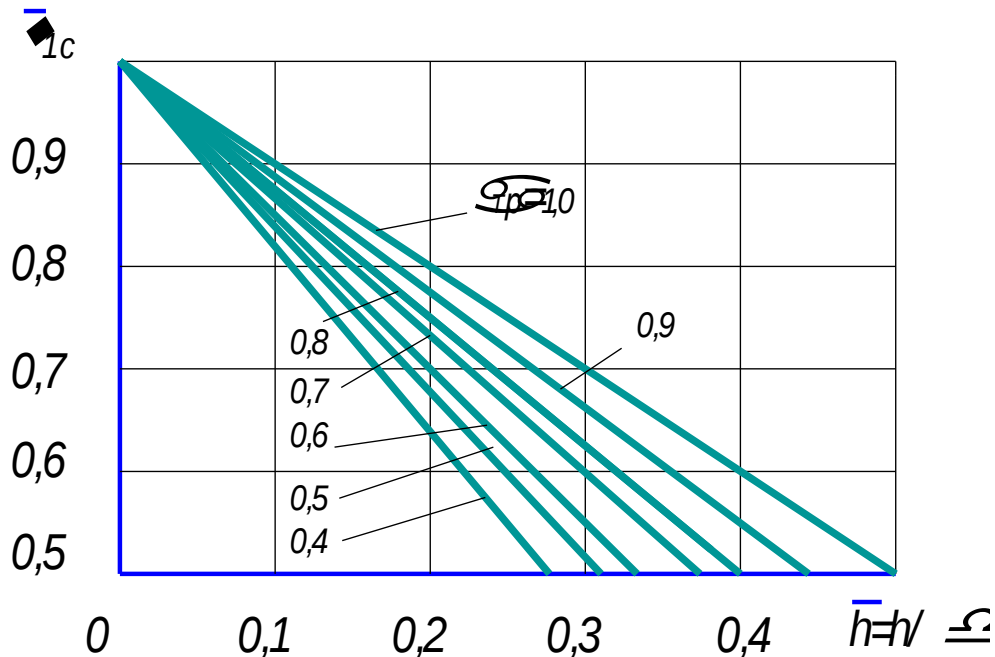


Рис. 4 - Зависимость относительного разрушающего напряжения $\bar{\sigma}_{1c} = \sigma_{1c} / \sigma_b$ от относительных размеров трещины при различных значениях трещиностойкости.

Влияние протяженности трещин на несущую способность оценивается коэффициентом K_l и для коротких трещин $\bar{l} = l/D < 1$, см.рис. 3, в) определяется по формуле; $K_l = (1 - \bar{l} \cdot \Gamma^a) / (1 - \bar{l})$

α – константа (при расчетах значение $\alpha \approx 0,3$).

Очевидно, что коэффициент K_l для коротких трещин больше единицы, что означает рост несущей способности конструктивного элемента.

Для кольцевых трещин вместо величины $\bar{l}$ необходимо подставлять значение

$$\bar{f} = f/2\pi \text{ (см. рис. 3, б).}$$

Коэффициент K_ϕ предлагается определять по формуле:

$$K_\phi = 1 + \bar{\phi}^b$$

где $\bar{\phi} = 2\phi/\pi$ – относительный угол наклона трещины к оси (см. рис. 3, в); b – константа ($b = 2,0$).

Коэффициент K_ϕ является фактором, упрочняющим конструктивный элемент. Для оценки влияния радиального наклона трещины (см. рис. 3, в) на несущую способность конструктивного элемента введен коэффициент K_γ , который предлагается определять по соотношению

$$K_\gamma = 1 + (1/\alpha_{тр}) \bar{\gamma}^c,$$

где $\bar{\gamma} = 2 \gamma / \pi$, c – константа (при расчетах значение $c = 7$).

Относительная прочность элементов конструкции должна удовлетворять условию:

$$\bar{\sigma}_1 c = \alpha_{\text{тр}} \cdot K_h \cdot K_l \cdot K_\varphi \cdot K_\gamma < 1.$$

Выводы:

- трещина снижает несущую способность конструктивных элементов из-за охрупчивания металла в окрестности ее вершины в зависимости от физико-механических свойств материала, которые определяются коэффициентом трещиностойкости;

- увеличение глубины трещины ослабляет сечение и учитывается посредством коэффициента K_h , который определяется геометрическими параметрами конструктивного элемента и трещины;

- в коротких трещинах ($\bar{l} < 1$) проявляется поддерживающий (упрочняющий) эффект, который способствует некоторому росту несущей способности конструктивных элементов (величина коэффициента $K_l > 1$);

- наклон короткой трещины по отношению к продольной оси (оценивается коэффициентом K_φ) и в радиальном направлении (оценивается коэффициентом K_γ) приводит к увеличению несущей способности.

Список литературы:

1. Механика разрушения на прочность материалов: Справочное пособие. Том 2. – К.: Наукова Думка, 1988. – 619с.

2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525с.

С. Н. Алехин к.т.н.

Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса
Россия, г. Шахты
alex_cn@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВИБРАЦИОННОГО ПОЛЯ ПОДВЕСНОЙ ЧАСТИ СТИРАЛЬНЫХ МАШИН

В статье рассматриваются вопросы оценки динамических характеристик стиральных машин путем определения параметров плоского вибрационного поля в произвольных поперечных плоскостях системы. Приведены схемы формирования вибрационного поля при линейных и угловых колебаниях подвесной части стиральных машин. Рассмотрены основы определения параметров вибрационного поля, характеризующие его форму и размеры.

Ключевые слова: вибрация стиральных машин, линейные и угловые колебания, вибрационное поле, амплитуды колебаний

Стиральные машины барабанного типа являются одними из наиболее виброактивных машин, используемых в быту и коммунальном хозяйстве. Возникающие значительные динамические воздействия при центробежном отжиме не только снижают надежность машин, но и, вызывая вибрации их корпуса и основания, приводят к неблагоприятным виброакустическим воздействиям на человека и колебаниям несущих строительных конструкций.

Поэтому, одной из основных задач, которые приходится решать при проектировании машин с динамическими нагрузками, в том числе, стиральных машин, является обеспечение минимальных воздействий, передаваемых на корпус машин. Для решения данной задачи необходимо знать динамические характеристики упруго подвешенного твердого тела (подвесной части стиральных машин), связанного с корпусом машины посредством упругих и диссипативных элементов. Одним из методов, позволяющим получить наиболее полное представление о динамических характеристиках твердого тела при его колебаниях, является исследование параметров вибрационного поля тела.

Следует отметить, что в известных работах, посвященных исследованию динамики стиральных машин, оценка их виброактивности проводится, в основном, по значениям проекций виброперемещений центра масс подвесной части на оси неподвижной системы координат. При этом вопросы, связанные с анализом линейных и угловых виброперемещений точек крепления упругих элементов и демпферов, практически являются неисследованными, что не позволяет дать более полную оценку динамических характеристик подвесной части и предложить на основании этого рекомендации по выбору рациональных параметров системы виброизоляции, обеспечивающих минимальные значения динамических воздействий, передаваемых на корпус и основание машины. В первую очередь это относится к выбору координат крепления и пространственной ориентации упругих и диссипативных элементов системы подвески, а также параметров противовесов, определяющих инерционные свойства системы.

Об анализе и синтезе вибрационного поля, используемого в теории колебаний, подробно сказано в работе [1]. Авторы данной работы определяют вибрационное поле как траекторию движения точек тела. Здесь же авторы указывают, что траекториями точек тела в общем случае являются эллипсы (в частности – прямые линии или окружности).

На рис.1 показано поперечное сечение твердого тела, имеющего форму цилиндра, совершающего поперечные круговые колебания.

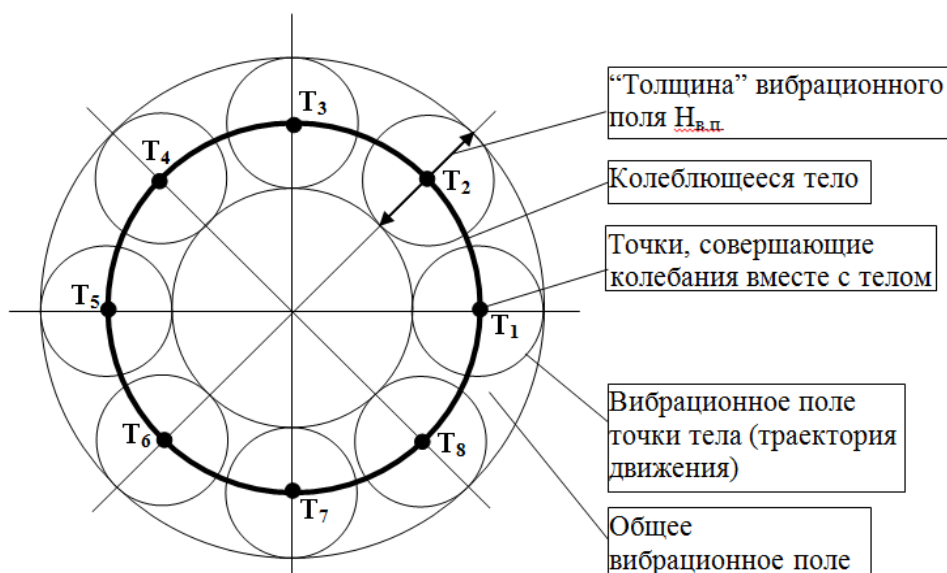


Рис. 1- Диаграмма плоского вибрационного поля твердого тела при его круговых колебаниях.

На внешней поверхности тела в данном сечении каждая точка “ T_i ” описывает при этом траекторию движения в виде окружности. Траектории движения точек “ T_i ”, показанные на рис.1 представляет собой, по существу, так называемую *универсальную диаграмму плоского поля траекторий* (УДП) движения точек, в данном случае, точек “ T_i ” [1].

Проведя огибающую линию по касательным к траекториям движения последовательно расположенных точек “ T_i ” тела можно получить представление об общем вибрационном поле тела в данном поперечном сечении.

Для анализа формирования вибрационного поля, образованного траекториями колебаний произвольных точек “ T_i ” подвесной части стиральных машин в поперечной плоскости, введем неподвижную плоскую прямоугольную систему координат $O_T Y_T Z_T$ таким образом, чтобы плоскость системы координат $O_T Y_T Z_T$ проходила через точки “ T_i ” и была параллельна поперечной плоскости $O\eta\zeta$ неподвижной системы координат $O\xi\eta\zeta$, а оси $O_T Y_T$ и $O_T Z_T$ параллельны осям $O\eta$ и $O\zeta$ соответственно (рис.2). Кроме этого, полюс системы координат $O_T Y_T Z_T$ совместим неподвижно с продольной осью $O\xi$.

Проведем через произвольные точки “ T_i ” в плоскости $O_T Y_T Z_T$ ось $O_T \chi_i$, образующую с горизонтальной осью $O_T Y_T$ угол ψ_i , зависящий от координат точек “ T_i ”.

Введем также подвижную плоскую прямоугольную систему координат $O_{Ti} Y_{Ti} Z_{Ti}$, полюс которой жестко связан с продольной осью (осью вращения барабана) $O_1 X$ подвижной системы координат $O_1 XYZ$, полюс которой, в свою очередь, совмещен с

центром масс подвесной части, причем в начальный момент времени полюс O_{Tl} совпадает с полюсом O_T , а оси $O_{Tl}Y_{Tl}$ и $O_{Tl}Z_{Tl}$ с осями O_TY_T и O_TZ_T соответственно.

Здесь форма и “толщина” $H_{в.п.}$ (рис.1) вибрационного поля твердого тела в поперечной плоскости $O_TY_TZ_T$ (рис.2) при упругих колебаниях будут определяться значениями проекций амплитудных виброперемещений каждой точки тела “ T_i ” на ось $O_T\chi_i$. Причем, амплитудные значения виброперемещений возможны при условии, когда угол поворота φ вектора возмущающей силы $\bar{F}$ достигнет угла ψ_i наклона оси $O_T\chi_i$ к горизонтальной оси O_TY_T .

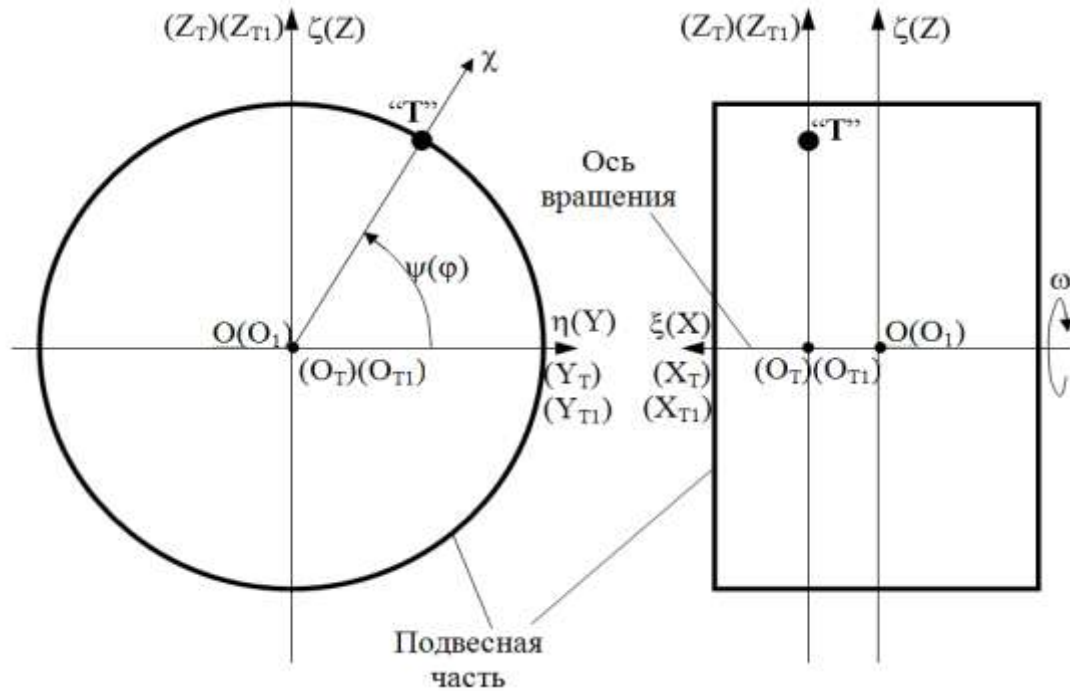


Рис. 2- Направления координатных осей в подвесной части в начальный момент (в состоянии покоя).

На рис.3 показана схема формирования вибрационного поля при линейных поперечных колебаниях подвесной части стиральных машин. В этом случае амплитуды A^χ виброперемещений центра масс подвесной части вдоль произвольной оси $O_T\chi_i$ будут равны амплитудам A_T^χ виброперемещений точек “ T_i ” вдоль этой оси:

$$A^\chi = A_T^\chi, \quad (1)$$

и, следовательно, будут определять размеры и форму вибрационного поля.

Значения амплитудных виброперемещений A_T^χ точек тела вдоль произвольной оси $O_T\chi_i$ могут быть также найдены через проекции виброперемещений η и ζ центра масс на оси $O\eta$ и $O\zeta$, соответственно, неподвижной системы координат $O\xi\eta\zeta$:

$$A_T^\chi = \frac{\eta}{\cos \psi} = \frac{\zeta}{\sin \psi}. \quad (2)$$

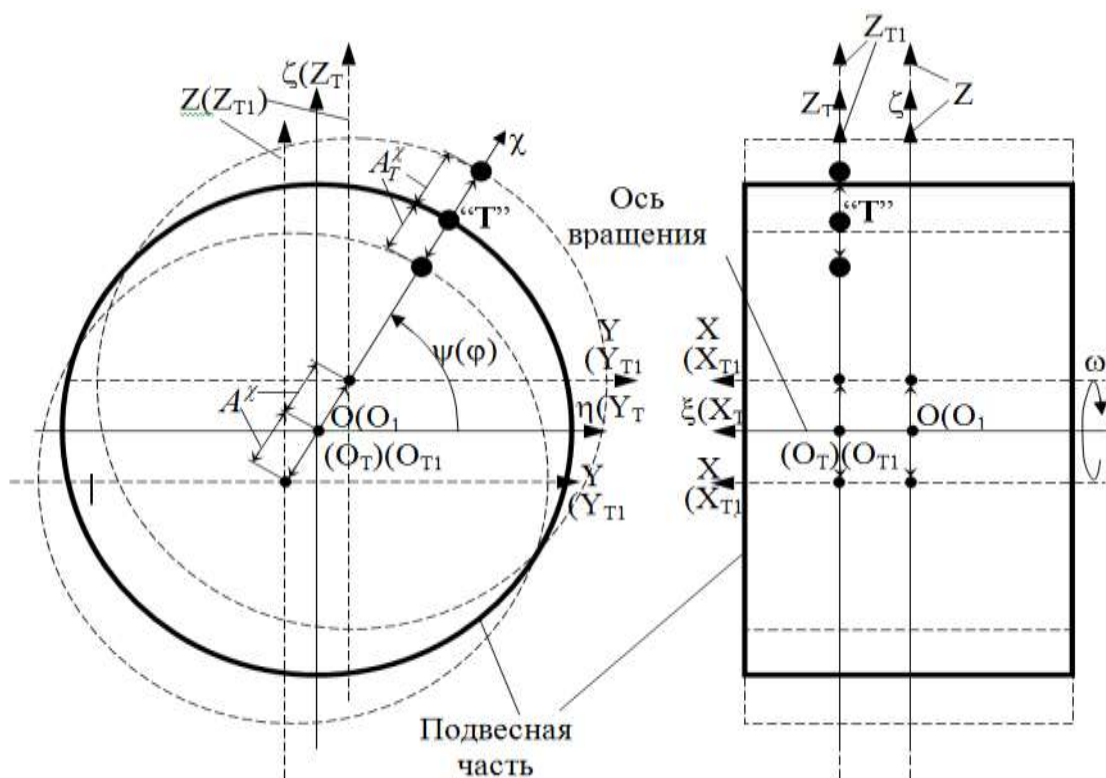
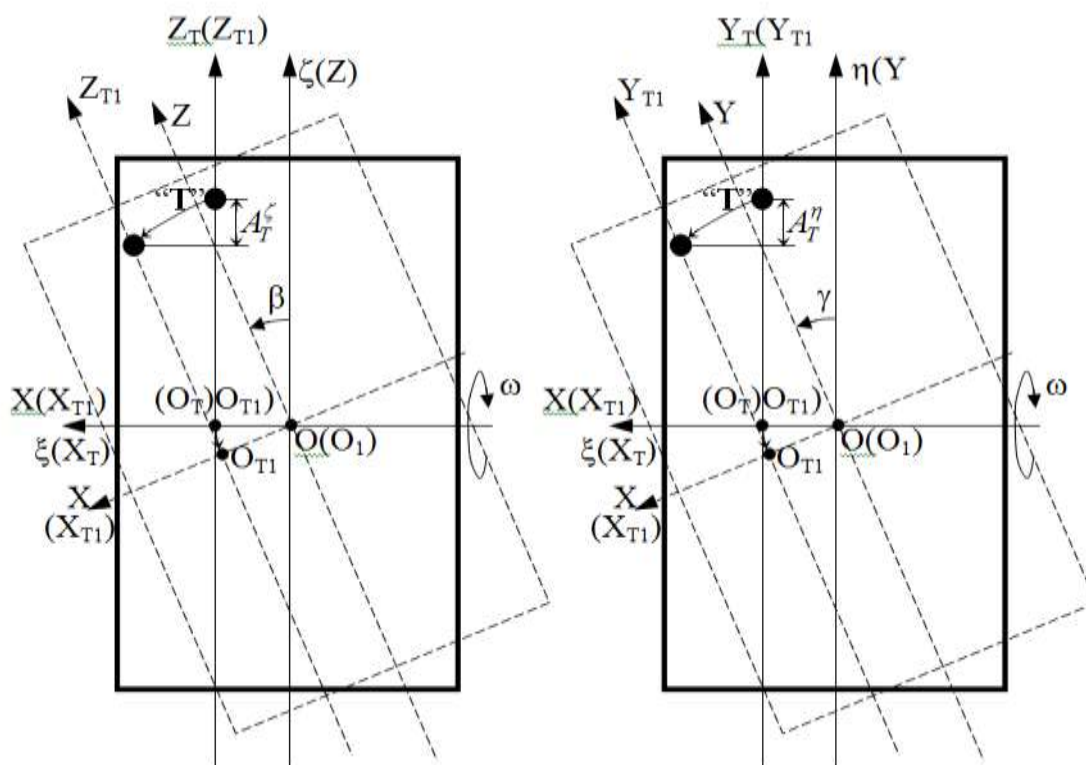


Рис. 3- Схема формирования вибрационного поля в произвольной поперечной плоскости при линейном перемещении подвесной части.

Рассмотрим процесс формирования вибрационного поля в поперечной плоскости $O_T Y_T Z_T$ при угловых колебаниях β и γ подвесной части вокруг осей $O\eta$ и $O\zeta$, соответственно, неподвижной системы координат $O\xi\eta\zeta$ (рис.4). Для упрощения покажем на рисунке перемещение точки “Т” только в одно крайнее положение.

Заметим, что при повороте вектора возмущающей силы $\bar{F}$ на угол φ , равный углу ψ (рис.5), сила $\bar{F}$ будет действовать в плоскости $O\xi\chi$, создавая таким образом момент сил, который приводит к угловым колебаниям точки “Т” в этой же плоскости $O\xi\chi$.



а) угловые колебания β вокруг оси $O\eta$

б) угловые колебания γ вокруг оси $O\zeta$

Рис. 4- Схема угловых виброперемещений подвесной части.

Здесь также отметим, что центр масс подвесной части, совпадающий в начальный момент с полюсом O неподвижной системы координат $O\xi\eta\zeta$, а также полюс O_1 подвижной системы координат O_1XYZ , совмещенный в начальный момент с полюсом O , остаются неподвижными, т.е. не совершают линейных перемещений. Вместе с тем, оси O_1Y и O_1Z подвижной системы координат O_1XYZ совершают угловые виброперемещения β и γ вокруг осей $O\eta$ и $O\zeta$.

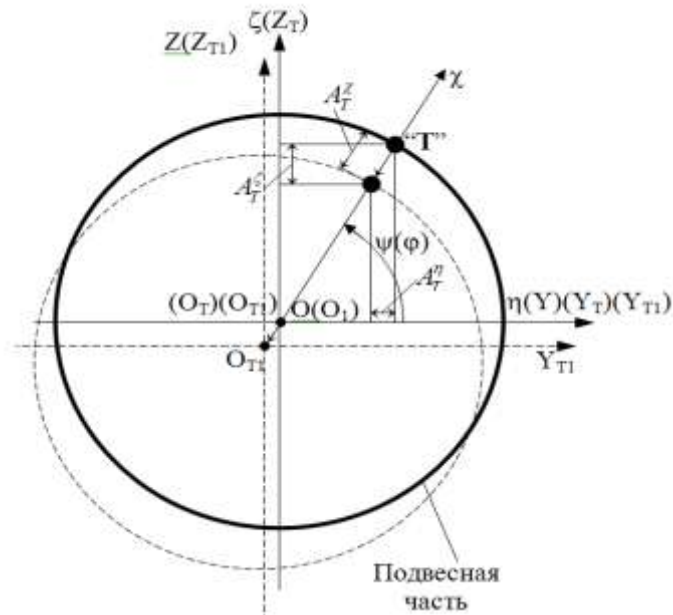


Рис. 5- Схема формирования вибрационного поля в произвольной поперечной плоскости при угловых перемещениях подвесной части.

При этом, точка “Т” также совершает угловые перемещения β и γ вблизи рассматриваемой неподвижной плоскости $O_T Y_T Z_T$. Отсюда очевидно, что геометрическая сумма проекций A_T^η и A_T^ζ амплитудных угловых перемещений точки “Т” на плоскость $O_T Y_T Z_T$ дает амплитудное значение A_T^χ проекции линейного перемещения точки “Т” в плоскости $O_T Y_T Z_T$ вдоль оси $O_T \chi$ (рис.4, 5):

$$A_T^\chi = \sqrt{A_T^\eta + A_T^\zeta}, \quad (3)$$

или

$$A_T^\chi = \frac{A_T^\eta}{\cos \psi} = \frac{A_T^\zeta}{\sin \psi}. \quad (4)$$

Таким образом, исследование процесса формирования вибрационного поля подвесной части стиральных машин показало, что если при линейных колебаниях размер и форма вибрационного поля определяются амплитудами колебаний центра масс подвесной части, то при угловых колебаниях вибрационное поле определяется геометрической суммой проекций перемещения точек подвесной части на поперечные плоскости тела.

Полученные схемы формирования вибрационного поля и основы определения его характеристик могут быть использованы при проведении анализа вибрационного поля подвесной части стиральных машин в зависимости от упругих, диссипативных и инерционных параметров системы виброизоляции. Это позволяет более эффективно решать задачи по снижению виброактивности стиральных машин.

Список литературы:

1. Вибрации в технике: справочник в 6-ти томах. Т.4. Вибрационные процессы и машины. – М.: Машиностроение, 1980. – 386 с.

В. В. Андреев д.т.н., А. А. Бухалов

Институт ядерной энергетики и технической физики НГТУ им. Р.Е. Алексеева
кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки»
Россия, г. Нижний Новгород
vyach.andreev@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В работе представлены результаты использования нейронных сетей для определения информации об условиях проведения испытаний на усталость. На примере металлических конструкционных материалов (сталей и сплавов) приведены результаты применения нейронных сетей для определения действующих факторов. Исследованы различные типы нейронных сетей и показатели точности восстановления информации в зависимости от числа определяемых факторов.

Ключевые слова: прогнозирование показателей сопротивления усталости металлов, восстановление информации, искусственная нейронная сеть.

Основным видом воздействий на конструкционный материал является циклическое нагружение. Свойства материалов (показатели сопротивления усталости) будут существенно зависеть от того, в условиях каких совокупностей действующих факторов будет происходить циклическое нагружение. Усталостное разрушение приводит к неблагоприятным последствиям в виде отказов технических устройств и аварий. Известны проблемы, возникающие при необходимости “восстановления” информации об условиях испытаний на усталость металлических конструкционных материалов. Подобная задача возникает при работе с базами данных по результатам испытаний, а также при проведении различного рода экспертиз разрушившихся от циклических нагрузок деталей и конструкций.

Попытки построения “традиционных” математических моделей, которые описывали бы связь “показатели сопротивления усталости – действующие факторы” осложняются отсутствием необходимого объема экспериментальных данных. Методы планирования эксперимента, оптимизирующие объем экспериментальных работ путем, например, формирования дробных реплик [1], в нашем случае неприемлемы, в силу обширности перечня факторов различной природы (конструктивных, технологических, эксплуатационных) и высокой стоимости экспериментальных данных. В то же время экспериментальных данных к настоящему времени накоплено достаточно много, например [2]. Различные приемы совместного учета коэффициентов индивидуального влияния конкретного фактора (например, их простое перемножение или перемножение с возведением в какую-либо степень, как, представлено, например, в обзоре таких методов, выполненном в [3]), не универсальны, поскольку соответствуют ограниченному объему экспериментов, выполненных автором конкретного приема. Наиболее удачным в плане объединения всех накопленных к настоящему времени результатов экспериментального определения показателей сопротивления усталости представляется прием построения обобщенных моделей поведения металлов при циклическом нагружении, использующий в качестве своей основы свойства структурно

чувствительного показателя сопротивления усталости [4, 5, 6]. Таким показателем принято считать тангенс угла наклона кривой усталости к оси числа циклов нагружения ($\operatorname{tg}\alpha_w$) в том случае, когда кривую усталости представляют в логарифмической системе координат. Значение угла наклона будет определять положение точки перелома кривой усталости в многоцикловой области, имеющей следующие координаты: по оси ординат – σ_R , (МПа) – предел выносливости, по оси абсцисс – N_G , (циклов нагружения до разрушения объекта). Однако простое сопоставление показателей сопротивления усталости друг с другом для большого количества кривых не дает возможности получить какие-либо функциональные зависимости. Известен прием решения подобных проблем в рамках обобщенного анализа [7], который можно представить как особый способ уменьшения трудностей, обусловленных множественностью аргументов. В начале решения ценой утери некоторой доли информации (т.е. исключения некоторых индивидуализирующих особенностей физического процесса) достигается уменьшение числа аргументов и в таком виде решение доводится до конца. Затем посредством достаточно простой дополнительной операции информация (и, следовательно, индивидуализация процесса) полностью восстанавливается [7]. Реализация данного алгоритма применительно к экспериментальным результатам по многоцикловой усталости металлов и сплавов [8, 9] позволила перейти в новое пространство приведенных показателей сопротивления усталости и получить в нем ряд практически функциональных зависимостей между показателями сопротивления усталости в их приведенной форме. Обобщенную зависимость приведенных параметров сопротивления усталости (образованную при сопоставлении физических пределов выносливости) и обобщенную поверхность приведенных параметров сопротивления усталости (образованную при сопоставлении точек, лежащих на кривой усталости выше предела выносливости) можно рассматривать как универсальные математические модели, описывающие поведение металлов при данном виде воздействия.

Недостаток эмпирических данных при работе с этими моделями было решено компенсировать использованием программы, реализующей искусственную нейронную сеть. Для создания и обучения искусственной нейронной сети использовался программный продукт компании NeuroProject NeuroShell2, в котором реализованы следующие типы искусственных нейронных сетей: сеть Ворда, сеть с общей регрессией с генетическим алгоритмом подстройки весов скрытых и выходных слоев, сеть с обходными соединениями, трёхслойная сеть со стандартными соединениями. Выходные значения для нейронной сети представляли собой кодированные значения действующих факторов, а входами являлись значения показателей сопротивления усталости. Показатели эффективности определялись с точки зрения времени, необходимого на обучение сети и с точки зрения величины ошибки в определении показателей сопротивления усталости как результата действия совокупности факторов. Создав и обучив ИНС на нашем наборе данных с помощью NeuroShell2, мы оценили ошибку, выдаваемую сетью на тестовом наборе данных. Анализ ошибок в результатах работы сети позволяет сделать вывод о том, что для решения задачи восстановления информации об условиях испытаний на усталость металлов оптимальной будет нейронная сеть с общей регрессией и генетическим алгоритмом подстройки весов скрытых и выходных слоев и приведенной формой представления показателей сопротивления усталости.

Решение задачи восстановления информации о совокупности действующих факторов предполагает некоторую неопределенность – один и тот же угол наклона кривой усталости может быть получен при различных комбинациях действовавших факторов. Как первый шаг на пути ее решения рассматривались некоторые

упрощенные ситуации – восстановление искомых значений (количественных параметров) для отдельных факторов при известных остальных или восстановление информации о факторе, действие которого оказывается наиболее существенным. В качестве переменных рассматривались показатели сопротивления усталости и факторы, формирующие условия нагружения (температура, асимметрия цикла, частота нагружения, шероховатость поверхности и т.д. – всего девять факторов). Были рассмотрены ситуации, при которых параметры сопротивления усталости задавались всегда, а число остальных факторов, варьировалось. В процессе обучения ИНС в качестве обучающей и экзаменующей выборки рассматривались строки базы данных об условиях испытаний и значения показателей сопротивления усталости, а также была найдена оптимальная форма для представления показателей сопротивления усталости, предъявляемых сети, и определено оптимальное соотношение числа входов и выходов. Показатели сопротивления усталости должны быть предъявлены ИНС в приведенной форме, то есть в виде безразмерных параметров, образующих практически функциональную зависимость. Точность восстановления информации зависит от соотношения входов (числа известных параметров сопротивления усталости и известных факторов) и выходов (числа восстанавливаемых кодированных значений действующих факторов).

Сравнение результатов работы программы и описания факторов, фактически имевших место при циклическом нагружении, показало, что в условиях стендовых испытаний программа позволяет надежно определять до трех действовавших факторов. Дальнейшее увеличение числа искомых неизвестных приводит к неприемлемому увеличению ошибки при восстановлении информации.

Список литературы:

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий.- М.: Наука, 1971.- 285с.
2. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов.- Киев: Наук. думка, 1987.- 1303с.
3. Акимов Л.М. Выносливость жаропрочных материалов. – М.: Металлургия, 1977. – 152с.
4. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении.- Киев: Наук. думка, 1981.- 343с.
5. Гребенник В.М. Усталостная прочность и долговечность металлургического оборудования. – М.: Машиностроение, 1969.- 256с.
6. Шетулов Д.И., Андреев В.В. Прогнозирование долговечности деталей машин по нестандартным физико-механическим параметрам конструкционных материалов // Изв. РАН. Металлы. 1998. №3. С.55-59.
7. Гухман А.А., Зайцев А.А. Обобщенный анализ.- М.: Факториал, 1998.- 304 с.
8. Андреев В.В. Предел выносливости металлов на обобщенной зависимости приведенных параметров сопротивления усталости.- Н.Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т., 2003.- 304с.
9. Андреев В.В. Диагностика изменений в структуре материала с использованием обобщенных критериев сопротивления усталости. Контроль. Диагностика.- М.: Машиностроение, 2005. №6. С.61-64.

**Ю. А. Анисимов, В. Л. Долганов к.т.н., С. Х. Загидуллин д.т.н.,
Б. Е. Шенфельд д.т.н.**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, г. Пермь
zsh@cpl.pstu.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ГРАНУЛИРОВАННОЙ СЕРЫ В ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМНЕФТЕОРГСИНТЕЗ»

Предложен новый эффективный метод отвода тепла из грануляторов серы в производстве глубокой переработки нефти ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез». Проведены численные эксперименты, моделирующие различные тепловые режимы работы грануляторов. Полученные результаты подтвердили перспективность нового метода охлаждения грануляторов серы.

Ключевые слова: сера, гранулирование, испарительное охлаждение, критериальные уравнения.

Производство гранулированной серы основано на переработке сероводорода методом Клауса [1], образующегося в качестве побочного продукта при гидроочистке сернистого нефтяного сырья. Технология и оборудование для гранулирования разработаны фирмой «SANDVIK Process Systems Inc.» (США).

Грануляторы представляют собой устройства для формирования капелек серы определенного размера и равномерного их распределения на поверхности движущейся стальной ленты конвейера-охладителя. Капли расплава, попадая на ленту, охлаждаются и кристаллизуются. Поверхность ленты для уменьшения прилипания капелек серы смачивают водным раствором антиадгезива. Образующиеся гранулы полусферической формы размером 3–5 мм, снимают с поверхности ленты скребком и транспортируют на склад готовой продукции.

Отвод теплоты, выделяющейся при охлаждении и кристаллизации расплава, производят оборотной водой, которую разбрызгивают на нижнюю поверхность ленты. Для обеспечения необходимого количества охлаждающей воды грануляционная установка снабжена автономным водооборотным циклом, включающем в себя вентиляторную градирню и вспомогательное оборудование.

В процессе промышленной эксплуатации были выявлены существенные недостатки существующей установки гранулирования. Во-первых, оборотная вода при многократном контактировании в градирне с атмосферным воздухом, забираемым с промышленной площадки, значительно ухудшает свое качество. В частности, повышается ее солесодержание, происходит насыщение кислородом, углекислым газом, сероводородом и загрязнение механическими примесями. Использование такой воды вызывает интенсивную коррозию и загрязнение основных конструктивных элементов установки гранулирования.

Во-вторых, из-за недостаточно высокой эффективности работы разбрызгивающих устройств гранулятора приходится поддерживать повышенную плотность орошения поверхности ленты. Это приводит к увеличению энергозатрат на работу водооборотной системы.

Уменьшение содержания вредных примесей в оборотной воде возможно за счет снижения коэффициента ее повторного использования. Однако это связано с повышением расхода свежей воды и увеличением объемов образующихся сточных вод.

Для исключения перечисленных недостатков нами предложен принципиально иной метод охлаждения, не связанный с необходимостью использования оборотной воды. Согласно этому методу охлаждение предусматривается производить при помощи деминерализованной воды или охлажденного парового конденсата.

Для эффективного и рационального использования вода будет наноситься на нижнюю поверхность стальной ленты гранулятора не малоэффективными разбрызгивающими устройствами, а специальными вращающимися валиками в виде тонкой жидкостной пленки. При контакте с нагретой поверхностью стальной ленты такая пленка будет легко испаряться и, тем самым, интенсивно охлаждать ее. Для дополнительного ускорения охлаждения предусматривается осуществлять обдув поверхности увлажненной ленты воздухом.

Схема гранулятора с предлагаемой системой испарительного охлаждения приведена на рис. 1.

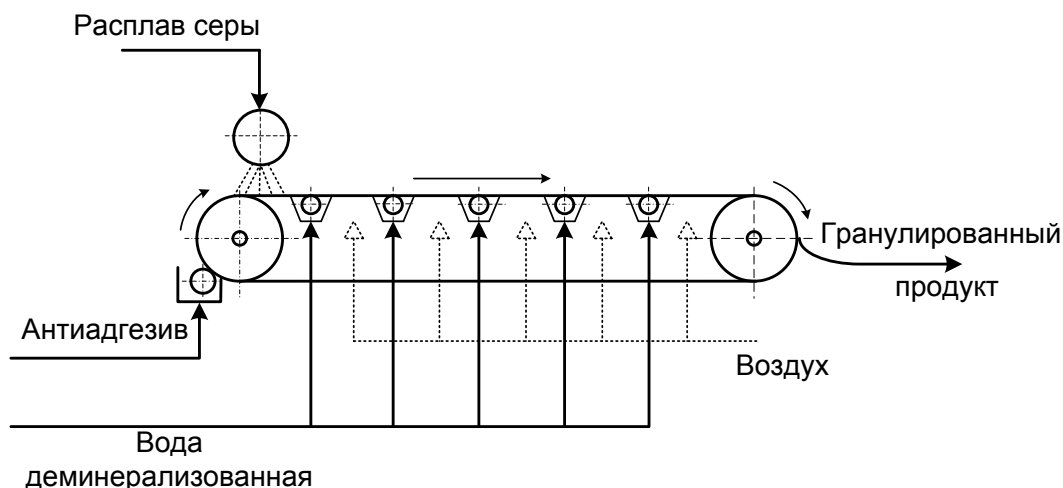


Рис. 1 – Схема гранулятора серы с системой испарительного охлаждения.

Для подтверждения эффективности предлагаемого технического решения были проведены численные эксперименты, моделирующие различные технологические режимы охлаждения гранулятора. Для этого всю длину ленты гранулятора условно разделили на восемь одинаковых участков, допуская, что температура ленты на каждом участке будет снижаться по линейному закону. Исходя из практических данных принимали, что температура ленты в самом начале будет составлять 60–80 °С, а в ее окончании она должна быть не более 50 °С. Скорость воздуха, подаваемого на обдувание ленты, варьировали в интервале от 2 до 5 м/с.

Требуемую площадь поверхности контакта (F) рассчитывали из модифицированного уравнения тепло-массоотдачи [2]:

$$F = \frac{Q}{[\alpha(t_{жс} - t_{г}) + \beta(p_{п} - p_{г})r]}, \quad (1)$$

где Q – количество теплоты, отводимое через поверхность ленты и складывающееся из теплоты, расходуемой на нагрев ($Q_{физ.}$) и последующее испарение пленки воды ($Q_{исп.}$).

Величину $Q_{физ.}$ рассчитывали по известному закону теплоотдачи:

$$Q_{\text{физ.}} = \alpha \cdot F \cdot (t_{\text{жс}} - t_{\text{г}}), \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от жидкостной пленки в окружающую среду; $t_{\text{жс}}$ и $t_{\text{г}}$ – температура жидкостной пленки и окружающего воздуха, соответственно.

В свою очередь величину α можно рассчитать из критериального уравнения [3]:

$$Nu = 4,55 \cdot 10^{-3} Re^{0,8} \cdot K^{0,4}, \quad (3)$$

где K – критерий Кутателадзе [4], учитывающий влияние массообмена на теплообмен

$$K = \frac{r}{c_p(t_{\text{жс}} - t_{\text{г}})}, \quad (4)$$

а теплота испарения определится с учетом изменения агрегатного состояния вещества:

$$Q_{\text{исп.}} = M \cdot r = \beta \cdot F \cdot (p_{\text{п}}^* - p_{\text{п}}) r, \quad (5)$$

где M – масса испаренной влаги; r – теплота испарения воды; β – коэффициент скорости массоотдачи; $p_{\text{п}}^*$ и $p_{\text{п}}$ – равновесное парциальное давление паров воды над пленкой жидкости и парциальное давление паров воды в окружающем воздухе.

В случае обтекания пленки воды потоком воздуха коэффициент скорости массоотдачи может быть рассчитан по уравнению [4]:

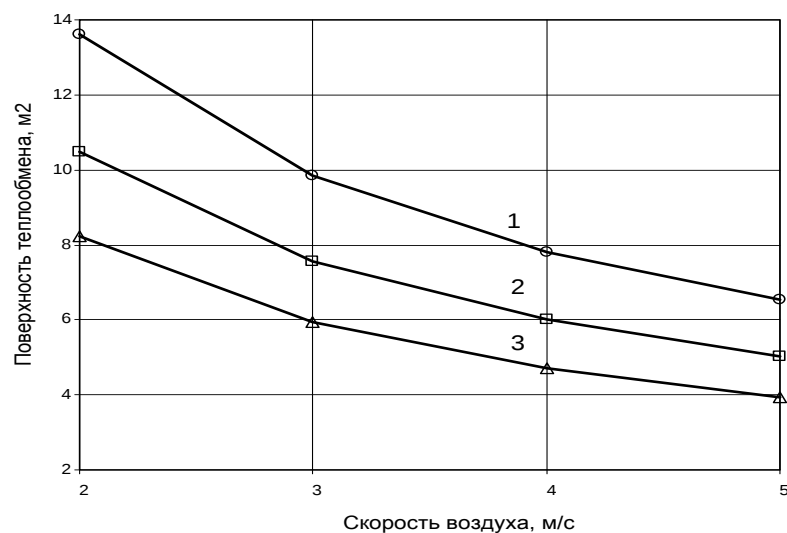
$$\beta = \frac{0,0745(w \cdot \rho)^{0,8}}{3600}, \quad (6)$$

где w и ρ – линейная скорость движения и плотность воздуха.

Для того чтобы узнать, успеет ли испариться водяная пленка на каждом участке ленты, рассчитывали скорость ее испарения (G) по уравнению [5]:

$$G = 0,04075 w^{0,8} (p_{\text{п}}^* - p_{\text{п}}). \quad (7)$$

С использованием системы этих уравнений в среде Mathcad была составлена программа расчета требуемой поверхности испарительного охлаждения гранулятора. Основные результаты расчетов представлены на рис. 2 и в табл. 1.



**Рис. 2 – Зависимость требуемой площади поверхности охлаждения от скорости обтекания воздуха при различных температурных диапазонах охлаждения ленты:
1 – 60-50 °C; 2 – 70-50 °C; 3 – 80-50 °C**

Таблица 1 – Результаты расчета требуемой площади испарения

Температурный диапазон охлаждения	Скорость воздуха, м/с	Требуемая площадь поверхности охлаждения, м ²	Требуемый расход испаренной воды, кг/ч
80 – 50	2	8,22	237,8
	3	5,95	
	4	4,72	
	5	3,95	
70 – 50	2	10,47	235,9
	3	7,57	
	4	6,01	
	5	5,03	
60 – 50	2	13,60	234,0
	3	9,83	
	4	7,81	
	5	6,53	

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы.

Требуемая площадь поверхности испарительного охлаждения с повышением начальной температуры ленты снижается. Обдувание водной пленки потоком воздуха обеспечивает существенная интенсификация процесса охлаждения. При скорости воздуха, равной 4 м/с поверхность охлаждения даже в неблагоприятных температурных условиях ее эксплуатации становится меньше геометрической поверхности ленты гранулятора

Расход воды практически не зависит от температурного диапазона охлаждения ленты и находится в пределах 234,0–237,8 кг/ч. С экономической точки зрения такой расход является вполне приемлемым.

Таким образом, показана принципиальная возможность модернизации установки гранулирования серы ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» путем замены морально устаревшей системы оросительного охлаждения оборотной водой на испарительное охлаждение деминерализованной водой или охлажденным паровым конденсатом.

Реализация предлагаемого технического решения позволит практически полностью предотвратить коррозию дорогостоящего грануляционного оборудования, увеличить его межремонтный цикл работы, а также исключить из работы громоздкую и энергоемкую систему оборотного водоснабжения.

Список литературы:

1. Ахметов С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа: Учебное пособие для вузов. Уфа: Гилем, 2002. – 672 с.
2. Авербух Я.Д., Заостровский Ф.П., Матусевич Л.Н. Процессы и аппараты химической технологии. – Свердловск: Издание УПИ, 1973. – 428 с.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 415 с.
4. Кутателадзе С.С. Анализ подобия в теплофизике /С.С. Кутателадзе; Академия наук СССР, Сибирское отделение; Институт теплофизики; под ред. Н.И. Ярыгиной. Новосибирск: Наука, 1982. 280 с.
5. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.

Е. А. Архангельская к.т.н., М. В. Грушичева

Московский государственный университет приборостроения и информатики
кафедра ПР-2 «Метрология, сертификация и диагностика»
Россия, г. Москва
gru2@list.ru

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЙ

В статье приведены результаты сравнения трудоемкости измерений блока кулаков ремизных СТБ-05.000.42.0 СБ некоторыми средствами. Анализировались координатно-измерительные машины, ОДГ-3, приборы для измерений линейных перемещений и т.д. Данные получены экспериментальными и аналитическими методами.

Ключевые слова: трудоемкость измерений, сложнопрофильные детали вращения, средства измерений, информационно-измерительные системы

Значительную долю от всех деталей, производимых механообрабатывающими предприятиями, составляют такие сложнопрофильные тела вращения, как кулачки, коленвалы, корпусные детали и т. д. В процессе их производства требуется измерение геометрии рабочих поверхностей на всех этапах изготовления.

В настоящее время в Московском государственном университете приборостроения и информатики (МГУПИ) проводится разработка системы для измерений сложнопрофильных деталей вращения. В рамках определения актуальности разработки системы проводился анализ эффективности стандартных средств измерений.

Выбор стандартных средств измерений для анализа осуществлялся с учетом минимально необходимых метрологических параметров, а так же ряда особенностей характерных для производства. Так, например, механообрабатывающие предприятия, изготавливающие кулачки и кулачковые механизмы, чаще всего выпускают широкую номенклатуру изделий, но малыми партиями. Для таких предприятий предпочтительными являются универсальные средства измерения.

Так же на механообрабатывающих предприятиях наибольшее внимание уделяется трудоемкости измерений детали, которая выражается в нормо-часах, затрачиваемых на операцию. Минимизация трудоемкости измерений приводит к значительному уменьшению себестоимости детали, а, следовательно, к повышению ее конкурентоспособности на современном рынке. Поэтому при определении эффективности применения стандартных средств измерений первоочередное внимание уделялось именно трудоемкости.

Наиболее распространенными и используемыми универсальными средствами измерений, которыми можно проводить измерение детали вращения со сложным профилем, являются: координатно-измерительные машины (КИМ), установки с оптическими делительными головками, индикаторы часового типа ГОСТ 15593-70, приборы для измерений линейных размеров.

Информация о трудоемкости проведения измерений типовых деталей данными средствами, содержащаяся в открытом доступе, ограничена и не дает полноценной

картины. Поэтому был проведен комплекс экспериментально-аналитических исследований.

В исследованиях определялась трудоемкость измерений как совокупность затрачиваемого времени на: непосредственно операции измерения, обслуживания рабочего места, отдыха, естественных надобностей, подготовку и завершения работы. Экспериментально определялось только время, затрачиваемое на операции измерения (операционное время), остальное время рассчитывалось как 15 % от операционного [1].

Измеряемой сложнопрофильной деталью вращения был выбран блок кулаков ремизных СТБ-05.000.42.0 СБ (рисунок 1). В 2010 г. данная деталь активно производилась ОАО «Московским экспериментальным заводом № 1» (МЭЗ 1).



Рис. 1 – Блок кулаков ремизных СТБ-05.000.42.0 СБ, изготавливаемый в 2010 г. МЭЗ1.

Блок кулаков ремизных является мелкосерийной продукцией, партия содержит от 2 до 6 изделий одного типоразмера, трудоемкость его изготовления составляет 20 часов. Согласно данным, предоставленным производителем, в изделии измеряется профили двух рабочих поверхностей (в 360 точках) и внутреннего отверстия, а также контролируется их взаимное расположение.

Наиболее универсальным и точным средством измерений, в данном экспериментально-аналитическом исследовании, является (КИМ). Обычно в открытой печати описывается программный режим работы КИМ. Операционное время измерения блока кулаков ремизных в таком режиме, по некоторым источникам [2], может достигать 1 часа.

Однако трудозатраты на формирование программного обеспечения варьируются от 1 до 2 рабочих смен, что делает не целесообразным его использование в случае измерений мелкосерийной и относительно не дорогой продукции.

Поэтому наибольший интерес представляет трудоемкость работы КИМ в так называемом «ручном» режиме, когда координаты измеряемой точки задаются непосредственно оператором. Такой режим измерений часто применяется как для единичной, так и для мелкосерийной продукции.

Экспериментальное определение трудоемкости измерений КИМ в «ручном» режиме было осуществлено на заводе ОАО «СТАНКОАГРЕГАТ». В эксперименте использовалась КИМ UMC 850 фирмы «OPTON» (Швейцария). Полученное

операционное время измерений одного блока кулаков ремизных СТБ-05.000.42.0 СБ составило 3 часа 30 минут, общая трудоемкость 4 часа 15 минут.

Другими средствами измерений, рассматриваемыми в рамках исследования, являются измерительные головки часового типа по ГОСТ 15593-70. Измерительные головки, нутромеры и т.д. наиболее часто встречающиеся в заводских метрологических лабораториях средства измерений. По метрологическим и техническим параметрам они несопоставимы с КИМ, но позволяют осуществлять измерение сложнопрофильных деталей вращений, типа блока кулаков ремизных.

Для достоверности трудоемкость измерений данными средствами была определена экспериментально. Измерение блока кулаков ремизных проводилось двумя индикаторами часового типа и нутромером на базе метрологической лаборатории НПО «ГИДРОМАШ». Обычно в измерениях данными средствами задействуются от 3 до 4 операторов. Причинами являются отсутствие систем автоматического фиксирования полученных данных, формирования отчетов, а так же высока вероятность ошибки. В данном случае измерение проводили три квалифицированных оператора.

Экспериментально полученное операционное время измерений составило 9 часов 25 минут, а расчетная трудоемкость 10 часов 50 минут. Использование при измерении трех операторов пропорционально увеличивает трудоемкость в три раза. Следовательно, трудоемкость измерений составила 32 часа 30 минут, что значительно превышает трудоемкость изготовления детали. На практике индикаторы часового типа для измерений блока кулаков ремизных, как правило, стараются не использовать.

Ранее на машиностроительных предприятиях распространенным средством измерений являлись установки с оптической делительной головкой типа ОДГ-3. Недостатками подобных средств измерений являются необходимость в высокой квалификации оператора, «ручном режиме» (измеряемые величины отчитываются по шкале оператором, что приводит к низкой производительности), высоких требования к условиям эксплуатации и т. д.

В настоящее время установки с оптической делительной головкой типа ОДГ-3 являются устаревшими средствами измерений и их распространение ограничено. По данным из открытых источников [2] оперативное время измерений составляет порядка 6 часов. При эксплуатации такого прибора задействуются до 3 операторов. Следовательно, трудоемкость увеличивается в три раза и составляет 20 часов 42 минуты, что превышает трудоемкость изготовления. Данный факт, а так же труднодоступность и низкая производительность ограничивает применение приборов типа ОДГ-3.

В экспериментальном исследовании рассматриваются так же приборы для измерения линейных размеров или цифровые микрометры. Данные средства измерений по сравнению с индикаторными головками являются более производительными. Сокращение трудоемкости измерений объясняется возможностью автоматизированной записи и передачи полученных данных в персональный компьютер. При проведении измерений такими приборами используется один оператор. Теоретический анализ трудозатрат на измерение ограничен, поэтому было проведено экспериментальное исследование.

В исследованиях использовались два прибора для измерений линейных перемещений М-200 фирмы «МИКРОТЕХ®» (Украина). Измерение блока кулаков ремизных проводилось в лаборатории МГУПИ.

Экспериментально определенное операционное время, составило 4 часа 25 минут, трудоемкость 5 часов 5 минут. Доля трудоемкости измерения относительно

изготовления превысила 20 %, полученные данные наглядно демонстрирует недостаточную производительность данных средств измерений.

В результате проведенного экспериментально-аналитического исследования по полученным данным была составлена диаграмма, характеризующая долю трудоемкости измерения и изготовления детали (рисунок 2).



Рис. 2 – Соотношение трудоемкости измерений и изготовления блока кулаков ремизных СТБ-05.000.42.0 СБ в минутах.

На практике максимально допустимой долей трудоемкости измерения считаются 20 % от трудоемкости изготовления детали. Трудоемкость измерений большинством стандартных средств измерений существенно превышает предельно допустимое значение в 20 %. Фактически измерение блока кулаков ремизных может проводиться только КИМ. Однако, КИМ является дорогостоящим средством измерений, его эксплуатация сопряжена со значительными сопутствующими расходами. Для небольшого механообрабатывающего предприятия содержание КИМ может быть обременительным.

Так же при выборе средства измерений необходимо учитывать общую тенденцию к модернизации механообрабатывающих производств. Активно происходит внедрение новых программно-управляемых обрабатывающих центров, специализированных станков и т. д.

Применение новейшего оборудования приводит к повышению производительности и сокращению трудоемкость изготовления отдельной детали. Для современного высокотехнологичного производства трудоемкость использования КИМ может существенно превысить порог в 20 %, и сделать его использование нежелательным.

Другим немаловажным аспектом является высокая точность КИМ. На практике часто нет необходимости в высокоточном измерении. Например, 20 мкм является достаточной точностью измерений блока кулаков ремизных. Следовательно, не оправдывают себя обременения, которые накладывает обслуживание и регулярная поверка высокоточных приборов.

Сложившаяся ситуация приводит к использованию на производстве так называемых подвижных калибров для сложнопрофильных деталей вращений. Для блока кулаков ремизных такое приспособление фактически имитирует его работу (рисунок 3).

Точность подвижного калибра не превышает 20 мкм, это связано с необходимостью применения измерительных щупов. В процессе контроля значительна

вероятность неверной отбраковки, как следствие стирания рабочих поверхностей. Другим недостатками является возможность использовать приспособление только для деталей одного типоразмера, что делает их применение не рентабельным в случае мелко- и среднесерийного производства. Основным преимуществом подвижных калибров является высокая скорость контроля, рабочее время на контроль составляет от 1,5 до 2 минут.



Рис. 3 – Внешний вид подвижного калибра имитирующего работу блока кулаков ремизных СТБ-05.000.42.0 СБ на текстильном станке.

Очевидно, что использование таких подвижных калибров для современного высокоточного производства недопустимо.

В результате проведенного исследования определена потребность в средствах измерений отвечающих требованиям современного уровня автоматизации, точности и универсальности. Данным требованиям могут отвечать средства измерения принципиально другого типа построения, а именно модульные измерительные системы.

Разработка такой модульной измерительной системы в настоящее время производится в МГУПИ. Система предназначена для эксплуатации как в метрологической лаборатории, так и непосредственно в механообрабатывающем цехе. Последнее позволяет обеспечивать оперативный контроль после каждой операции, что особо актуально для развития современных высокоточных предприятий.

В настоящее время завершается первый этап разработки системы. Создан опытный образец и отработана технология калибровки прецизионных трансформаторных датчиков линейных перемещений.

Список литературы:

1. Моисеев М.П., Близнянский С.А., Веллер В.А., Кученев Н.И., Соловей З.И. Справочник мастера механического цеха / Под. ред. Моисеев М.П. Москва: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1960. С. 483-518.
2. Бражкин Б.С. Разработка методов и средств контроля сложнопрофильных деталей типа тел вращения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2004. 230 с.

**В. И. Астащенко¹ д.т.н., Р. А. Бикулов¹ к.т.н., М. С. Колесников¹ д.т.н.,
И. О. Леушин² д.т.н.**

¹Камская государственная инженерно-экономическая академия (ИНЭКА)
факультет автоматизации и прогрессивных технологий
кафедра МиТЛП
Россия, г. Набережные Челны
bikulov_uvr@mail.ru

²Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
факультет материаловедения и высокотемпературных технологий
кафедра ЛМПС
Россия, г. Нижний Новгород
lmps@nntu.nnov.ru

ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЗИРОВАННОГО ЧУГУНА ДЛЯ ОПОРНОГО СЛОЯ ЛИТЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ШТАМПОВ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В работе представлены результаты исследования в области создания новых материалов для производства литой биметаллической пресс-оснастки путем регулируемой направленной кристаллизации в условиях форсированного охлаждения.

Ключевые слова: штампы для горячего деформирования, биметаллические штампы, алюминизированный чугун.

Штампы для горячего деформирования, пресс-формы и пресс-узлы машин литья под давлением традиционно изготавливаются из кованных сталей мартенситного класса 4Х5МФС, 5Х2МНФ (Ди-32), 5Х3В3МФС (Ди-32), 3Х2В8Ф, 5Х3В3МФ2Б и др.

Из литературных источников известно, что применение сталей мартенситного класса для изготовления методом литья практически невозможно из-за образования трещин в процессе кристаллизации [1,2,3].

Имеется опыт изготовления литых штампов для горячего деформирования на ОАО «КАМАЗ-Металлургия» из стали 3Х5МНФСЛ в цирконовых формах при медленном охлаждении при кристаллизации отливок.

Перспективным направлением улучшения комплекса механических и эксплуатационных характеристик штампов горячего деформирования является получение биметаллических отливок путём направленной кристаллизации, обеспечивающей получение дисперсной структуры при ускоренном охлаждении в процессе литья в охлаждаемый кокиль [3].

В работе [3] литые биметаллические штампы для твердо-жидкой штамповки бронз и латуней (процесс «Автофордж») получались из вновь разработанной стали 4Х3В2Ф2М2СЛ [4], применяемой для гравюры штампа и стали 9ХС для опорного слоя.

С целью дальнейшего развития указанного направления в ИНЭКА продолжены исследования в области создания новых материалов для производства литой биметаллической прессоснастки путем регулируемой направленной кристаллизации в условиях форсированного охлаждения.

Установлено, что применение направленной кристаллизации отливок с форсированным охлаждением без образования трещин может быть осуществлено на сталях аустенитного [5] или ферритного класса.

Для изготовления гравюры литых биметаллических штампов горячего деформирования (ЛБШГД) авторами разработана дисперсионно-твердеющая суспензионная ферритокарбидная сталь, содержащая углерод, титан, никель, железо и порошкообразные карбиды титана в следующем соотношении, масс %: С - $0.27 \div 0.32$; Ti - $5.8 \div 6.2$; Ni - $0.5 \div 0.9$; TiC $0.5 \div 1.5$; Карбид титана в виде порошка, размерами частиц до 10 мкм, вводили в ковш или в струю металла при заливке расплав в охлаждаемый кокиль.

В качестве опорного слоя для ЛБШГД применяется вновь разработанный специализированный алюминизированный чугун следующего состава: С- $3.0 \div 3.4$; Si - 0.5%; Al $-2.0 \div 4.0\%$; Mn - $0.2 \div 0.4\%$; P $\leq 0.05\%$; S $\leq 0.02\%$.

Способ включает последующую заливку разработанных сплавов в охлаждаемый кокиль и направленное охлаждение кокиля со стороны формируемой гравюры штампов.

Первый слой заливают из суспензионной ферритокарбидной стали с введением в струю расплава порошка карбидов TiC. Объем заливаемого расплава определяются глубиной гравюры штампа и составляет $10 \div 50\%$ от высоты отливки. После затвердевания $30 \div 80\%$ залитой первоначально стали заливают второй слой расплава из алюминизированного чугуна для формирования опорного слоя пресс-оснастки.

Применение алюминизированного чугуна для опорного слоя с теплопроводностью большей, чем у ферритокарбидной стали на $60 \div 80\%$ и температурой начала затвердевания меньшей порядка 470К, чем у сплава для заливки первого слоя, обеспечивает ускорение процесса окончательной кристаллизации первоначально залитой стали. Применение более высокотеплопроводного материала для опорного слоя из алюминизированного чугуна обеспечивает при эксплуатации пресс-оснастки улучшенные условия теплоотвода от гравюры, что позволяет увеличить её работоспособность без применения искусственного охлаждения и упростить конструкцию из-за отсутствия каналов для охлаждения штампов.

Структура отливки пресс-оснастки, полученной предлагаемым способом из новых материалов состоит из трёх слоёв: рабочая поверхность (гравюра) из ферритокарбидной суспензионной стали, переходной слой композитного состава и опорный слой из алюминизированного чугуна.

В качестве опытных штампов изготавливались ковочные штампы для процесса «Автофордж» для твёрдо-жидкой штамповки бронз и латуней.

Размеры штампа ширина 150 мм, длинна 180 и высота 80 мм. Глубина гравюры 10 мм.

Продолжительность затвердевания феррито-карбидной стали при температуре заливки 1833К для выбранных штампов составляет 1.2 мин., что обеспечивает при направленной кристаллизации формирование затвердевающего слоя порядка 2 мм.

Второй этап, включающий заливку алюминизированного чугуна с температурой заливки порядка 1773К и последующую окончательную кристаллизацию переходного и опорного слоя составляет $35 \div 40$ мин.

Литая биметаллическая заготовка штампа подвергается шлифованию и окончательной химико-термической обработке – азотированию при температуре 853 К в течении $20 \div 24$ часов.

В процессе азотирования в феррито-карбидный слой претерпевает дисперсионное твердение за счёт образования γ - фазы (Ni_3Ti).

Работоспособность опытных литых биметаллических штампов увеличилась по сравнению с кованными на 47%.

Выводы

1. Применение ферритокарбидной суспензионной стали для ЛБШГД позволяет применять форсированное охлаждение отливок при кристаллизации в кокильной оснастке и исключается возможность образования литейных трещин на гравюре штампов.

2. Вследствие отсутствия в ферритокарбидной стали полиморфных превращений при эксплуатации штампов в области α - γ переходов уменьшается структурно-фазовый наклеп и увеличивается сопротивление возникновению трещин термомеханической усталости.

3. Применение алюминизированного чугуна для опорного слоя позволяет обеспечить при кристаллизации ускоренное охлаждение рабочего слоя штампов (гравюры), что приводит к измельчению структуры и за счет повышенной теплопроводности опорного слоя устраняется необходимость искусственного охлаждения штампов при эксплуатации.

4. Применение литых штампов Автофорд из суспензионной феррито-карбидной стали алюминизированного чугуна, взамен традиционной технологии изготовления штампов из кованных заготовок мартенситных сталей позволяет резко сократить продолжительность изготовления за счёт исключения механических и других операций получения сложной гравюры, а также исключить операции закалки и отпуска штампов, что обеспечивает существенное снижение себестоимости продукции.

Список литературы:

1. Геллер Ю.А., Голубев Е.С. Новые стали для прессформ литья под давлением// Известия Вузов, Черная металлургия.-1984.-№9. с.61-62.

2. Позняк Л.А., Скрынченко Ю.М., Тишлев С.И. Штамповые стали.- М: Металлургия, 1980,-240с

3. АС1138240 СССР МКИ. В 22Д27/04. Способ получения литых штампов/М.С. Колесников, В.Г. Шибаков, Л.А. Алабин и др.// Б.И.-1985.-№5.

4. АС 1108126 СССР. Штамповая сталь. Камский политехнический институт/М.С. Колесников, Э.Н. Корниенко, Л.А. Алабин и др. // Б.И.-1984.-№30.

5. АС 1724723 СССР. Штамповая сталь. Камский политехнический институт/М.С. Колесников, Трошина Л.В., Кенис М.С. и др. // Б.И.-1990.-№27.

М. М. Башаров к.т.н., А. Г. Лаптев д.т.н., М. В. Саитбаталов

Казанский государственный энергетический университет
кафедра технологии воды и топлива
Россия, г. Казань
SaidBat@gmail.com

МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В НАСАДОЧНОЙ КОЛОННЕ С ПЕРЕМЕННЫМИ МАССОВЫМИ РАСХОДАМИ ПО ВЫСОТЕ

В статье рассмотрена математическая модель и метод расчета насадочных противоточных теплообменных колонн. На основе диффузионной модели структуры потоков получена балансовая система дифференциальных уравнений, позволяющая получить профили концентраций целевого компонента и температуры по высоте колонны. Межфазный тепло- и массоперенос рассчитывается используя характеристики турбулентного пограничного слоя. В качестве примера приведен расчет колонны охлаждения пирогаза водой в производстве этилена.

Ключевые слова: массообмен, пленочное течение, насадки, колонные аппараты, математическое моделирование

В настоящее время энергоэффективность предприятий стала одной из приоритетных целей развития высокотехнологичных производств.

В области теплоэнергетики и химической промышленности эта задача, в частности, выразилась в необходимости замены морально и физически устаревших контактных устройств (оросителей) в теплообменных аппаратах с непосредственным контактом фаз. На основе многочисленных исследований прошлого и настоящего века, отраженных в работах [1-4], предпочтительным вариантом реконструкции тарельчатых и насадочных аппаратов является замена контактных устройств на современные насадки. К достоинствам насадочных колонн можно отнести высокую эффективность и широкий интервал устойчивой работы, сравнительно невысокую стоимость и простоту конструкций. Сложившийся, таким образом, тренд в выборе наиболее востребованных тем НИОКР в области теории теплообмена обострил необходимость разработки и улучшения моделей обменных процессов в насадочных слоях.

В данной статье решается задача создания математической модели теплообмена в насадочной колонне. Рассматривается колонна охлаждения пирогаза после пиролизных печей с внутренним диаметром (колонны) 3200 мм, разделенная на две секции: верхнюю высотой 4 м и нижнюю высотой 4.5 м. Эти две части колонны по проекту модернизации заполняются насадочными элементами. До модернизации в колонне использовались провальные тарелки. На вход колонны подается пирогаз в количестве 117 т/ч, насыщенный парами воды из-за предварительных впрысков. Расход пирогаза без учета паров воды 88.6 т/ч. На верхнюю секцию колонны подается вода в количестве 250 т/ч с температурой 35 °С. На вход нижней части колонны (в середину аппарата) подается поток воды с расходом 550 т/ч и температурой 55 °С.

Делается допущение, что вода между секциями полностью перемешивается и на входе в нижнюю секцию имеет однородную температуру, межфазный тепломассообмен происходит только в пространстве насадочных элементов.

В верхней части рассматривается использование нерегулярной насадки «Инжехим-2000», в нижней регулярной пакетной *IRG* (*Ingechim Regular Gofr*), производства ООО ИВЦ «Инжехим», подробно описанные в [4].

Насадка «Инжехим-2000» выполнена в виде тела вращения, поверхность которой образована полосами с симметричными выступами. Причем высота выступов в каждой полосе уменьшается от центрального выступа к периферийным и в полосах - от центральных полос к крайним. Такое конструктивное исполнение позволяет достичь высокого свободного объема насадки в аппарате за счет максимального исключения взаимного проникновения насадки и предотвращения плотного прилегания отдельных участков друг к другу с соответствующим блокированием части поверхности насадки.

Примеры успешного внедрения насадки «Инжехим-2000 на различных предприятиях показаны в [1,4].

Регулярная насадка *IRG*, представляет собой пакет установленных вертикально гофрированных металлических пластин. Гофры пластин расположены под углом к горизонту. Пакет составляется таким образом, что гофры соседних пластин расположены перекрестно. На поверхности пластин созданы фигурные шероховатости в виде выпуклостей. Такое конструктивное исполнение позволяет достичь высокого свободного объема насадки в аппарате за счет исключения взаимного проникновения насадки и равномерного распределения поверхности по сечению аппарата.

По условию работы в пленочном режиме были выбраны насадки со следующими характеристиками:

Насадки *IRG*: удельная поверхность $a_v = 162 \text{ м}^2/\text{м}^3$; удельный свободный объем $V_{св} = 0.98 \text{ м}^3/\text{м}^3$; $d_3 = 24 \text{ мм}$.

Насадки «Инжехим-2000»: номинальный размер 60 мм; удельная поверхность $a_v = 68.6 \text{ м}^2/\text{м}^3$; удельный свободный объем $V_{св} = 0.974 \text{ м}^3/\text{м}^3$; $d_3 = 56.8 \text{ мм}$.

Многочисленные экспериментальные данные и теоретические оценки [5,6] показывают, что для большинства регулярных насадок справедливо допущение о незначительной доле или полном отсутствии поперечного перемешивания газовой фазы: $w \gg v$. Хотя такое явление несомненно носит отрицательный характер, однако борьба с ним в конструировании насадок, как показывают опыты, бывает мало эффективной и зачастую отрицательно сказывается на тепломассогидравлической эффективности.

Система двумерных дифференциальных уравнений баланса импульса тепла и массы сводится в систему уравнений, удовлетворяющей известной однопараметрической диффузионной модели соответственно для газовой (1) и жидкой фаз (2) имеет вид:

$$-S\rho_G(V_{св} - \varepsilon_ж)D_{пГ} \frac{d^2 H_G}{dz^2} + G \frac{dH_G}{dz} = S(V_{св} - \varepsilon_ж)R_{TG}; \quad (1)$$

$$-\left(\frac{d_3}{Pe_G}\right) \frac{d^2 G}{dz^2} + \frac{dG}{dz} = S(V_{св} - \varepsilon_ж)R_{CG};$$

$$\left(\frac{d_3}{Pe_L}\right)L\frac{d^2H_L}{dz^2} + L\frac{dH_L}{dz} = S(V_{св} - \varepsilon_{ж})R_{TG}; \quad (2)$$

$$\left(\frac{d_3}{Pe_L}\right)\frac{d^2L}{dz^2} + \frac{dL}{dz} = S(V_{св} - \varepsilon_{ж})R_{CG}.$$

Учет уменьшения свободного объема по газовой фазе за счет жидкой осуществляется с помощью корректировки объема, по которому производится интегрирование:

$$dV_G = dV(V_{св} - \varepsilon_{ж}). \quad (3)$$

$dV = dx dy dz = \pi r dr dz = S dz$; $V_{св}$ - удельный свободный объем насадки, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $\varepsilon_{ж}$ - удерживающая способность насадки по жидкой фазе, $\text{м}^3/\text{м}^3$, S - полная площадь проходного сечения массообменного аппарата (колонны), м^2 .

Условные обозначения в уравнениях (1) и (2): нижний индекс «G» - массовый расход потока газовой фазы, кг/с ; «L» - массовый расход потока жидкой фазы кг/с ; ρ_G - плотность потока газовой фазы, кг/м^3 ; индекс G при переменных здесь и далее означает принадлежность к газовой фазе, индекс L - к жидкой фазе, C - концентрация целевого компонента в соответствующей фазе кг/кг , H - удельная энтальпия обозначенной

индексом фазы, Дж/кг , $Pe_L = \frac{q_L d_3}{D_{\Pi L}}$ - число Пекле, где в свою очередь $D_{\Pi L}$ -

коэффициент обратного перемешивания жидкой фазы, $\text{м}^2/\text{с}$, q_L - плотность орошения $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; d_3 - эквивалентный диаметр насадки м ; $D_{\Pi G}$ - коэффициент продольного перемешивания газовой фазы, $\text{м}^2/\text{с}$; R_{CG} и R_{TG} - соответственно источниковые потоки массы и тепла переходящие из одной фазы в другую в элементарном объеме dV_G , $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$.

Система уравнений (1) и (2) должна дополняться уравнением, связывающим баланс импульса в ядре потока каждой зоны с коэффициентом переноса импульса в пограничном слое газовой фазы:

$$S(V_{св} - \varepsilon_{ж})\frac{dP_H}{dz} = S(V_{св} - \varepsilon_{ж})R_{Pz} - G\frac{du}{dz} - S(V_{св} - \varepsilon_{ж})gz\frac{d\rho_G}{dz}. \quad (4)$$

где R_{pz} - напряжение проекции силы межфазного взаимодействия на ось Oz , Па ; P_H - давление в потоке газовой фазы, Па ; g - ускорение силы притяжения. Член, определяемый коэффициентом обратного перемешивания в (4) опущен из-за степени малости его влияния на перепад давления и соответственно распределение скоростей.

Источниковые члены с учетом противоточности движения фаз могут быть получены (с учетом испарения или конденсации) по следующим формулам:

$$R_{TG} = \frac{\Psi_a a_v \left(\alpha(T_L - T_G) + \beta \rho_G (C^* - C) Q_{GL} \right) - \rho_G Q_{GC^*}}{(V_{св} - \varepsilon_{ж})}; \quad (5)$$

$$R_{CG} = \frac{\Psi_a a_v \beta \rho_G (C^* - C)}{(V_{св} - \varepsilon_{ж})}; \quad (6)$$

$$R_{Pz} = \frac{\Psi_\gamma \Psi_a a_v \gamma \rho_G (U_0 + W_{гр})}{(V_{св} - \varepsilon_{ж})}. \quad (7)$$

где Ψ_a - коэффициент активной поверхности, включающий в себя и коэффициент смачиваемости [3], $\text{м}^2/\text{м}^2$; α , β , γ - коэффициенты переноса теплоты, массы и импульса в пограничном слое соответственно, $\text{м}/\text{с}$; U_0 , $W_{гр}$ - скорости на внешней границе осредненного пограничного слоя газовой фазы и на внешней границе пленки жидкости соответственно $\text{м}/\text{с}$; Ψ_γ - коэффициент, учитывающий несоответствие между полным сопротивлением (трения и формы) и сопротивлением трения; Q_{GL} - теплота, связанная с изменением агрегатного состояния, $\text{Дж}/\text{кг}$; Q_{GC^*} - теплота, выделяющаяся при возможном (в ходе расчетов) переохлаждении газовой фазы ниже равновесного состояния при заданном составе и давлении, $\text{Дж}/\text{кг}$. Теплота $Q_{GL} = \frac{\partial H}{\partial C(T,P)}$ определяется исходя из изменения энтальпии газа при конденсации компонента, $\text{Дж}/\text{кг}$. Теплота Q_{GC^*} может быть вычислена по следующей общей формуле:

$$Q_{GC^*} = \left[H_G^* - \left(H_G - \Psi_a a_v \left(\alpha(T_L - T_G) + \beta \rho_G (C^* - C) Q_{GL} \right) \right) \right] \Upsilon_{\Delta H} \quad (8)$$

где $\Upsilon_{\Delta H}$ - функция Хевисайда от аргумента $\left[H_G^* - \left(H_G - \Psi_a a_v \left(\alpha(T_L - T_G) + \beta \rho_G (C^* - C) Q_{GL} \right) \right) \right]$ (т.е. она равна единице, если аргумент больше нуля и равна нулю, если он меньше нуля); H_G^* - энтальпия газа, равновесного с жидкой фазой, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Коэффициент Ψ_γ , в общем виде, может быть выражен как:

$$\Psi_\gamma = \frac{(U_0 + W_{гр}) \frac{\xi_{н}}{8}}{\gamma}, \quad (9)$$

где γ - коэффициент переноса импульса, $\text{м}/\text{с}$.

Коэффициент переноса импульса, или коэффициент импульсоотдачи, широко применяемый авторами [6, 7] – аналогичный коэффициентам переноса массы (массоотдачи) и тепла (теплоотдачи).

Уравнения для коэффициентов обратного перемешивания для рассматриваемых насадок найдены по формулам, полученным в результате обработки экспериментов и приведенным в [4,6,8].

При недостатке экспериментальной информации о числе Пекле насадки допустимо использовать уравнения (1) с $D_{пГ} = 0$ ввиду уже указанной малости. В этом случае система уравнений удовлетворяет модели идеального вытеснения. В [9] на основе такой модели, названной, однако, дифференциальной, были рассчитаны профили температур и расходов для градирни с естественной тягой, удовлетворительно, согласующиеся с известными опытными данными. Похожая модель, также основанная на модели идеального вытеснения, разработанная Б. В. Проскуряковым [10], долгое время оставалась одной из ведущих для расчета промышленных брызгальных градирен.

Гидравлическое сопротивление насадок в расчете на единицу высоты определено по эмпирическим формулам полученным в [4,11].

Удерживающая способность по жидкой фазе находилась с использованием закономерностей пленочного турбулентного движения жидкости.

Средняя толщина слоя жидкости на поверхности насадок вычислялась в приближении пленочного течения по формуле (10) с постоянными $a = 5.419$, $b = 2.5$, $c = -7.5$ [12]:

$$\frac{Re_L}{k_a 4} \left(\frac{\delta_{п}}{\vartheta} \right)^{-\frac{3}{2}} + \phi = a + b \ln \left[k_a \left(\frac{\delta_{п}}{\vartheta} \right)^{\frac{3}{2}} + c \right]. \quad (10)$$

$$\vartheta = 3 \sqrt{\frac{v_L^2}{g}} \text{ называют приведенной толщиной пленки.}$$

Очевидно, что решение уравнений должны удовлетворять условиям соответствия начальным параметрам потоков на входе в аппарат, а также материального и энергетического баланса насадочного слоя как «черного ящика»:

$$[T_{LZ}, L_Z] = f_1(Z); [G_0, Cw_0, T_{G0}, P_0] = f_1(0); \quad (11)$$

$$(L_0 - L_Z) = (G_Z - G_0); (H_{L0}L_0 - H_{LZ}L_Z) = (G_Z H_{GZ} - G_0 H_{G0}). \quad (12)$$

Задача решения системы уравнений (1) и (2), таким образом, сводится к вариационной: поиска минимума невязки по условиям баланса (12) от явно заданных граничных условий (11). В условиях неявно заданных граничных условий первое приближение для газовой фазы предлагается вычислять без учета обратного перемешивания, то есть по модели идеального вытеснения, это позволит существенно ускорить сходимость вычислительной процедуры.

Коэффициенты передачи импульса, тепла и массы вычисляются с помощью интегрального метода, подробно описанного в [13]. Итоговая система уравнений этого метода записывается в характерных величинах турбулентного пограничного слоя в следующем виде:

$$\frac{u_*}{\gamma} = \int_0^{R_3} \frac{\rho_{G0} \tau}{\rho_G \left(1 + \frac{v_T}{v}\right)} dy_*; \quad (13)$$

$$\frac{u_*}{\beta} = \int_0^{R_3} \left(\frac{\frac{j}{Sc_T} \frac{\rho_{G0}}{Sc}}{\frac{j_{CT}}{Sc} \frac{\rho_G}{Sc_T + \frac{v_T}{v}}} \right) dy_*; \quad (14)$$

$$\frac{u_* \rho_{G0}}{\alpha} = \int_0^{R_3} \left(\frac{\frac{q}{Pr_T} \frac{\rho_{G0}}{Pr}}{\frac{q_{CT}}{Pr} \frac{\rho_G}{Pr_T + \frac{v_T}{v}}} \right) dy_*. \quad (15)$$

где u_* - динамическая скорость, м/с; $y_* = \frac{yu_*}{v}$ - безразмерная координата по высоте турбулентного пограничного слоя; R_3 – эффективная толщина осредненного турбулентного пограничного слоя в потоке газовой фазы у поверхности насадки; v , v_T - кинематические коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости соответственно, м²/с; Pr_T , Pr - числа Прандтля турбулентного и молекулярного переноса соответственно; Sc_T , Sc - числа Шмидта турбулентного и молекулярного переноса соответственно; τ - плотность потока импульса поперек пограничного слоя, Н/м²; j - плотность потока массы поперек пограничного слоя, кг/(с·м²); q - плотность потока тепловой энергии поперек пограничного слоя, Вт/м²; индексом «ст» здесь обозначены значения соответствующих величин на поверхности межфазного раздела.

Результаты расчетов профилей температур и концентрации паров воды в пирогазе по результатам решения уравнений (1) и (2) показаны на рисунках 1-4.

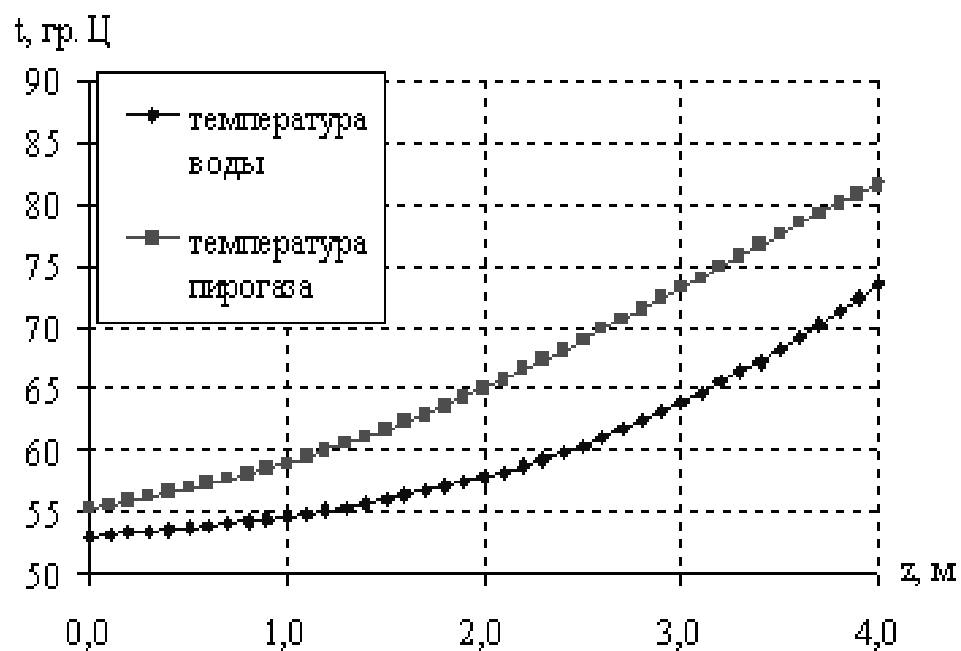


Рис. 1 - График распределения температур газовой и жидкой фаз по высоте насадочного слоя (сверху вниз), нижняя секция.

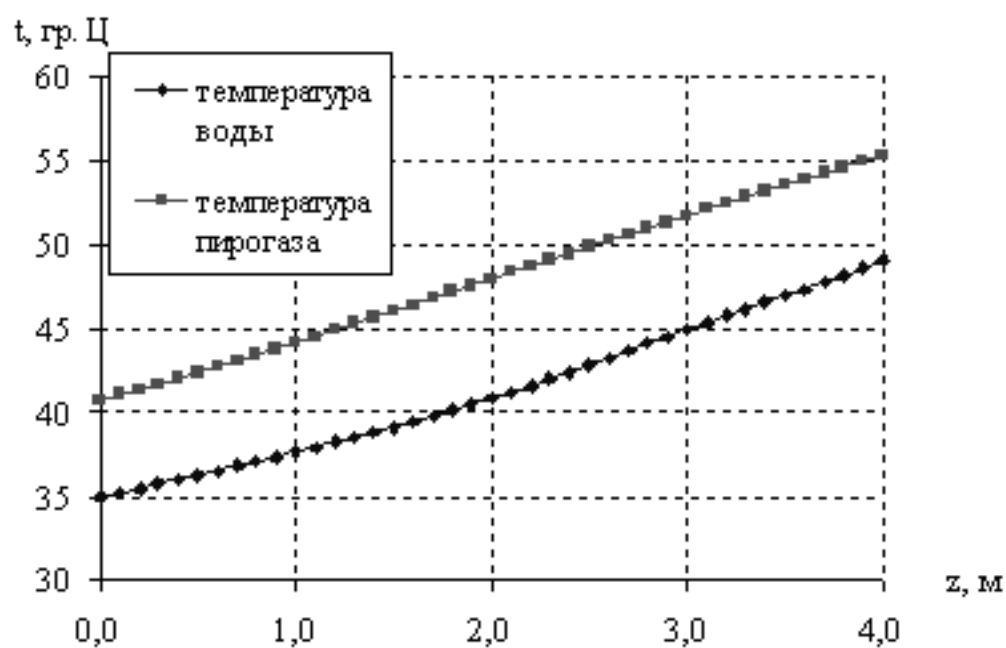


Рис. 2 - График распределения температур газовой и жидкой фаз по высоте насадочного слоя (сверху вниз), верхняя секция.

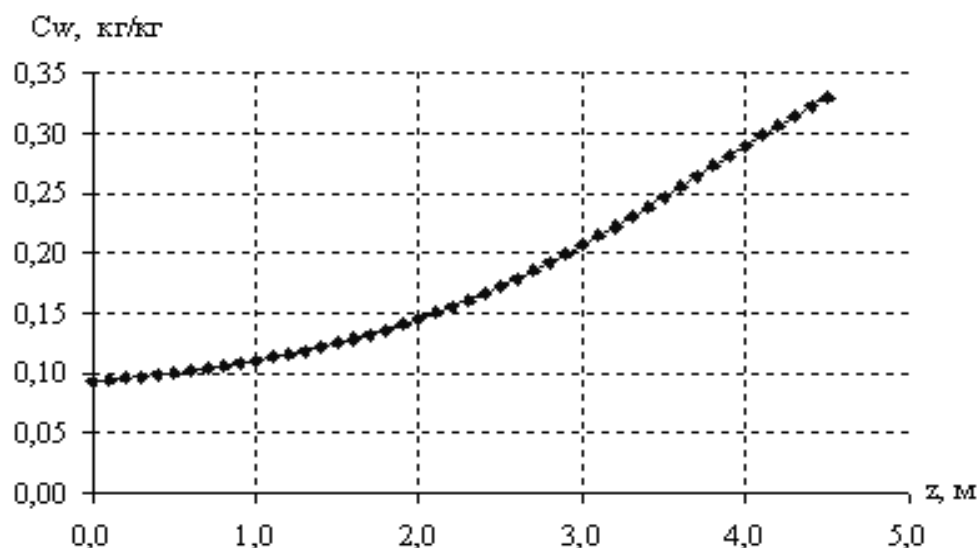


Рис. 3 - График распределения концентрации паров воды в газовой фазе по высоте насадочного слоя (сверху вниз), нижняя секция.

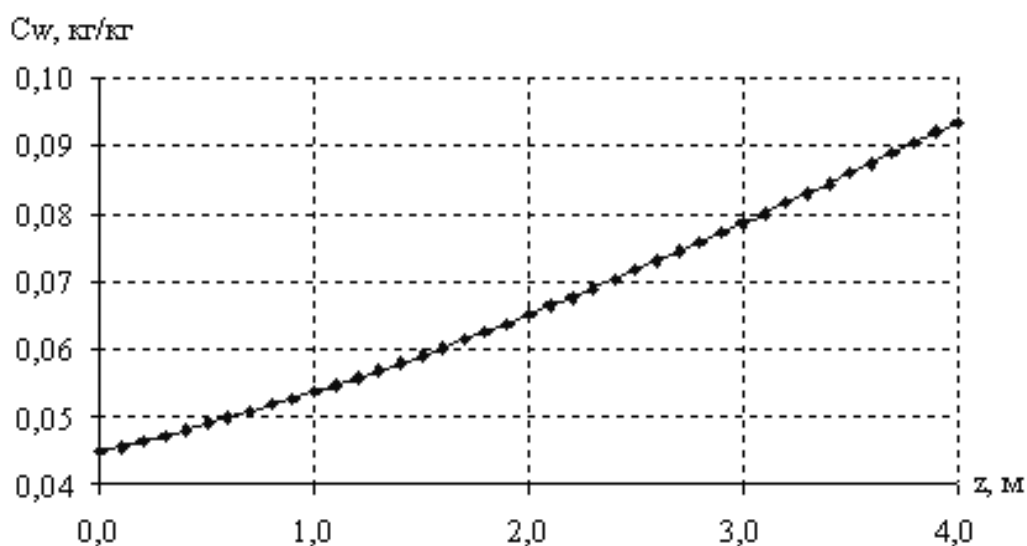


Рис. 4 - График распределения концентрации паров воды в газовой фазе по высоте насадочного слоя (сверху вниз), верхняя секция.

Показанные кривые на рис. 1-4 свидетельствуют о хорошей охлаждающей способности модернизированной колонны. В нижней секции, с установленными насадками *IRG*, температура пирогаза близко подходит к теоретическому пределу охлаждения (рис. 1). В верхней части, с насадками «Инжехим-2000», высота насадочного слоя меньше теоретически необходимой, однако, замена ее на регулярную нецелесообразна из условия равномерного орошения более напряженной по нагрузке нижней секции.

На основе выполненных расчетов разработаны технические решения по модернизации промышленной колонны охлаждения пирогаза на ОАО «Казаньоргсинтез». Внедрение насадок «Инжехим» обеспечило снижение температуры

пирогаза на выходе колонны и подтвердило правильность сделанных расчетов по показанной математической модели.

Выводы

Предложенная расчетная модель применима практически для всех типов аппаратов, использующих противоточное движение фаз при их непосредственном контакте. Взаимодействие фаз и характеристики насадок учитываются с помощью источниковых членов и коэффициентов обратного перемешивания. Для рассматриваемого здесь пленочного взаимодействия фаз предлагается метод вычисления на основе аналогии переноса импульса, массы и тепла в турбулентном пограничном слое.

Модель предназначена для применения в инженерной практике при условии программной реализации. Она избавлена от большинства недостатков предыдущих аналогов связанных с допущениями о постоянстве мольных или массовых расходов, но в то же время сохраняет простоту. В случае, когда требуется более подробный расчет поля скоростей и других значимых величин в двух- или трехмерном базисе показанные одномерные уравнения могут служить для задания первого приближения для ускорения сходимости итерационных процедур.

Список литературы:

1. Фарахов М.И. Энергоресурсосберегающие модернизации установок разделения и очистки газов и жидкостей на предприятиях нефтегазохимического комплекса: дис. д-ра техн. наук Казань: КГТУ, 2009.
2. Дмитриева Г.Б., Беренгаген М.Г., Каган А.М. [и др.] Сравнение тарельчатых и насадочных контактных устройств колонных аппаратов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2007. № 1. С. 9-10.
3. Рамм В.М. Абсорбция газов. Изд. 2-е, переработ, и доп. М.: Химия, 1976.
4. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Основы расчета и модернизация теплообменных установок в нефтехимии. Казань: Казанский гос. энерг. ун-т, 2010
5. Billet R. Packed towers in processing and environmental technology. Weinheim: VCH, 1995.
6. Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Гидромеханические процессы в нефтехимии и энергетике: Пособие к расчету аппаратов. Казань: Изд-во Казанского. Гос. ун-та, 2008.
7. Дьяконов С.Г., Елизаров В.И., Лаптев А.Г. Теоретические основы и моделирование процессов разделения веществ. Казань: Изд-во Казанского университета, 1993.
8. Повышение эффективности насадочных колонн щелочной очистки пирогаза в производстве этилена: дис. канд. техн. наук./ Шигапов И.М. Казань: КГТУ, 2000.
9. Солодов А.П., Романенко А.Н., Егорова Н.В. [и др.] Дифференциальная модель тепло-и массообмена в испарительных градирнях // Вестник МЭИ. 2005. № 2. С. 43-53.
10. Гончаров В.В. Брызгальные водоохладительные ТЭС и АЭС. Л.: Энергоатомиздат, 1989.
11. Ясавеев Х.Н., Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Модернизация установок переработки углеводородных смесей. - Казань КГЭУ, 2004.
12. Лаптев А.Г., Бажиров Т.С., Саитбаталов М.В. Модель гидродинамических характеристик пленочного течения // Вестник КГЭУ. 2010. Т 3. № 3. С. 18-23
13. Саитбаталов М.В., Лаптев А.Г. Математическая модель теплообмена в газовой фазе пленочных аппаратов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2010. №3. С. 28-38.

В. Ф. Беккер к.т.н.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Березниковский филиал
кафедра автоматизации технологических процессов
Россия, г. Березники
bekker@bf.pstu.ac.ru

ДИНАМИКА МЕХАНИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВИЖНОЙ ШАРОВОЙ НАСАДКИ

В соответствии с положениями теории бильярдov Синая рассматривается взаимодействие подвижной насадки внутри замкнутого рабочего объема, которое ведет к рассеянию направленной кинетической энергии. Приняты допущения, описана методика расчета динамических оценок для разного количества элементов: числа столкновений, быстрого промежутка времени, энергии всей массы подвижной насадки. Приведены вычислительные эксперименты и анализ полученных результатов.

Ключевые слова: подвижная насадка, теория бильярдov, число столкновений, быстрый промежуток времени.

Одной из аналогий, удобных для исследования систем, состоящих из множества подвижных частиц, каковой является абсорбер с подвижной насадкой, служат представления, используемые для анализа многомoleкулярных систем. Так для замкнутой многомoleкулярной системы в учении о тепле основополагающее значение имеет факт наличия равновесного состояния и неизбежности его наступления.

Рассмотрим механизм релаксации многочастичной системы, т.е. ее стремление к положению равновесия путем рассеяния направленной кинетической энергии, исключая соударение шаров (тел) между собой. Предположим, что имеется адиабатная оболочка с отверстием, в которое влетает некоторое количество (n) шаров, причем векторы скоростей влетающих тел строго параллельны между собой (moleкулярный пучок). Рассмотрим коллективное поведение и взаимодействие шаров, запертых внутри абсорбера после их проникновения туда. Используем для этого положения теории бильярдov Синая [4].

В самом начале результирующий импульс системы равен скалярной сумме всех импульсов влетевших внутрь шаров, поскольку импульсы шаров параллельны. Кинетическая энергия, переносимая суммарным импульсом, находится в обобщенной форме. После соударения со стенкой абсорбера шары разлетаются в различных направлениях, из-за кривизны стенок после соударения направления движения шаров различны. После отскока от стенки результирующий импульс шаров уменьшается, т. к. векторы скоростей беспорядочно движущихся шаров более не параллельны, а кинетическая энергия, переносимая суммарным импульсом, соответственно уменьшается. И в данном случае вырождение импульса, диссипация совместной энергии вызывается нецентральным соударением и ростом массы, участвующей во взаимодействии. Если шаров в пучке, направленном внутрь замкнутой полости, много, то после серии столкновений со стенками результирующий импульс системы будет стремиться к нулю. Здесь геометрия стенки изменяет направление импульса каждого тела, в результате снижается суммарный импульс и уменьшается кинетическая энергия

общего переноса. Такова природа диссипации совместной энергии в рассматриваемой ситуации согласно положениям теории бильярдов Синая, на которой рассматривается взаимодействие между подвижными шаровыми элементами в рабочем объеме абсорбера с псевдооживленной насадкой. Для этого оценивалось число столкновений между n элементами на прямой [2], а затем аналогичная задача в «сосуде» – на отрезке прямой [3]. Геометрическое решение задачи о числе столкновений между n шаровыми элементами подвижной насадки с массами $m_1, m_2, \dots, m_n$, упруго сталкивающимися на прямой, дает возможность получить искомую оценку аналитически и выписать ее явно в зависимости только от числа n шаров и от отношения максимальной массы шара $m_{\max}$ в системе к минимальной массе шара $m_{\min}$. В работе [1] показано, что число

столкновений в такой системе не превосходит $2 \left(8n^2(n-1) \frac{m_{\max}}{m_{\min}} \right)^{n-2}$. Энергия всей

системы шаров E в рассматриваемой системе отсчета $E = \sum_{i=1}^n m_i \frac{v_i^2}{2}$. Занумеруем

подряд моменты столкновений шаров: $t_1 < t_2 < t_3 < \dots$. Согласно закону сохранения импульса в момент t_k импульс каждой из столкнувшихся частиц изменяется на одну и ту же положительную величину, которую обозначим Δp_k . Пусть $p_i = m_i v_i$ – импульс отдельного шара, а $N = N(m_1, \dots, m_n)$ – общее число столкновений в рассматриваемой системе шаров за бесконечный промежуток времени. Оценка числа N проведена в следующей последовательности.

Оценена сумма $\Delta p_1 + \Delta p_2 + \dots + \Delta p_N$. Для этого умножен импульс каждого шара на его номер, в виде функция времени $P(t)$:

$$P(t) = 1 \cdot p_1(t) + 2 \cdot p_2(t) + \dots + n \cdot p_n(t) = \sum_{i=1}^n i \cdot p_i(t).$$

В работе [2] показано, что максимальное значение $P_{\max}$ функции $P(t)$ (верхняя оценка для суммы $\sum_{k=1}^N \Delta p_k$) равно $P_{\max} = \sqrt{2E \left(M_2 - \frac{M_1^2}{M} \right)}$, где $M = \sum_{i=1}^n m_i$ – масса

всех шаров, $M_1 = \sum_{i=1}^n i \cdot m_i$ – первый момент, $M_2 = \sum_{i=1}^n i^2 \cdot m_i$ – второй момент. При

$$\text{этом } \sum_{k=1}^N p_k \leq 2 \sqrt{2E \left(M_2 - \frac{M_1^2}{M} \right)}.$$

Вся ось времени t разбита на «быстрые промежутки», на каждом из которых какие-либо два соседних шара имеют большую относительную скорость и не сталкиваются друг с другом. Промежуток времени $[t_1, t_2]$ называют *быстрым*, если какие-то два соседних шара $i-1$ и i ни разу не сталкиваются в течение этого промежутка, причем их относительная скорость превышает некоторую положительную постоянную $c_i > 0$, $|v_i(t) - v_{i-1}(t)| > c_i$ при всех $t \in [t_1, t_2]$.

Покажем, что существует такой набор констант $c_1, c_2, \dots, c_n$, зависящих только от масс частиц и полной кинетической энергии E , и что объединение быстрых

промежутков времени по всем парам $(i-1, i)$ покрывает всю ось времени. Для этого

$$\text{введем число } c = \sqrt{\frac{E}{2M}} \bigg/ \sum_{i=1}^n \frac{1}{m_i}.$$

Для каждого $i = 2, 3, 4, \dots$ определяется соответствующее $c_i = c \frac{m_{i-1} + m_i}{m_{i-1} m_i}$.

Далее показано, что для каждого момента времени t существует такое i , что $|v_i(t) - v_{i-1}(t)| \geq c_i$. Это означает, что все быстрые промежутки покрывают полностью ось времени t .

Оценено количество быстрых промежутков. Поскольку максимальному по длине быстрому промежутку $[t_1, t_2]$ соответствует «сильный» удар некоторых шаров $i-1$ и i , происходящий или в момент t_1 или в момент t_2 . При этом для всех $t \in [t_1, t_2]$

$$|v_i(t) - v_{i-1}(t)| < c \frac{m_{i-1} + m_i}{m_{i-1} \cdot m_i}. \text{ Изменение импульса при этом ударе равно}$$

$$\Delta p_{(i-1,i)} = |v_i - v_{i-1}| \frac{m_{i-1} + m_i}{m_{i-1} \cdot m_i} > c. \text{ С другой стороны, } \Delta p_{(i-1,i)} \text{ равно какому-то } \Delta p_k, \text{ где}$$

k – номер момента t_k в последовательности всех моментов столкновений шаров, и поэтому изменение импульса при каждом сильном ударе не меньше c : $\Delta p_k > c$.

Следовательно, количество сильных ударов не больше чем $\sum_{i=1}^n \Delta p_k / c$. Учитывая

$$\text{формулы (1) и (2), получаем } \frac{\sum_{i=1}^n \Delta p_k}{c} \leq 4 \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_i} \right) \cdot \sqrt{M_2 M - M_1^2}.$$

Осталось заметить, что каждый момент сильного удара – конец отрезка $[t_1, t_2]$ – принадлежит не более чем двум быстрым промежуткам, стало быть, число быстрых промежутков не больше удвоенного числа сильных ударов, т. е. не превосходит

$$\text{величины } K = 8 \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_i} \right) \cdot \sqrt{M_2 M - M_1^2}. \text{ Оценено в соответствии с [2] число}$$

$$\text{столкновений } N(m_1, m_2, \dots, m_n). N(m_1, m_2, \dots, m_n) \leq 2 \left(16 \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_i} \right) \cdot \sqrt{M_2 M - M_1^2} \right)^{n-1}.$$

Выведем теперь общий результат о росте числа столкновений между шарами в одномерном «сосуде» – отрезке XU с упруго отражающими краями X и U . Для этого покажем, что число столкновений в системе из n шаров в одномерном сосуде XU растет не более чем с линейной скоростью по времени t . Иными словами, существуют такие константы C_1 и C_2 , не зависящие от начальных положений и скоростей шаров, а зависящие только от масс и полной энергии системы, что число столкновений в сосуде XU за время t не превосходит $N(t)$, ограниченное $N(t) \leq C_1 t + C_2$.

Положим длину отрезка XY равной 1. За время $\Delta t = \frac{1}{v_{\max}} = \frac{1}{\sqrt{2E/m_{\min}}} = \sqrt{\frac{m_{\min}}{2E}}$ ни один шар, начавший двигаться из точки X или

Y , не может долететь до концов отрезка XY . Поэтому за время Δt система шаров в «сосуде» XY не чувствует краев сосуда. Следовательно, за время Δt число столкновений шаров в сосуде XY между собой и об края X и Y не превосходит числа N_{3n} столкновений $3n$ шаров на всей бесконечной прямой (так, будто концы X и Y отсутствуют все это время).

За промежуток времени t , который можно покрыть отрезками Δt в количестве $k = \left[\frac{t}{\Delta t} \right] + 1$ ($[\cdot]$ – целая часть) произойдет, следовательно, не более $N(t) \leq \left(\left[\frac{t}{\Delta t} \right] + 1 \right) N_{3n} \leq N_{3n} \sqrt{\frac{m_{\min}}{2E}} + N_{3n} = c_1 t + c_2$, что и требовалось найти.

Рассмотрим конкретный пример для 1000 элементов шаровой насадки с массой отдельных шаров, равномерно распределенной от 1 г до 11 г, для промежутка времени 10 с. Выбраны начальные скорости, равномерно распределенные в пределах 1...6 м/с. Определим зависимость оценки числа столкновений шаров во времени в соответствии с найденными зависимостями. В среде MathCAD составлена программа расчета количества столкновений определена зависимость количества столкновений элементов шаровой насадки в объеме абсорбера от времени.

Кроме того, варьировалось количество шаров при линейном распределении ограниченной общей массы 6 кг и линейном распределении скоростей по элементам в заданном диапазоне 1...6 м/с. Полученные зависимости суммарной энергии и величины быстрых промежутков от количества шаров в абсорбере представлены соответственно на рис. 1 и 2.

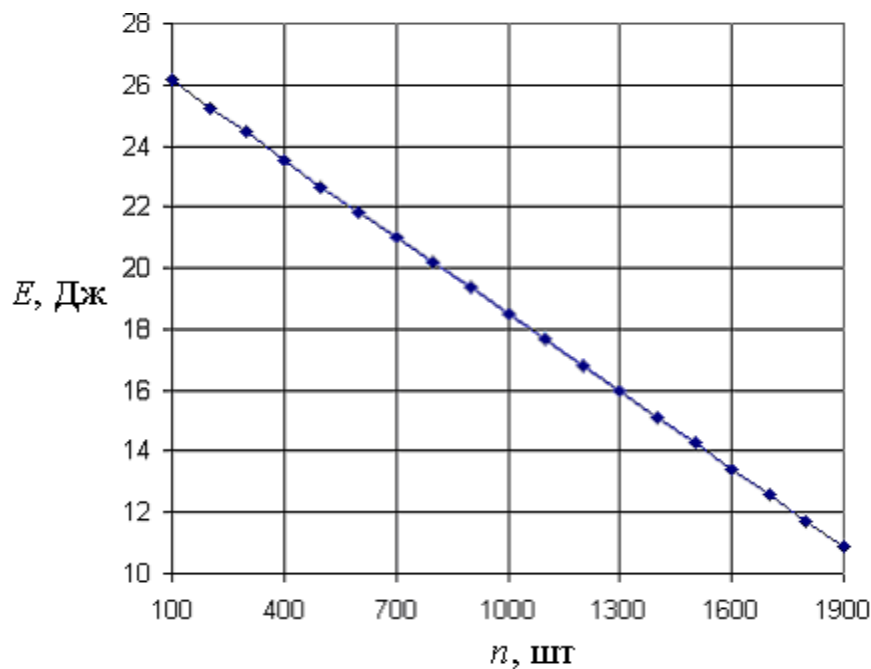


Рис.1. Зависимость энергии подвижной насадки от количества шаров.

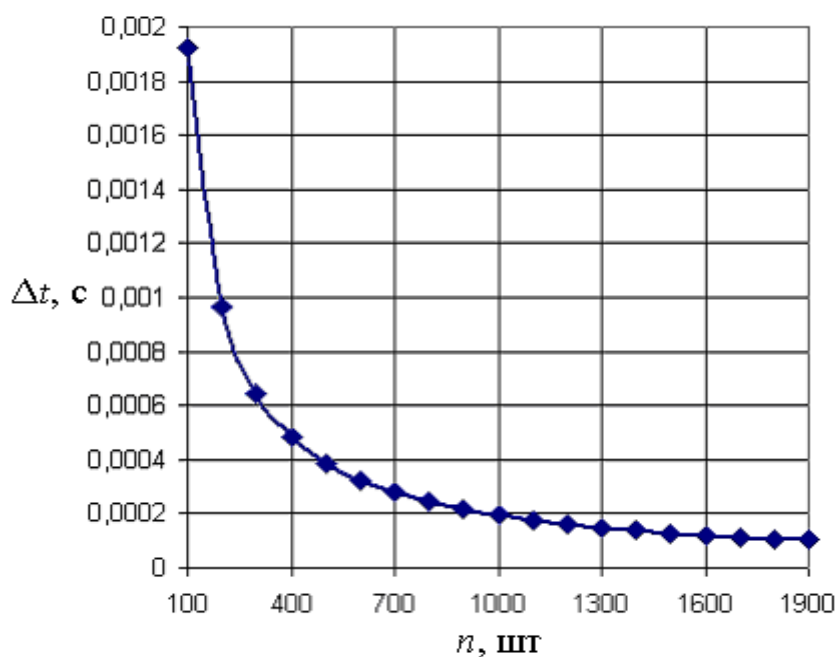


Рис.2. Зависимость быстрого промежутка времени от количества шаров.

Модель механического взаимодействия применена в качестве инструмента исследования динамики псевдооживленного слоя шаровой насадки в широком диапазоне конструктивных параметров [1]. В частности определено оптимальное распределение заданной общей массы материала по отдельным элементам насадки, максимизирующее количество столкновений элементов шаровой насадки в единицу времени.

Список литературы:

1. Беккер В.Ф. Оценка числа столкновений элементов подвижной насадки в рабочем объеме абсорбера. / В сб. «Наука в решении проблем Верхнекамского региона». – Березники: БФ ПермГТУ, 2006. – С. 256-264.
2. Гальперин Г.А. Упругие столкновения частиц на прямой // Успехи математических наук, 1978. Т.33, Вып.1.
3. Гальперин Г.А. О системах абсолютно упругих шаров, движущихся в пространстве или сосуда // Доклады АН СССР, 1979. Т.245, №2.
4. Синай Я.Г. Динамические системы с упругими отражениями // Успехи математических наук, 1970. Т.25, Вып.2.

А. В. Беляев к.т.н., А. С. Григоров

Череповецкий государственный университет
кафедра информационной безопасности
Россия, г. Череповец
andreygrigоров1986@gmail.com

ОБНАРУЖЕНИЕ АТАК НА БАЗЫ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫПОЛНЕНИЯ SQL-ЗАПРОСОВ

В данной работе представлены результаты эксперимента, показывающего применимость в качестве инструмента для обнаружения инсайдерских атак на базы данных метода обнаружения аномалий в SQL-запросах, основанного на оценке взаимосвязей между данными, попавшими в результат выполнения запроса.

Ключевые слова: обнаружение аномалий, системы обнаружения вторжений, инсайдерские атаки.

Согласно отчёту за 2011 год [4], представленному университетом Карнеги-Меллон, 21% атак на информационные системы составили инсайдерские атаки, причём отмечается тот факт, что количество злоумышленников, использующих специальное программное обеспечение, возросло по сравнению с 2010 годом на 9% и составило 22% от общего числа инсайдеров. Следует заметить, что инсайдерские атаки весьма сложно обнаружить, так как в роли злоумышленника могут выступать сотрудники организации, которые имеют доступ для работы с защищаемыми данными. Кроме этого сложность определения подобных атак заключается в том, что злоумышленник может получить доступ к данным не путём деструктивного воздействия на программное обеспечение, как это происходит, например, при выполнении SQL-инъекций, а путём использования своих служебных возможностей для получения дополнительных прав доступа к данным. Так, например, злоумышленник, имеющий возможности распределять права доступа к информационной системе, может разрешить себе или другим сотрудникам доступ к данным, к которым они ранее доступа не имели. При этом с точки зрения информационной системы действия по распределению прав администратором системы запрещёнными не являются и не нарушают стандартную логику работы информационной системы. Примером инсайдерской атаки на СУБД может быть попытка работника предприятия выполнить выгрузку всех данных из базы данных (в англоязычных источниках data harvesting attack) с целью дальнейшего использования в отличных от работы целей. В частности, наибольшее распространение получили кражи персональных данных.

Вопросам обнаружения аномалий в поведении пользователя на основе анализа SQL-запросов посвящены работы Ф. Валера, Д. Мутца, Д. Вигны [12], А. Кармы, Э. Бернито [5, 8, 9], А. Павлова [3], Н. Коломыцева, С. Носок [2], А. Спалки [11], К. Чанг [6] и др. Однако следует отметить тот факт, что большинство существующих методов ориентировано на борьбу с атаками на основе SQL-инъекций. Проблема же обнаружения инсайдерских атак на уровне СУБД изучена слабо, а системы обнаружения аномалий, построенные на предлагаемых подходах [9] и [10], имеют высокий уровень ложных срабатываний (17,1% и 15% соответственно), что показывает актуальность разработки и применения новых, более точных методов.

В данной работе приводится экспериментальное доказательство применимости метода [1] обнаружения аномалий в SQL-запросах, основанного на оценке взаимосвязей между данными, попавшими в результат выполнения запроса, для обнаружения инсайдерских атак. Основная идея метода [1] заключается в построении на основе результата выполнения SQL-запроса графа, отражающего взаимосвязи между записями: вершинам графа соответствуют выбранные записи, а наличие ребра между записями свидетельствует о том, что появление соединяемой им пары записей в результате выборки является ожидаемым событием при нормальной работе пользователя. Для принятия решения об аномальности SQL-запроса используется вычисленное значение плотности графа. Под плотностью графа G понимается величина $D(G)$, значение которой равно отношению суммы весов всех рёбер графа к максимально возможному весу, который мог бы иметь рассматриваемый граф. Если задать определённое пороговое значение α для плотности графа, то в зависимости от того, какую плотность будет иметь граф, можно будет судить об аномальности SQL-запроса. Если плотность будет выше установленного порога, то запрос признаётся нормальным, если ниже, то считается аномальным. Действительно, чем меньше плотность, тем меньше средний вес рёбер, а это означает меньшую зависимость вершин графа друг от друга. Таким образом, низкая плотность графа свидетельствует о том, что выбранные в результате запроса записи имеют между собой слабые связи, и, следовательно, получение такого результата не характерно для нормального поведения пользователя.

Построение графа G выполняется на основе информации, получаемой в результате обучения системы. Обучение осуществляется путём выполнения SQL-запросов, характерных для нормального поведения пользователей. На основе результатов выполнения обучающих запросов для каждой таблицы T_i строится граф G_{T_i} , отражающий существующие взаимосвязи между записями таблицы T_i : вершины, соответствующие каждой паре записей, попавшей в результат выполнения какого-нибудь запроса, соединяются ребром с весом равным 1.

Для проведения проверки работоспособности предлагаемого метода использовалась платформа для организации работы интернет-форумов JForum версии 2.1.9. В качестве тестовых данных использовались данные, взятые с форума JavaRanch [7], работающего под управлением JForum. В тестовую базу данных было перенесена структура, содержащая 19 подфорумов, 138 тем и 364 сообщения. Каждый из подфорумов в свою очередь относится к одной из 6 категорий. На рисунке 1 показано дерево категорий и связанных с ними подфорумов.

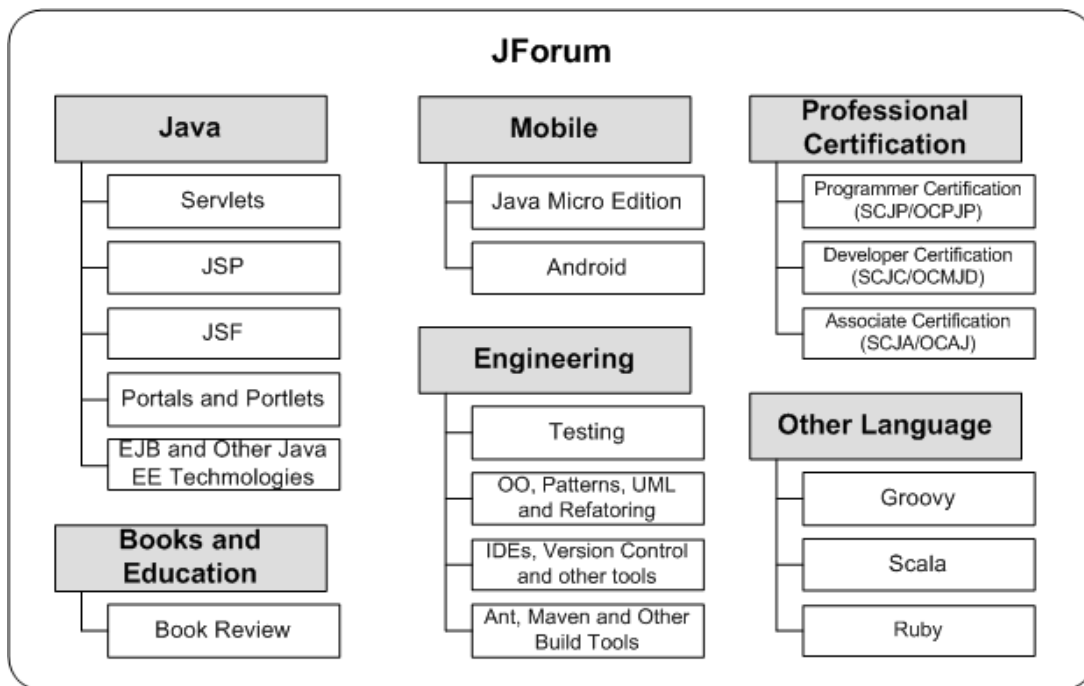


Рис. 1 – Тестовая база данных. Деление подфорумов по категориям.

В JForum реализована система распределения прав доступа к различным подфорумам. Каждый пользователь может быть отнесён к нескольким группам пользователей. Для каждой группы определяется то, к каким подфорумам или категориям подфорумов пользователь имеет доступ, и какие действия он может выполнять. Для выполнения тестирования были созданы шесть групп пользователей:

- Administration – полный доступ ко всем подфорумам;
- General – анонимный пользователь (доступ только на чтение к подфорумам категории Java);
- Group 1 – доступ ко всем подфорумам категорий Java, Mobile и Professional Certification;
- Group 2 – доступ ко всем подфорумам категорий Books and Education, Engineering, Other Language;
- Group 3 – доступ ко всем подфорумам категорий Java, Mobile, Books and Education, Other Language;
- Group 4 – доступ к подфорумам Servlets, JSP, JSF, Java Micro Edition, Programmer Certification (SCJP/OCPJP), Book Review, Testing, Groovy, Scala, Ruby.

Для каждой группы были созданы соответствующие ей пользователи:

- Administration: Admin;
- General: Anonymous (анонимный пользователь, под которым осуществляется работа до момента успешного прохождения аутентификации и авторизации);
- Group 1: User1_1, User1_2, User1_3;
- Group 2: User2_1, User2_2, User2_3;
- Group 3: User3_1, User3_2, User3_3;
- Group 4: User4_1, User4_2, User4_3.

Для обучения системы обнаружения аномалий (COA) использовались специально сформированные сценарии для среды автоматизированного тестирования Apache JMeter, которые имитировали работу нескольких пользователей с приложением JForum. Сценарии были созданы для пользователей: Admin, Anonymous, User1_1, User1_3,

User2_1, User3_1 и User4_1. Сам процесс обучения выглядел следующим образом. От JMeter веб-приложению JForum адресовался HTTP-запрос, характерный для нормальной работы того или иного пользователя. Этот запрос обрабатывался JForum, и в том случае, когда для формирования ответа требовались данные, хранящиеся в БД, приложение выполняло запрос к БД. Все SQL-запросы, передаваемые от JForum базе данных, а также результаты их выполнения перехватывались СОА и использовались для формирования профилей нормального поведения пользователей. На этапе обучения было обработано 89865 SQL-запросов.

Для проведения экспериментальной проверки для каждого пользователя был составлен набор SQL-запросов, характерных для его нормального поведения. Составленный набор отличается от набора запросов, использовавшихся на этапе обучения.

Для проверки возможности обнаружения атак, заключающихся в изменении роли (группы) назначенной пользователю, для каждого пользователя брался набор SQL-запросов, соответствующих его нормальному поведению, и выполнялся от имени как самого пользователя, так и от имени других пользователей. Определение аномалий проводилось при различных пороговых значениях α плотности графа G , взятых из отрезка от 0 до 1 с шагом 0.1. Запрос признавался аномальным, если $D(G) < \alpha$. Для каждой пары «Набор SQL-запросов / роль» вычислялась доля запросов, признанных аномальными.

В таблицах 1, 2 и 3 приведены результаты выполнения тестирования при пороговых значениях плотности α графа равных 0.8, 0.9 и 1.0. Строки в таблицах соответствуют наборам тестовых запросов, а столбцы – пользователям, от имени которых эти запросы выполнялись. Значения в ячейках таблиц – процент запросов, признанных аномальными.

Таблица 1 – Результат тестирования при пороге плотности графа 0.8.

	Anonymous	Admin	User1_1	User1_3	User2_1	User3_1	User4_1
Anonymous	0,00	5,96	5,30	5,30	6,62	7,28	5,30
Admin	1,65	0,00	5,94	5,94	9,24	5,28	6,93
User1_1	3,13	0,63	0,00	0,00	15,63	6,88	10,00
User1_3	7,05	3,21	0,00	0,00	15,38	10,26	13,46
User2_1	0,00	0,00	12,21	12,21	0,00	8,40	3,82
User3_1	4,83	3,45	8,97	8,97	11,03	0,00	6,21
User4_1	5,33	2,37	10,65	10,65	10,06	10,65	0,00

Как видно из таблицы 1 при пороге плотности равном 0.8 для всех пар на главной диагонали, то есть пар, в которых набор выполняемых запросов соответствовал профилю нормального поведения пользователя, для которого он составлялся, количество запросов, признанных аномальными, равно 0. Заметим, что также аномальных запросов не обнаружено для пар (User1_1, User1_3) и (User1_3, User1_1). Это закономерно, так как пользователи User1_1 и User1_3 относятся к одной и той же группе пользователей, а, следовательно, имеют доступ к одним и тем же данным и могут выполнять одни и те же действия.

Таблица 2 – Результат тестирования при пороге плотности графа 0.9.

	Anonymous	Admin	User1_1	User1_3	User2_1	User3_1	User4_1
Anonymous	0,00	6,62	6,62	7,28	9,93	7,95	5,96
Admin	9,24	0,00	5,94	6,60	10,89	5,94	7,59
User1_1	13,75	0,63	0,00	1,25	20,00	8,75	12,50
User1_3	19,23	3,85	0,00	1,28	20,51	12,82	17,31
User2_1	11,45	0,00	12,21	13,74	1,53	9,92	5,34
User3_1	14,48	4,14	8,97	10,34	16,55	2,07	8,97
User4_1	15,98	2,96	11,83	12,43	12,43	11,24	0,59

Из приведённых в таблице 2 данных видно, что при использовании порога плотности графа равном 0.9 появились ложноположительные срабатывания алгоритма (например, пара (User3_1, User3_1)), когда SQL-запросы пользователя оценивались на основе построенного на этапе обучения профиля нормального поведения этого же пользователя и были признаны аномальными.

Таблица 3 – Результат тестирования при пороге плотности графа 1.0.

	Anonymous	Admin	User1_1	User1_3	User2_1	User3_1	User4_1
Anonymous	0,66	7,95	9,27	9,27	27,15	9,93	7,95
Admin	18,81	0,66	15,18	15,18	19,80	12,21	13,53
User1_1	22,50	3,13	1,25	2,50	40,63	13,75	17,50
User1_3	29,49	6,41	2,56	1,28	40,38	19,23	22,44
User2_1	29,77	1,53	32,82	32,82	1,53	19,85	10,69
User3_1	21,38	6,90	17,24	17,24	28,97	2,07	11,03
User4_1	27,81	4,14	20,71	20,71	24,26	17,75	0,59

В таблице 3 представлены результаты, полученные при использовании порога плотности графа равного 1. Пороговое значение равное 1 предъявляет жёсткие требования к структуре графа: между каждой парой вершин в графе должно существовать ребро с весом равным 1. Любой другой граф, содержащий хотя бы одно ребро весом менее 1, будет иметь плотность менее 1. Следовательно, SQL-запрос, соответствующий этому графу, будет признан аномальным.

Использование нулевого порога плотности равносильно отказу от проведения оценки аномальности запроса, так как какой бы запрос не был выполнен, он всегда будет признан нормальным. С другой стороны пороговое значение плотности равное 1 может привести к большому количеству ложных срабатываний, когда нормальный запрос ошибочно будет признан аномальным. Выбор оптимального порогового значения плотности графа может быть осуществлён, например, на основе следующего критерия

$$\begin{cases} A_{\alpha} + B_{\alpha} \rightarrow \min \\ \alpha \in [0, 1] \end{cases}$$

где A_{α} – вероятность ошибки I-го рода (ложноположительное срабатывание), а B_{α} – вероятность ошибки II-го рода (ложноотрицательное срабатывание) при заданном пороге плотности равном α . Результаты экспериментов показали, что оптимальное значение порога плотности графа равно 0,7-0,8.

Следует также отметить, что не все запросы, являющиеся характерными для пользователя, относящегося к одной группе пользователей, являются аномальными для

пользователя из другой группы. Так, например, различные группы пользователей могут иметь доступ к одним и тем же данным, а, следовательно, выполнение SQL-запросов, выбирающих эти данные, будет являться нормальным поведением как для пользователей из одной группы, так и из другой.

Полученные в ходе выполнения эксперимента результаты позволяют сказать, что при достаточном уровне обучения СОА метод обнаружения аномалий в SQL-запросах, основанный на оценке внутренней структуры результата выполнения запроса, позволяет детектировать аномальное поведение пользователя, ставшее следствием изменения прав доступа, с уровнем ложноположительных срабатываний алгоритма распознавания не более 2,56%.

Список литературы:

1. Григоров А.С. Обнаружение аномалий с SQL-запросах к базам данных на основе оценки внутренней структуры результатов выполнения запросов. // Научно-технический вестник Поволжья. №6 2011 г. - Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2011. - с. 146-151.
2. Коломыцев М., Носок С. Аудит аномального поведения пользователей баз данных // Правовое, нормативное и метрологическое обеспечение системы защиты информации в Украине. Научно-технический сборник. - Киев, 2008.
3. Павлов А.В. Обнаружение аномальной активности в реляционных базах данных на основе искусственных иммунных систем с отрицательным отбором. // Научно-технический вестник Поволжья. №1 2011 г. - Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2011. - с. 166-168.
4. 2011 CyberSecurity watch survey: Organizations need more skilled cyder professionals to stay secure. URL: <http://www.cert.org/archive/pdf/CyberSecuritySurvey2011.pdf> (дата обращения: 26.03.2012).
5. Bertino E., Kamra A., Terzi E., Vakali A. Intrusion Detection in RBAC-administered Databases // ACSAC '05 Proceedings of the 21st Annual Computer Security Applications Conference, 2005 – P. 170-182.
6. Chung C. Y., Gertz M., Levitt K. DEMIDS: A Misuse Detection System for Database Systems // In Third Annual IFIP TC-11 WG 11.5 Working Conference on Integrity and Internal Control in Information Systems, Kluwer Academic Publishers, November 1999 – P. 159-178.
7. JavaRanch. URL: <http://www.coderanch.com/forums> (дата обращения: 21.08.2011).
8. Kamra A., Bertino E., Lebanon G. Mechanisms for Database Intrusion Detection and Response // IDAR '08 Proceedings of the 2nd SIGMOD PhD workshop on Innovative database research – P. 31-36.
9. Kamra A., Terzi E., Bertino E. Detecting anomalous access patterns in relational databases // The VLDB Journal. Volume 17, Number 5 – P. 1063-1077.
10. Mathew S., Petropoulos M., Hung Q. Ngo, Shambhu Upadhyaya. A Data-Centric Approach to Insider Attack Detection in Database Systems // Recent Advances in Intrusion Detection: 13th International Symposium, RAID, 2010 – P. 382-401.
11. Spalka A., Lehnhardt J. A comprehensive approach to anomaly detection in relational databases // In DBSec, 2005 – P. 207–221.
12. Valeur F., Mutz D., Vigna G. A Learning-Based Approach to the Detection of SQL Attacks // Conference on Detection of Intrusions and Malware and Vulnerability Assessment (DIMVA), 2005.

**Г. Н. Беляев д.т.н., В. Л. Долганов к.т.н., С. Х. Загидуллин д.т.н.,
Ю. И. Хвастухин д.т.н., Б. Е. Шенфельд д.т.н.**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
ФГУП «УралНИИЭкология»
Россия, г. Пермь
zsh@cpl.pstu.ru

ГРАНУЛИРОВАНИЕ ГЛИНИСТО-СОЛЕВЫХ ШЛАМОВ – ОТХОДА ПРОИЗВОДСТВА КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ

Установлена принципиальная возможность совместного гранулирования глинисто-солевых шламов и пылевидного хлористого калия в аппарате с псевдоожиженным слоем. Агрохимические испытания показали высокую эффективность полученного калийного удобрения на урожайность силосных культур. Результаты исследования могут быть использованы для проектирования укрупненной опытной установки гранулирования производительностью 2-3 т/ч.

Ключевые слова: пылевидный хлористый калий, глинисто-солевые шламы, псевдоожиженный слой, гранулирование.

Производство хлористого калия, являющегося основным видом калийных удобрений, связано с образованием значительных количеств отходов, в том числе глинисто-солевых шламов (ГСШ). В настоящее время большая часть ГСШ сбрасывается в открытые шламохранилища [1]. При этом наносится значительный ущерб окружающей среде и теряется большое количество хлористого калия.

Известно, что в состав ГСШ, наряду с хлористым калием, входят полезные для растений элементы *Ca*, *Na*, *Mg*, *S*, а также микроэлементы *B*, *Si*, *Mn* и другие, что определяет благоприятные свойства этого отхода как удобрения [2]. Однако, ввиду недостаточной концентрации основного питательного компонента – хлористого калия (не более 10 – 15 %) и высокого содержания влаги (до 70 %), непосредственное использование глинисто-солевых шламов в качестве удобрения нецелесообразно.

Одним из перспективных путей улучшения физических и агрохимических свойств этих шламов является их обезвоживание и гранулирование совместно с различными добавками. Для повышения концентрации полезного компонента – хлористого калия в качестве добавки целесообразно использовать тонкодисперсную пыль, образующуюся в значительных количествах при сушке хлористого калия.

Исследование процесса гранулирование смеси глинисто-солевых шламов и тонкодисперсной пыли *KCl* проводили в высокоинтенсивном грануляторе с псевдоожиженным слоем [3]. Гранулятор (рис. 1) представляет собой футерованную шамотом вертикальную цилиндрическую шахту 1, разделенную газораспределительной решеткой 2 на топочную камеру и зону гранулирования. Внутренний диаметр аппарата составляет 0,4 м, общая высота около 3 м.

В качестве топлива использовали природный газ, который через вентиль 3, подавали к горелке 4, оборудованной блоком автоматического управления. Воздух на горение топлива поступал из воздуховода через расходомерное устройство 5 и вентиль 6. Вторичный воздух на разбавление продуктов горения подавали через расходомер 7 и

вентиль 8. При необходимости дополнительное количество вторичного воздуха подводят в топочную камеру гранулятора через вентиль 9.

Циклон 14 предназначен для очистки отходящего запыленного газа, бункер 15 служил для первоначальной загрузки гранулированного продукта в аппарат. Он также может быть использован для дозирования мелких фракций гранул в процессе работы аппарата с целью корректировки гранулометрического состава готового продукта.

Порядок экспериментов был следующий. Через бункер 15 загружали определенное количество заранее приготовленного гранулированного хлористого калия, который при помощи топочных газов переводили в псевдоожиженное состояние и разогревали до $280 - 330^{\circ}\text{C}$. После этого из бака с мешалкой 10 через расходомерное сопло 11 при помощи

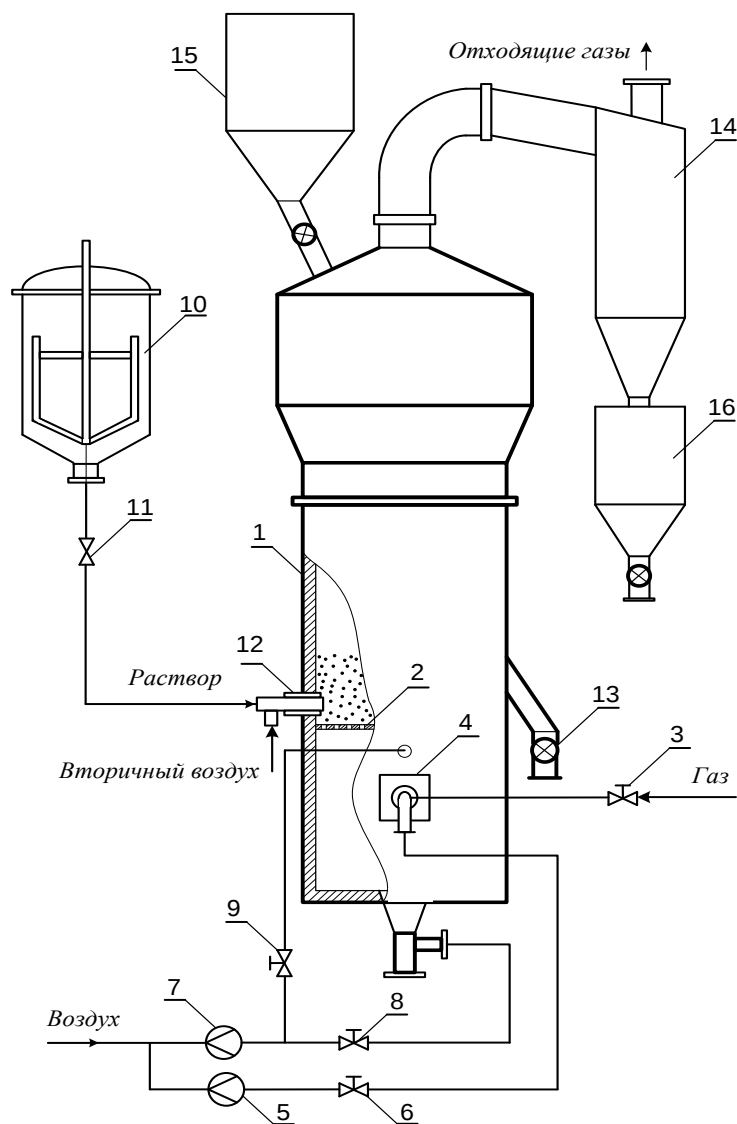


Рис. 1 – Схема гранулятора с псевдоожиженным слоем:
 1 – шахта; 2 – газораспределительная решетка; 3, 6, 8, 9 – вентили;
 4 – горелка; 5, 7 – расходомерные устройства; 10 – бак; 11 – сопло;
 12 – форсунка; 13 – устройство для выгрузки; 14 – циклон;
 15 – бункер для загрузки; 16 – бункер для выгрузки.

пневматической форсунки 12 в псевдоожиженный слой постепенно начинали подавать исходную сырьевую смесь, состоящую из ГСШ и тонкодисперсного хлорида калия. При этом непрерывно контролировали температуру слоя, поддерживая ее в пределах 140 – 160 °С.

По мере накопления количества образующихся гранул, о чем свидетельствовало возрастание гидравлического сопротивления псевдоожиженного слоя до заданного предельного значения, производили частичную выгрузку материала из аппарата при помощи устройства 13. Таким образом, гранулятор работал при непрерывной подаче исходной сырьевой смеси и циклической выгрузке готового продукта.

В работе использовали промышленные образцы ГСШ и пылевидного хлористого калия Второго Березниковского калийного рудоуправления ОАО «Уралкалий». Состав исходного сырья представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика ГСШ и пылевидного хлористого калия

Наименование сырья	Жидкая фаза, масс. %					Твердая фаза, масс. %					
	КС I	NaC I	MgC I ₂	CaS O ₄	H ₂ O	KCl	NaC I	MgC I ₂	CaS O ₄	Нерастворимый остаток	H ₂ O
ГСШ	9,9	18,2	0,8	0,3	70,8	24,3	10,2	0,3	4,6	60,6	0,4
Пылевидный хлористый калий	–	–	–	–	–	93,6	2,9	0,2	1,7	1,4	0,2

Известно, что пылевидный хлористый калий, образующийся при сушке флотационного концентрата, содержит значительное количество флотационных реагентов (более 300 г на тонну продукта), которые ухудшают смачиваемость и препятствуют процессу гранулирования [3].

Ранее было показано, что существенное повышение смачиваемости и улучшение условий гранулирования пылевидного хлористого калия может быть достигнуто за счет добавок лигносульфонатов [4]. В качестве источника лигносульфонатов натрия в работе использовали сульфитно-дрожжевую бражку марки КБЖ – побочный продукт Соликамского ЦБК, которую вводили в исходную сырьевую смесь в количестве 2 – 3 %.

Результаты опытов показали, что при обезвоживании смеси пылевидного хлористого калия и глинисто-солевых шламов в аппарате с псевдоожиженным слоем достигается практически полное гранулирование материала. Вынос не гранулированной части материала из слоя в систему пылеулавливания в изученном диапазоне скоростей газа от 1,5 до 2,2 м/с и числах псевдоожижения 2–3 не превышал 5–10 %. Остаточное влагосодержание гранулированного продукта при температуре в слое 140 – 160 °С не превышало 0,1 – 0,5 масс. %.

Из рис. 2 видно, что в процессе гранулирования происходит постепенное увеличение эквивалентного диаметра гранул во времени с соответствующим уменьшением выхода гранул товарного размера (от 4 до 1 мм).

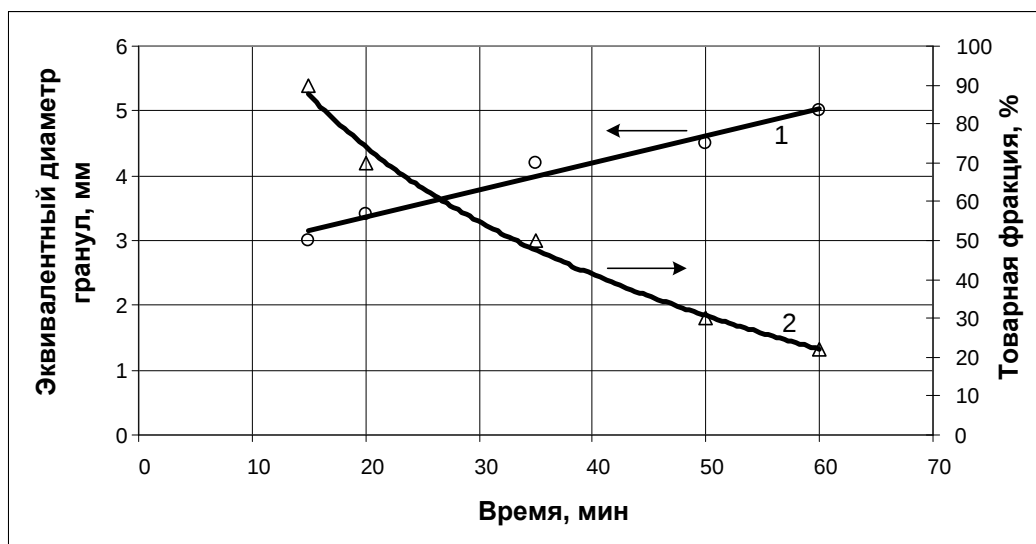


Рис. 2 – Изменение во времени эквивалентного диаметра гранул (1) и содержание товарной фракции (2) без внешнего рецикла.

Практически все гранулы выгружаемого продукта имеют правильную сферическую форму без частиц остроугольной формы.

Оба эти фактора свидетельствует о том, что в изученных технологических условиях процесс гранулирования протекает преимущественно по «нормальному» механизму, то есть путем многократного увлажнения гранул сырьевой смесью с последующей сушкой с образованием на их поверхности твердой и достаточно прочной корочки. За счет этого происходит послойное увеличение размеров гранул. Термическое дробление и генерирование за счет этого новой популяции мелких гранул практически не происходит.

При использовании внешнего рецикла в виде мелких фракций продукта размером менее 1,5 мм в количестве 15 – 25 % от массы слоя средний размер частиц в течение 15 – 20 мин стабилизировался на уровне 2,5 – 3,0 мм. В этих условиях выход гранул товарной фракции составляет 75 – 80 % и одновременно достигается повышение однородности фракционного состава продукта.

Получаемый готовый продукт в зависимости от соотношения количества ГСШ и пылевидного хлористого калия в исходной сырьевой смеси имеет следующий химический состав: KCl – 57,5÷67,1%; $NaCl$ – 16,1÷22,5%; $MgCl_2$ – 1,1÷2,2%; $CaSO_4$ – 2,5÷3,5%; нерастворимый остаток – 6,2÷8,6%; H_2O – 0,2÷0,4%. Насыпная плотность гранул составляет 850÷870 кг/м³.

Одной из важнейших характеристик гранулированных удобрений является механическая прочность гранул. Установлено, что основное влияние на прочность сухих гранул оказывает величина влажности исходной суспензии. С увеличением ее прочность гранул возрастает. Это объясняется различным структурно-текстурным строением гранул.

Как показали результаты микроскопических наблюдений, выполненные по известной методике [5], гранулы, получаемые из исходной сырьевой смеси с различной влажностью, имеют отличные друг от друга кольца «нормального» роста. Более тонкие кольца получаются при сушке и гранулировании разбавленных смесей и характеризуются повышенной плотностью, а, следовательно, и прочностью фазовых контактов, армирующих структуру гранулы.

На прочность гранул удобрений большое влияние оказывает также гигроскопическое увлажнение продукта при контакте с атмосферным воздухом. Установлено, что по мере увлажнения гранул прочность монотонно убывает и при влажности 2,5 – 3,5 % она составляет 2,5 – 1,5 МПа. Дальнейшее увлажнение приводит практически к полной потере прочности.

Для определения граничных условий бестарного хранения и транспортирования продукта были изучены гигроскопические свойства гранул. Исследования проводили в гигростате ПО-34М, позволяющем поддерживать заданную относительную влажность воздуха (ϕ) с точностью ± 2 %. Увлажнение пробы проводили при температуре 25 °С в условиях интенсивной циркуляции насыщающего воздуха через тонкий слой гранул. О сорбционных свойствах судили по изменению массы удобрения во времени.

На рис. 3 приведена изохрона гигроскопического увлажнения продукта за 8 часов в зависимости от относительной влажности воздуха.

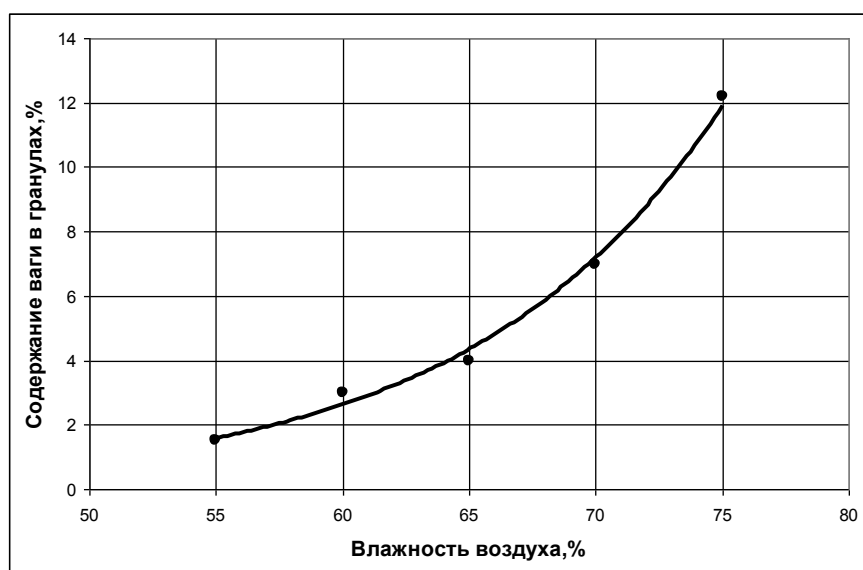


Рис. 3 – Изохора сорбции влаги гранулами продукта в динамических условиях.

Принятая длительность опыта оказалась достаточной для практически полного насыщения продукта.

Как видно из графика, при ϕ , равной 60 – 65 %, сорбируется 2 – 4 % влаги. В указанных условиях статическая прочность гранул фракции 2,5 мм остается достаточно высокой и составляет 1,5 – 2,5 МПа. Такая прочность является вполне достаточной для сохранности продукции в условиях бестарного хранения и транспортирования продукции [6]. Расширение диапазона условий хранения возможно при использовании герметичной тары, а также за счет модифицирования гранул специальными методами.

Благодаря высокому содержанию галопелитов, которые равномерно обволакивают внутреннюю структуру гранул, полученный продукт должен иметь меньшую по сравнению со стандартным гранулированным хлористым калием интенсивность растворения. Это преимущество обеспечивает уменьшение степени вымывание питательных веществ удобрения из почвы грунтовыми водами и продление срока его действия.

На рис. 4 приведены кинетические кривые растворения гранул стандартного гранулированного хлористого калия (95 % KCl) и удобрения на основе глинисто-солевых шламов, полученные в идентичных условиях при растворении навески 2 г

удобрения в проточной измерительной ячейке при постоянном расходе воды, равном 100 мл/мин.



Рис. 4 – Кинетика растворения гранулированного хлористого калия (1) и гранулированного калийно-шламового удобрения (2).

Об интенсивности растворения судили по характеру изменения величине электрического сигнала, который в условиях опыта был практически пропорционален концентрации растворенных солей. Полученные данные подтвердили высказанное предположение. Интенсивность растворения нового вида удобрения в принятых условия испытаний по сравнению со стандартным гранулированным хлористым калием понижается в несколько раз, а длительность растворения увеличивается в 3 – 4 раза.

Опытная партия гранулированного калийно-шламового удобрения (ГКШУ) в количестве около 50 кг была использована для проведения специальных исследований по определению его агрохимической эффективности на урожайность и качество силосных культур смешанного посева – гороха, овса, подсолнечника и картофеля и сравнение по сравнению с глинисто-солевыми шламами, хлористым и сернокислым калием.

Результаты полевого опыта показали, что гранулированное калийно-шламовое удобрение заняло промежуточное положение между стандартным калийным удобрением и ГСШ по влиянию на урожайность культур смешанного посева. Это удобрение хорошо обеспечивает потребность растений в калии, однако магния в этом удобрении недостаточно и необходимо его дополнительное внесение.

Таким образом, сушка смеси глинисто-солевых шламов с пылевидным хлористым калием в аппарате с псевдоожиженным слоем позволяет обеспечить эффективное гранулированием исходного материала с получением нового высокоэффективного вида калийных удобрений. При использовании внешнего рецикла мелких гранул в количестве 15 – 25 % достигается выход товарной части продукта на уровне 75 – 80 %. Полученные гранулы отличаются высокой прочностью и при относительной влажности воздуха в пределах 60 – 65 % пригодны для бестарного хранения и транспортирования.

Результаты исследований могут быть использованы для проектирования полупромышленной грануляционной установки непрерывного действия производительностью 2 – 3 т/ч с целью уточнения основных аппаратурно-

технологических параметров процесса и получения промышленных партий нового вида калийного удобрения для дальнейшего изучения их транспортных свойств и более длительных агрохимических испытаний.

Список литературы:

1. Технология калийных удобрений: учебное пособие для вузов / В. В. Печковский [и др.]; Под ред. В. В. Печковского.— 2-е изд., перераб. — Минск: Вышэйш. шк., 1978.— 273 с.
2. *Яржемская Е.А.* Вещественный состав галопелитов. – Тр. ВНИИГ, 1954, вып. 29. – С. 260.
3. *Фролов В.Ф.* Гранулирование во взвешенном слое / В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. – Санкт–Петербург.: Химиздат, 2007. – 279 с.
4. *Загидуллин С.Х., Тетерина Н.Н., Каиштанов В.М., Шкловская Е.Л.* Влияние лигносульфонатов на гранулирование тонкодисперсного хлористого калия // Журнал прикладной химии, 1982, № 4. – С. 730 – 736.
5. *Яржемский Я.Я.* Микроскопическое изучение галогенных пород. – Новосибирск. Сибирское отделение.: Наука, 1966. – 320 с.
6. *Кувшинников И.М.* Минеральные удобрения и соли: Свойства и способы их улучшения. – М.: Химия, 1987. – 256с.

Р. А. Биколов к.т.н., Ф. Г. Карих д.т.н., Н. Н. Сафронов д.т.н.

Камская государственная инженерно-экономическая академия (ИНЭКА)
факультет автоматизации и прогрессивных технологий
кафедра МиТЛП
Россия, г. Набережные Челны
bikulov_uvr@mail.ru

ЛИТАЯ ВСТАВКА ШТАМПА ГОРЯЧЕГО ОБЪЁМНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ИЗ ДИСПЕРСНЫХ ОТХОДОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ

В работе представлены результаты по сравнению свойств отливок вставки штампа из стали 3Х5МФНСЛ и стали, полученной из дисперсных отходов машиностроения методом прямого синтезирования в специализированном электротермическом плавильном агрегате.

Ключевые слова: штампы горячего объемного деформирования, поковка, сталь 3Х5МФНСЛ, формовочная смесь, дисперсные отходы машиностроения.

Штампы горячего объемного деформирования работают в тяжёлых условиях, обусловленных воздействием динамических и статических нагрузок при повышенных температурах инструмента 523÷623 К. В ОАО «КАМАЗ-металлургия» штампы изготавливаются как методом литья, так и из кованных кубиков.

Нами проведено исследование по сравнению свойств отливок вставки штампа для получения поковки - вилки карданного вала автомобиля «КАМАЗ». Отливки вставки получали из расплавов, приготовленных по базовому технологическому варианту ОАО «КАМАЗ-металлургия» и опытному из дисперсных отходов заводов ОАО «КАМАЗ» путём прямого синтезирования в специализированном электротермическом плавильном агрегате [2]. Отливка вставки имеет массу 85 кг и изготавливается из стали 3Х5МФНСЛ.

Для обеспечения высоких требований, предъявляемых к стальной отливке из легированной стали по точности размеров и шероховатости поверхности, последняя получается путём литья в разовые формы, изготовленные из высокоогнеупорных зернистых материалов с применением термореактивных синтетических связующих. В качестве наполнителя формовочной смеси используется цирконовый зернистый концентрат (КЦЗ-1 ОСТ48-82-74) с размером частиц 100÷160 мкм округлой формы. В качестве связующего, расход которого составляет 2.5÷3.2 % (массовая доля) по отношению к наполнителю, используется термореактивная фенолформальдегидная смола СФП-О11Л ОСТ6-05-441-78 (пудербакелит). В состав формовочной смеси входит также смачиватель в количестве 0.2 % (массовая доля) по отношению к наполнителю. В качестве смачивателя используется керосин ГОСТ 18499-73.

Литейная форма для получения отливки вставки состоит из двух полуформ. В верхней полуформе выполняется прибыльная часть и литниковая система. В нижней полуформе расположена отливка так, что в период заливки и затвердевания поверхность ручья отливки находится внизу. Подвод металла к отливке осуществляется по разьёму формы. Заливка собранных полуформ производится без применения опорного материала. Перед заливкой формы нагружают грузами.

Приготовление расплава штамповой стали по базовому варианту осуществляют в индукционной сталеплавильной печи ИСТ-1/0,5 ёмкостью 1 т жидкого металла с кислой кварцитовой футеровкой. В ОАО «КАМАЗ-металлургия» требования к химическому составу указанной марки стали следующие, % (массовая доля): С - 0.20÷0.30; Mn – 0.80÷1.00; Si – 0.80÷1.00; Cr – 4.50÷5.00; Mo -1.20÷1.50; V- 0.20÷0.40; Ni – 1.10÷1.20.

Отливка вставки штампа подвергается термической обработке, которая делится на предварительную и окончательную. Предварительная термообработка - отжиг производится по следующему режиму. Отливка вставки штампа подвергается ступенчатому нагреву: на 1 ступени отливка нагревается до температуры 923÷973 К и выдерживается в течение 5 часов; на 2 ступени отливка нагревается до температуры 1133 К и выдерживается в течение 8 часов. После этого отливка охлаждается вместе с печью до температуры 773 К и далее на воздухе до комнатной температуры.

Окончательная термообработка заключается в проведении закалки и отпуска. Нагрев вставки штампа под закалку так же, как и при отжиге осуществляется многоступенчато. Нагрев на 1 ступени производят до температуры 923÷973 К и выдерживают при ней 2 часа. На 2 ступени вставка нагревается до температуры 1133 К и выдерживается 2.5 часа. На 3 ступени вставку нагревают до температуры 1303÷1323 К, выдерживают 2 часа и охлаждают в масле до температуры 373÷423 К, а затем до комнатной на воздухе. Отпуск закалённой вставки производят путём нагрева её до температуры 873 К, выдержки в течение 3÷3.5 часов и охлаждения на воздухе до комнатной температуры.

В результате проведенной термообработки структура литого металла меняется с упорядоченной бейнитно-мартенситной с вкраплениями светлой составляющей в виде сетки по границам дендритов на троостомартенситную с повышенной степенью легированности по границам зёрен.

Из приготовленного по базовому варианту расплава стали отлили 7 вставок штампа для изготовления поковки вилки карданного вала. Одна из этих вставок была использована для исследования свойств металла.

Исследования механических свойств металла вставки показали следующие результаты: твёрдость HRC 46, ударная вязкость a_{n293} и a_{n573} 0.24 и 0.36 МДж/м² соответственно. Шесть литых вставок были переданы в кузнечнопрессовое производство (КПП - 1) кузнечного завода, где были установлены на прессе для изготовления поковок вилки карданного вала автомобиля «КАМАЗ». Результаты работы показали, что среднее значение эксплуатационной стойкости этих 6 вставок штампа, оцениваемой по количеству изготовленных поковок вилки карданного вала, была равна 4189 поковок (4253, 4165, 4192, 4181, 4171, 4169, дисперсия воспроизводимости $S^2=1094$, доверительный интервал ± 33).

Для приготовления расплава стали по альтернативному варианту использовали гранульную композицию, состоящую из следующих дисперсных отходов заводов ОАО «КАМАЗ»: кузнечная окалина; бигхаузная пыль, дисперсный хром - продукт очистки технологической оснастки ванн электролитического хромирования поршневых колец; молибденовый шлам; отработанный катализатор КЗА-ЗА, используемый в установках для получения эндогаза, который состоит из шамотной основы и следующих оксидов: NiO (10÷12 %), Fe₂O₃ (2 %), ZrO₂ (0.8 %), SO₃ (0.1 %).

Присутствие каждого перечисленного компонента в смеси между собой обусловлено поставкой того или иного элемента для синтезирования расплава стали в специализированном электротермическом плавильном агрегате. Организация технологического процесса приготовления расплава стали из описанной выше гранульной композиции путём прямого синтезирования была построена таким образом,

что металлизация железа, никеля и молибдена осуществлялась в противоточном реакторе газовым восстановителем, в качестве которого использовался эндогаз в количестве 150 нм³/мин. Температура в противоточном реакторе поддерживалась на уровне 1173 К. Работа противоточного реактора позволяет выдавать гранульную композицию в плавильную ванну с остаточным относительным количеством связанного с металлизирруемыми элементами кислорода на уровне 0.05.

Металлизация таких элементов, как марганец и кремний происходила в жидкой шлаковой фазе присутствующим в ней боем графитовых электродов. Температура шлаковой фазой поддерживалась на уровне 1873 К, а её основность была достаточно высокой (1.8), чтобы ограничить переход кремния из шлаковой фазы в металлическую до требуемой концентрации.

Организованный таким образом технологический процесс синтеза штамповой стали привёл к производительности пилотной установки, равной порядка 55 кг/час. По мере накопления в плавильной ванне металлической фазы производился выпуск стали в разливочный ковш ёмкостью 150 кг, на дно которого были поданы 1.1 кг феррованадия, 0.3 кг алюминия в качестве раскислителя и 0.45 кг ферроцерия в качестве модификатора. Средний химический состав стали в пробах, взятых с каждого разливочного ковша, характеризовался следующими данными, % (массовая доля): С – 0.29; Mn – 0.88; Si – 0.93; Cr – 4.65; Mo – 1.31; V – 0.27; Ni – 1.11. Далее производилась заливка литейных форм с соблюдением технологических параметров, принятых в базовом варианте. Количество жидкой стали в ковше было равно металлоемкости литейной формы. Всего было получено 7 отливок вставки штампа. После термической и механической обработки одна из отливок была использована для исследования структуры и свойств металла, а остальные шесть были направлены в производство для получения поковок вилки карданного вала.

Микроструктура металла после окончательной термообработки вставки представлена бейнитом (троостомартенситом) с мелкими включениями вторичных карбидов.

Испытания механических свойств материала вставки после окончательной термической обработки показали, что твёрдость равна HRC 48, ударная вязкость a_{H293} и a_{H573} равны соответственно 0.38 и 0.61 МДж/м². Излом образцов на ударную вязкость имел мелкокристаллическое строение. Результаты проведенных исследований структуры и свойств материала вставок, отлитых из расплава, приготовленного по альтернативному варианту из дисперсных отходов машиностроения, свидетельствуют о лучшем их качестве по сравнению с базовым вариантом приготовления расплава. Это обусловлено особенностями исходных материалов и благоприятными условиями синтеза штамповой стали в специализированном электротермическом плавильном агрегате, которые исключают наличие газовых и неметаллических включений в металле отливки. Шесть вставок штампа, направленных в кузнечно-прессовое производство (КПП - 1) кузнечного завода для установки на пресс, показали более высокую эксплуатационную стойкость, средняя величина которой составила 6756 поковок (6727, 6828, 6785, 6725, 6735, 6733). Дисперсия воспроизводимости составила $S^2=1759$, доверительный интервал ± 42 . Полученная разница в эксплуатационной стойкости литых вставок штампа, изготовленных из расплавов разных вариантов приготовления, исследовалась на статистическую достоверность [1]. Прежде всего, проверялась гипотеза о равенстве дисперсий. Для этого вычисляли критерий Фишера $F=S_1^2/S_2^2=1759/1094=1.61$ ($S_1^2>S_2^2$). По таблице критических точек распределения Фишера при $k_1=k_2=n-1=5$ находим $F_{0.05}=5.05$. Так как $1.61<5.05$ гипотеза о равенстве дисперсий принимается.

Далее проверим гипотезу о том, что эксплуатационная стойкость литой вставки штампа, изготовленная из расплава альтернативного варианта приготовления, выше, чем базового. Для этого вычислим критерий Стьюдента

$$t = \frac{\overline{X}^{(1)} - \overline{X}^{(2)}}{S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = \frac{6756 - 4189}{38 \sqrt{\frac{1}{6} + \frac{1}{6}}} = 116.47, \quad (1)$$

$$\text{где } S^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} = \frac{(6 - 1)1759 + (6 - 1)1094}{6 + 6 - 2} = 1427 \quad - \text{общая}$$

дисперсия.

По таблице критических точек распределения Стьюдента при $k = n_1 + n_2 - 2 = 10$ найдём $t_{0.05} = 2.23$. Так как $t > t_{0.05}$, то проверяемая гипотеза верна.

Таким образом, литые вставки штампа, полученные из расплава, приготовленного по альтернативному варианту в сравнении с базовым, имеют более высокую эксплуатационную стойкость (на $\sim 60\%$) в силу меньшей загрязнённости неметаллическими и газовыми включениями металла. Последнее обстоятельство обусловлено различиями по рафинирующему воздействию на формирующийся расплав внутри печных факторов в специализированном электротермическом плавильном агрегате.

Список литературы:

1. Колемаев В.А., Калинина В.Н. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник / Под ред. В.А. Колемаева. – М.: ИНФРА – М, 1999. – 302 с.
2. Сафронов Н.Н., Воронин Е.М. Прямое синтезирование железоуглеродистых литейных сплавов // Литейное производство. – 1999. - № 6. – С. 19 – 20.

А. П. Буйносов к.т.н.

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС)
кафедра «Электрическая тяга»
Россия, Екатеринбург
byinosov@mail.ru

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РЕСУРСА БАНДАЖЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В статье приведена разработанная методика оценки ресурса бандажей колесных пар тягового подвижного состава основанная на полиномиальной зависимости контролируемых параметров от пробега. Приведены результаты расчета ресурса до обточки бандажей по предельному износу гребня колесных пар электровозов ВЛ11 по существующей и предлагаемой методикам.

Ключевые слова: локомотив, колесная пара, бандаж, ресурс, методика, полиномиальная регрессия.

В России в начале 80-х годов срок службы бандажей колесных пар локомотивов составлял 6–7 лет, а в 90-е годы XX века он сократился до 2–3 лет. Отказы по износу колес занимают «ведущее место» среди других технических отказов в эксплуатации локомотивов [1].

Ресурс колесных пар определяется периодичностью технического обслуживания ТО-4, на котором производится обточка бандажей с целью восстановления профиля, а также периодичности ремонтов ТР-3, на которых производится замена полностью изношенных бандажей [2, 3].

Для того чтобы прогнозировать процесс изнашивания бандажей колесных пар и оценить величину их ресурса, необходимо построить аналитические зависимости числовых характеристик среднего значения M_y и среднеквадратического отклонения σ_y контролируемых параметров от наработки (пробега L) [4].

В настоящее время в ремонтных локомотивных депо, в региональных дирекциях по ремонту тягового подвижного состава, на локомотиворемонтных заводах и железнодорожных цехах промышленных предприятий используется разработанная методика анализа изменения значений контролируемых параметров бандажей колесных пар от наработки, при этом используется линейное изменение значений величин проката, толщины гребня и бандажа от наработки, определяется 90%-ный ресурс бандажей колесных пар до обточки и смены [3, 5–7].

Однако, при обточке без выкатки колесных пар из-под локомотива в депо не всегда полностью восстанавливают полную конфигурацию профиля поверхности катания бандажей, оставляя при этом «черновину» как на рабочей поверхности гребня, так и по кругу катания [5]. Поэтому, для более точной оценки износа бандажей колесных пар локомотивов в эксплуатации необходимо определять: не саму величину проката, а величину нарастания проката (разность между замером и прокатом оставляемом после обточки бандажей); износ гребня (разница между замером толщины гребня и толщиной гребня оставляемой при обточке); уменьшение толщины бандажа (разница между начальной толщиной бандажа и толщиной бандажа на момент замера).

Как известно, выборки контролируемых параметров узлов механической части локомотивов, к которым относятся и бандажи колесных пар, подверженных износу, с высокой точностью описываются нормальным законом распределения [3]. В этом случае плотность распределения записывается в виде:

$$f(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-M_y)^2}{2\sigma_y^2}}, \quad (1)$$

где M_y – математическое ожидание контролируемого параметра; σ_y – среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра; y – текущее значение контролируемого параметра.

В качестве примера приведен статистический анализ величины износа гребней бандажей на основании материала, собранного в результате замеров бандажей колесных пар электровозов ВЛ11 в ремонтном локомотивном депо Пермь (ТЧР-33) Свердловской дирекции по ремонту тягового подвижного состава) при проведении технического обслуживания ТО-2 в период с декабря 2010 г. по май 2011 г. Бандажи колесных пар были обточены по профилю ДМетИ ЛР и на момент производства замеров имели среднюю начальную толщину бандажа 70 мм.

В настоящее время для оценки ресурса бандажей колесных пар используется модель, основанная на линейной зависимости изменения значений числовых характеристик контролируемых параметров от пробега [8, 9]:

$$y(L) = A + B \cdot L, \quad (2)$$

где A и B – коэффициенты, определяемые по методу наименьших квадратов.

При этом линейная функция составляется отдельно для зависимостей математического ожидания и среднеквадратического отклонения от пробега, полученных при аппроксимации эмпирических зависимостей $M_y^*(L)$ и $\sigma_y^*(L)$, соответственно.

Использование линейной аппроксимации основывался на предположении, что период приработки поверхности бандажа к поверхности рельса составляет относительно малую часть эксплуатационного цикла. С учетом приведенного выше материала, это позволяет рассматривать процесс изнашивания бандажей колесных пар по линейной зависимости от пробега, определяющую только период нормальной эксплуатации.

Результаты расчета коэффициентов уравнений линейных регрессий износа гребня от пробега по существующей методике [3] приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты уравнений линейной регрессии износа гребней бандажей колесных пар от пробега электровозов ВЛ11.

Зависимость	Коэффициенты уравнений регрессии		Коэффициент корреляции, R_{y1}	Остаточная дисперсия, S_0^2 , мм ²
	A , мм	B , мм/10 ⁴ км		
$M_y(L)$	0,087	0,410	0,930	0,262
$\sigma_y(L)$	0,343	0,140	0,823	0,151

Однако в этом случае не учитывается ряд факторов: техническое состояние пути и локомотива, режим ведения поезда и другие. Их действие приводит к увеличению по времени периода приработки и более позднему наступлению периода нормальной эксплуатации, раннему наступлению периода усиленного износа. Указанных недостатков лишена методика, основанная на полиномиальной функции. При этом

зависимости математического ожидания $M_y(L)$ и среднеквадратического отклонения $\sigma_y(L)$ от пробега аппроксимируются в виде полиномов:

$$y(L) = \sum_{i=0}^m (A_i \cdot L^i). \quad (4)$$

где A_i – коэффициенты полиномов; m – порядок полинома.

Определение коэффициентов полиномов производится по методу наименьших квадратов [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=0}^m \left[A_k \cdot \sum_{i=0}^n L_i^{k+0} \right] = \sum_{i=0}^n (Y_i \cdot L_i^0), \\ \sum_{k=0}^m \left[A_k \cdot \sum_{i=0}^n L_i^{k+1} \right] = \sum_{i=0}^n (Y_i \cdot L_i^1), \\ \vdots \\ \sum_{k=0}^m \left[A_k \cdot \sum_{i=0}^n L_i^{k+n} \right] = \sum_{i=0}^n (Y_i \cdot L_i^n). \end{array} \right. \quad (5)$$

Поскольку величина износа гребня, нарастания проката или уменьшения толщины бандажа с ростом пробега может только увеличиваться, полиномиальная функция должна быть монотонно возрастающей на всем исследуемом промежутке от момента восстановления конфигурации профиля поверхности катания $L(Y_0)$ до пробег, при котором достигается допустимое в эксплуатации значение контролируемого параметра $L(Y_{\text{доп.}})$.

$$\left. \frac{dM_y(L)}{L} \right|_{L(Y_0)}^{L(Y_{\text{don}})} > 0. \quad (6)$$

Вид искомой характеристики, полученной в результате аппроксимации, во многом определяется порядком полиномиальной функции p . Большие значения p увеличивают коэффициент корреляции R_{yL} , однако при чрезмерно высоких значениях невозможно достичь монотонности функции. Таким образом, необходимо определить оптимальную степень полинома, позволяющую максимально точно описать заданную выборку $Y(L)$.

Дисперсия выборки значений объемом $(n + 1)$ от аппроксимированной полиномиальной функции определяется как:

$$S_0^2 = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n (Y^{**}(L_i) - Y_i)^2; \quad (7)$$

где $Y^{**}(L_i)$ – значения аппроксимированной функции параметра от значений пробега, заданных исходной выборкой; Y_i – заданные исходной выборкой детерминированные значения параметра.

Порядок полинома m должен быть выбран таким образом, чтобы величина дисперсии S_0^2 исходной выборки от полинома была минимальной:

$$S_0^2(m) \rightarrow \min. \quad (8)$$

Результаты, полученные с использованием разработанной методики сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Коэффициенты уравнений полиномиальной зависимости износа гребней бандажей колесных пар от пробега электровозов ВЛ11.

Зависимость	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции, R_{y1}	Остаточная дисперсия, S_0^2 , мм ²
$M_y(L)$	$0,148 + 0,059 \cdot L - 1,439 \cdot 10^{-3} \cdot L^2 + 1,955 \cdot 10^{-5} \cdot L^3$	0,976	0,178
$\sigma_y(L)$	$0,167 + 0,050 \cdot L - 1,231 \cdot 10^{-3} \cdot L^2 + 1,118 \cdot 10^{-5} \cdot L^3$	0,907	0,126

Анализируя полученные данные таблиц 1 и 2, можно сделать вывод о том, что использование для описания изменения значений числовых характеристик значений контролируемых параметров от пробега полиномиальных функций говорит о более тесной статистической связи эмпирической и аппроксимированной зависимостями, так как остаточные дисперсии, характеризующие разброс эмпирических точек, около полученной полиномиальной зависимости значительно меньше остаточных дисперсий износа гребня описанной линейной зависимостью, а коэффициенты корреляции полученных полиномов выше аналогичных для линейной функции.

На основании аппроксимированных зависимостей $M_y(L)$ и $\sigma_y(L)$ возможно прогнозирование процесса изнашивания и определение предельного ресурса бандажей колесных пар. При этом оценка остаточного ресурса производится при заданном значении вероятности перехода механической системы в предельное состояние.

Функция плотности распределения для нормального закона:

$$f_y(L) = \frac{1}{\sigma_y(L) \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Y - M_y(L))^2}{2[\sigma_y(L)]^2}}. \quad (9)$$

Допустим, что в общем случае зависимости $M_y(L)$ и $\sigma_y(L)$:

$$M_y(L) = \sum_{i=0}^m (A_i \cdot L^i), \quad \sigma_y(L) = \sum_{i=0}^n (B_i \cdot L^i), \quad (10)$$

где A_i и B_i – коэффициенты полиномов зависимостей соответственно среднего значения и среднеквадратического отклонения износа гребня бандажей колесных пар локомотивов от пробега.

Тогда функция плотности распределения примет вид:

$$f_y(L) = \frac{(L - 1)}{B \sqrt{2\pi} \cdot (L^{n+1} - 1)} \cdot e^{-\frac{\left[(L - 1) \cdot \left(Y - \sum_{i=0}^m (A_i \cdot L^i) \right) \right]^2}{2 \left[\sum_{i=0}^n (B_i \cdot L^i) \right]^2}}. \quad (11)$$

Выход контролируемых параметров за установленный допуск классифицируется как отказ работы бандажа, предельный износ. Таким образом, с увеличением пробега L возрастает вероятность отказа P . Для износа гребня вероятность отказа при заданном пробеге равна [3]:

$$P(L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{Y_{\text{доп.}}}^{\sum_{i=0}^m (A_i \cdot L^i) + 3 \sum_{i=0}^n (B_i \cdot L^i)} \frac{1}{\sum_{i=0}^n (B_i \cdot L^i)} e^{-\frac{\left(Y - \sum_{i=0}^m (A_i \cdot L^i) \right)^2}{2 \left[\sum_{i=0}^n (B_i \cdot L^i) \right]^2}} dy. \quad (12)$$

Используемый в депо железнодорожного транспорта общего и необщего пользования разработанный в Уральском государственном университете путей

сообщения переносного электронного прибора КИП-03 [10] с программным обеспечением на ПЭВМ по сравнению с универсальными шаблонами УТ-1М позволяет повысить точность замера контролируемых параметров и осуществлять прогнозирование износа бандажей колесных пар локомотивов, определять ресурс до обточки и смены. Относительная погрешность прибора КИП составляет 2–5 %, тогда как УТ-1М – не превышает 10 %.

Для оценки ресурса бандажей необходимо знать предельное значение контролируемого параметра $Y_{\text{доп}}$. Установленный допуск для износа гребня бандажа (уменьшение толщины гребня) электровозов серии ВЛ11, колесные пары которых имеют конфигурацию профиля поверхности катания ДМетИ ЛР с уменьшенной толщиной гребня до 30 мм составляет 5 мм.

На основании выполненных расчетов строятся зависимости $P(L)$ и по ним определяется $\gamma\%$ -ый ресурс колесных пар, то есть такой пробег, которому соответствует вероятность безотказной работы или вероятность отказа $P = 1 - \gamma$. Результаты расчета 95%-ного ресурса до обточки по предельному износу гребня бандажей колесных пар электровозов ВЛ11, определенный по разным моделям, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Ресурс до обточки бандажей по предельному износу гребня

Модель	Ресурс бандажей, тыс. км
существующая	58,2
предлагаемая	52,7

Разработанная методика, с использованием переносного электронного прибора КИП-03 с программным обеспечением на ПЭВМ, в отличие от используемой в настоящее время позволяет более точно прогнозировать износ бандажей в эксплуатации и определять ресурс до обточки и смены колесных пар локомотивов.

Список литературы

1. Горский А.В., Буйносов А.П. Анализ износа бандажей // Железнодорожный транспорт. – 1991. – № 1. – С. 46–47.
2. Буйносов А.П., Медведев Н.Ф. Автоматизация измерения проката бандажей колесных пар электровозов // Железнодорожный транспорт: Обзорная информация. Серия: Локомотивы и локомотивное хозяйство, ремонт локомотивов. – ЦНИИТЭИ МПС, 1991. – Вып. 5. – С. 1–9.
3. Буйносов А.П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2009. – 224 с.
4. Буйносов А.П., Худояров Д.Л., Пышный И.М. Выбор профиля поверхности катания бандажей колесных пар промышленных тепловозов // Транспорт Урала. – 2011. – № 1(28). – С. 64–69.
5. Горский А.В., Буйносов А.П., Наговицын В.С., Клинский В.С. Экономичная обточка // Локомотив. – 1992. – № 4. – С. 26–27.
6. Буйносов А.П., Тихонов В.А. Повышение износостойкости колесных пар электроподвижного состава за счет обработки гребней триботехническим составом // Транспорт Урала. – 2011. – № 3 (30). – С. 59–64.
7. Горский А.В., Буйносов А.П., Боярских Г.С., Лавров В.А. Бандажи и рельсы (опыт Свердловской дороги) // Локомотив. – М., 1992. – № 4. – С. 25–26.
8. Буйносов А.П. Повышение ресурса бандажей колесных пар электровозов в результате изменения технологии их обточки // Автоматизация и современные технологии. – 1992. – № 8. – С. 23–25.
9. Буйносов А.П. Автоматизированный контроль параметров колесных пар тягового подвижного состава // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 7. – С. 52–53.
10. Буйносов А.П., Тихонов В.А. Новый гребнесмазыватель твердого типа // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 10. – С. 54–55.

А. П. Буйносов к.т.н., И. М. Пышный

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС)
кафедра «Электрическая тяга»
Россия, г. Екатеринбург
byinosov@mail.ru, igorkz45@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ РАЗНОСТИ ДИАМЕТРОВ БАНДАЖЕЙ С УЧЕТОМ ЗАТРАТ НА РЕМОНТ КОЛЕСНЫХ ПАР ЭЛЕКТРОВОЗОВ

В статье приведен метод расчета и определены допустимые разности в диаметрах бандажей колесной пары в эксплуатации с учетом затрат на ремонт для различных депо и серий пассажирских и грузовых электровозов, находящихся в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: электровоз, колесная пара, бандаж, износ, затраты на ремонт, разность диаметров.

Значения допустимой разности диаметров колесных пар электровозов $\Delta D_{\text{доп}}$ должны быть обоснованы с экономической точки зрения, т. е. соответствовать минимуму затрат на обточку, расходы бандажа, простоя локомотива [1].

Эксплуатационные затраты определяются по формуле [2]:

$$E = E_{1i} + E_{2i} + E_{3i}, \quad (1)$$

где E_{1i} – расходы, связанные с сокращением срока службы бандажей в связи со снятием некоторого слоя металла при обточках;

E_{2i} – расходы на обточку бандажей (рабочую силу, режущий инструмент, электроэнергию, амортизацию станка);

E_{3i} – расходы, связанные с простоем электровоза из-за обточки бандажей колесной пары.

При этом расходы E_{1i} определяются как [3]:

$$E_{1i} = m_1 \cdot e_s \cdot x_T \cdot n_i, \quad (2)$$

где m_1 – число бандажей на электровозе, $m_1 = 2 \cdot q$, ед.;

q – число колесных пар, ед.;

e_s – стоимость бандажа, отнесенная к 1 мм его рабочей толщины, $e_s = c_1/d$, руб./мм;

c_1 – стоимость бандажа;

d – рабочая толщина бандажа, $d = v - h_{\text{доп}}$, мм;

v – средняя толщина бандажа до эксплуатации, мм;

$h_{\text{доп}}$ – предельная толщина бандажа в эксплуатации, мм;

x_T – средняя толщина слоя металла, снимаемого с бандажа по кругу катания за одну обточку, $x_T = \sigma \cdot L$, мм;

σ – технологический износ, $\sigma = a_{\text{тб}} - a_{\text{пр}}$, мм;

$a_{\text{тб}}$ и $a_{\text{пр}}$ – интенсивности уменьшения толщины бандажа и нарастания проката, мм/км;

L – пробег, км;

n_i – число обточек бандажей колесных пар, $n_i = L_{\text{бан}} / L$, ед;

$L_{\text{бан}}$ – ресурс бандажа до смены, км.

Расходы E_{2i} определяются:

$$E_{2i} = e_2 \cdot n_i, \quad (3)$$

где e_2 – общая сумма расходов на обточку одной колесной пары, которая может быть найдена из выражения [4]:

$$e_2 = Z_r + C_{эл.} + C_p + C_{кр}, \quad (4)$$

где Z_r – основная и дополнительная зарплата станочников 5-го разряда на обточку колесной пары [5]:

$$Z_r = Z_q \cdot t \cdot (1 + K_{пр.}) \cdot (K_{сс} + 1) \cdot (1 + K_{отп.}), \quad (5)$$

где Z_q – часовая тарифная ставка станочника 5-го разряда при повременной оплате труда и нормальных условиях труда;

t – время, необходимое на обточку колесной пары на станке типа «Рафамет» УБА-112;

$K_{пр.}$ – размер премий от заработной платы;

$K_{сс}$ – норма отчисления на соцстрах;

$K_{отп.}$ – коэффициент на замещение отпускных.

Расходы на электроэнергию $C_{эл.}$ для обточки одной колесной пары составляют:

$$C_{эл.} = U_{эл.} \cdot W \cdot t / K_n, \quad (6)$$

где $U_{эл.}$ – цена 1 кВт·ч электроэнергии;

W – мощность электродвигателя станка «Рафамет» УБА-112;

K_n – коэффициент, учитывающий время на замеры, установку колесной пары на станок.

Расходы на техническое обслуживание и текущий ремонт станка C_p на одну колесную пару составляют:

$$C_p = \left(C_{ро} \cdot \frac{t}{K_n} \right) / (\Phi \cdot \beta_p), \quad (7)$$

где $C_{ро}$ – расходы на техническое обслуживание и ремонт одного станка в год;

Φ – годовой фонд рабочего времени колесно-токарного участка;

β_p – коэффициент, учитывающий время на ремонт станка.

Расходы на капитальный ремонт станка $C_{кр}$ составляют:

$$C_{кр} = K_{ст} \cdot \beta_{кр} / A_{обт.}, \quad (8)$$

где $K_{ст}$ – расчетное количество обточек между капитальными ремонтами;

$\beta_{кр}$ – удельная стоимость капитального ремонта на одну обточку;

$A_{обт.}$ – фактически обточено колесных пар между капитальными ремонтами.

Расходы E_{3i} можно определяются по:

$$E_{3i} = T_0 \cdot C_{пр.} \cdot n_i, \quad (9)$$

где T_0 – среднее время простоя электровоза на обточке бандажей одной колесной пары;

$C_{пр.}$ – стоимость одного часа простоя электровоза в ремонте.

Эксплуатационные затраты E_{1i} , E_{2i} и E_{3i} были определены для каждой серии электровоза во всех рассматриваемых депо в зависимости от наработки (пробега) до обточки, который изменяли от 50 до 400 тыс. км с интервалом 10 тыс. км. При увеличении наработки от момента полного восстановления конфигурации профиля (обточки), составляющая E_{1i} увеличивается во время периода приработки бандажа и увеличения проката. В это время интенсивность нарастания проката опережает уменьшение толщины гребня. При дальнейшем увеличении пробега L увеличивается разность диаметров бандажей колесной пары электровоза, что ведет к интенсивному износу гребней и увеличению толщины снимаемого металла x_t при обточке [6].

Согласно (2) увеличение x_T ведет к дальнейшему росту величины E_{1i} . Таким образом, начало резкого увеличения расходов E_{1i} соответствует периоду износа бандажа, когда начинает лимитировать износ гребня.

Расходы на обточку (рабочую силу, режущий инструмент, электроэнергию, амортизацию станка) и связанные с простоем электровоза из-за обточки бандажей колесной пары будут уменьшаться при увеличении пробега L от момента обточки, так как видно из уравнений (3) и (9) уменьшается количество обточек n_i и, соответственно, необходимое время на простой электровоза на обточках за все время работы бандажа, расходы на электроэнергию и техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонты станков по обточке колесных пар. Таким образом, функция $E(L)$ имеет минимум в точке, соответствующей минимуму затрат на обточку, расхода толщины бандажа, простоя электровоза [7].

Полученные в результате расчетов значения расходов $E(L)$ были аппроксимированы параболической функцией вида [8]:

$$E(L) = a_0 + a_1 \cdot L + a_2 \cdot L^2. \quad (10)$$

Аналитические зависимости расходов на ремонт бандажей от пробега до обточки колесной пары для грузовых электровозов ВЛ10 и ВЛ11, пассажирских электровозов ЧС2, ЧС2^T и ЧС7 представлены на рис. 1 и 2.

Аналитическим зависимостям величин удельных расходов от пробега для каждой серии электровоза, в каждом рассматриваемом депо соответствует коэффициент корреляции, близкий к единице [9, 10]. Остаточные дисперсии, характеризующие разброс эмпирических данных около аналитических зависимостей на порядок меньше соответствующих дисперсий удельных расходов D_q на ремонт бандажей колесных пар [11].

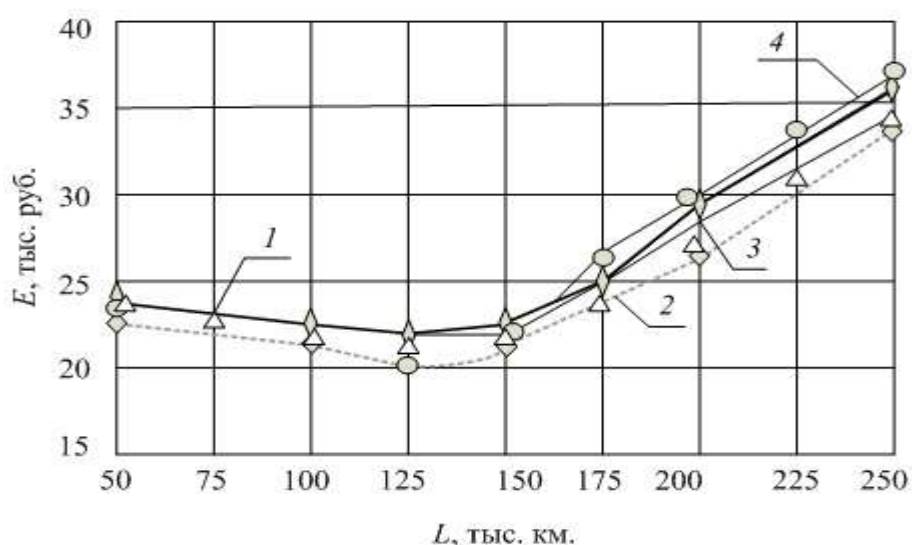


Рис. 1 – Зависимости расходов на ремонт бандажей от пробега до обточки колесных пар электровозов ВЛ10 и ВЛ11: 1 – ВЛ11 Свердловск-сортировочный; 2 – ВЛ10 Рыбное; 3 – ВЛ11 Пермь-сортировочная; 4 – ВЛ10 Курган.

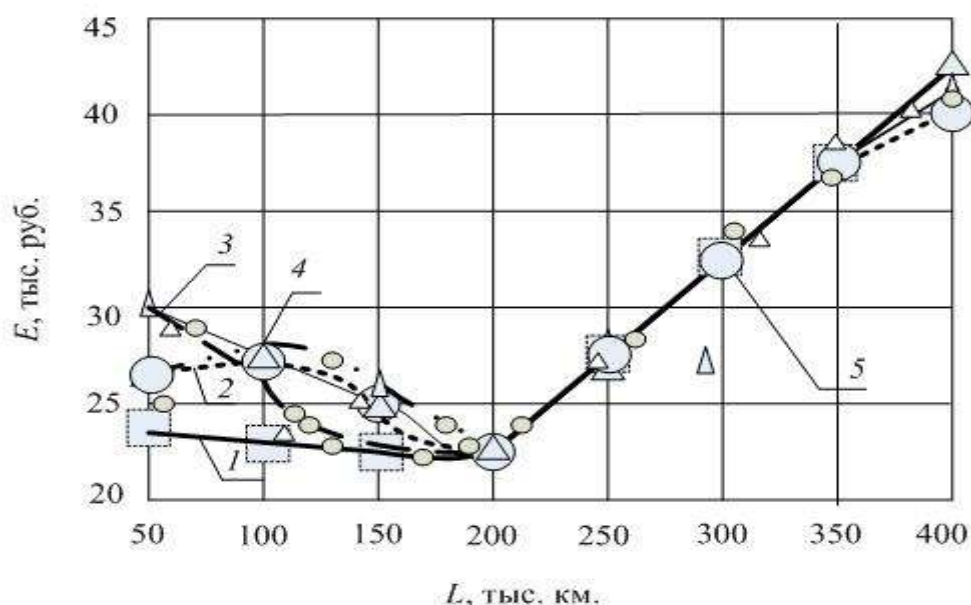


Рис. 2 – Зависимости расходов на ремонт бандажей от пробега до обточки колесных пар пассажирских электровозов ЧС2, ЧС2^Т и ЧС7:
1 – ЧС2 Свердловск-пассажирский; 2 – ЧС2 Москва-пассажирская-Курская;
3 – ЧС7 Свердловск-пассажирский; 4 – ЧС7 Москва-пассажирская-Курская;
5 – ЧС2^Т Мурманск.

Это свидетельствует об адекватности выбранных аналитических зависимостей и подтверждает достаточно тесную связь расходов E с пробегом L . Для определения пробега до обточки, которому соответствует минимум удельных суммарных затрат на ремонт колесной пары необходимо решить уравнение $E'(L) = 0$ [12]. Рассчитав $L_{\text{отп.}}$ и подставив его в уравнения вида $Y(X_1; X_2)$, находим значения $Y_{\text{доп.}} = \Delta D_{\text{доп.}}$.

При использовании выполненного расчета значения предельно-допустимой разности диаметров бандажей с учетом затрат на ремонт колесных пар в различных депо и серий электровозов существенно отличаются (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты расчета предельно-допустимой разности диаметров бандажей колесных пар электровозов

Локомотивное депо, серия локомотива	$\Delta D_{\text{доп.}}, \text{ мм}$
Свердловск-сортировочный, ВЛ11	1,135
Пермь-сортировочная, ВЛ11	1,127
Свердловск-пассажирский, ЧС2	1,850
Свердловск-пассажирский, ЧС7	1,458
Рыбное, ВЛ10	1,358
Курган, ВЛ10	3,524
Мурманск, ЧС2 ^Т	2,658
Москва-пассажирская-Курская, ЧС2	2,958
Москва-пассажирская-Курская, ЧС7	2,928

На основании анализа можно утверждать, что рассчитанные $\Delta D_{\text{доп.}}$ для соответствующих депо и серий электровозов являются допустимыми значениями разности в диаметрах бандажей колесной пары в эксплуатации, так как при величине,

большой, чем $\Delta D_{\text{доп.}}$, интенсивность износа гребня будет возрастать, что приведет к большому технологическому износу (потере металла при обточке) при восстановлении профиля катания бандажа [13] и увеличению расходов на ремонт колесной пары электровозов ВЛ10, ВЛ11, ЧС2, ЧС2^Т и ЧС7.

Таким образом, разность диаметров бандажей на одной колесной паре существенно влияет на интенсивность уменьшения толщины гребня и незначительно на рост проката [14]. При эксплуатации бандажей колесных пар необходимо руководствоваться рассчитанными значениями и не допускать выхода разности диаметров за предельные значения, так как в противном случае межремонтный период будет лимитировать износ гребня, вследствие чего увеличатся расходы на ремонт, и уменьшится пробег до обточки.

Список литературы:

1. Горский А.В., Буйносов А.П., Наговицын В.С., Клинский В.С. Экономичная обточка // Локомотив. – 1992. – № 4. – С. 26–27.
2. Буйносов А.П., Клинский В.С. Об износе бандажей электровозов ЧС2 и ЧС7 // Железнодорожный транспорт. – 1992. – № 5. – С. 45–46.
3. Буйносов А.П., Медведев Н.Ф. Автоматизация измерения проката бандажей колесных пар электровозов // Железнодорожный транспорт: Обзорная информация. Серия: Локомотивы и локомотивное хозяйство, ремонт локомотивов. – ЦНИИТЭИ МПС, 1991. – Вып. 5. – С. 1–9.
4. Буйносов А.П. Повышение ресурса бандажей колесных пар электровозов в результате изменения технологии их обточки // Автоматизация и современные технологии. – 1992. – № 8. – С. 23–25.
5. Балдин В.Л., Буйносов А.П., Тихонов В.А. Повышение ресурса бандажей колесных пар электровозов ВЛ11 за счет выбора оптимального остаточного проката // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 2. – С. 63–66.
6. Буйносов А.П. Методы повышения ресурса бандажей колесных пар тягового подвижного состава: Автореф. дис. докт. техн. наук. – Екатеринбург, 2011. – 44 с.
7. Буйносов А.П., Худояров Д.Л., Пышный И.М. Выбор профиля поверхности катания бандажей колесных пар промышленных тепловозов // Транспорт Урала. – 2011. – № 1. – С. 64–69.
8. Буйносов А.П., Тихонов В.А. Повышение износостойкости колесных пар электроподвижного состава за счет обработки гребней триботехническим составом // Транспорт Урала. – 2011. – № 3. – С. 59–64.
9. Горский А.В., Буйносов А.П., Боярских Г.С., Лавров В.А. Бандажи и рельсы (опыт Свердловской дороги) // Локомотив. – 1992. – № 4. – С. 25–26.
10. Буйносов А.П. Автоматизированный контроль параметров колесных пар тягового подвижного состава // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 7. – С. 52–53.
11. Горский А.В., Буйносов А.П. Влияние профиля на ресурс бандажа // Локомотив. – 1990. – № 6. – С. 27–28.
12. Буйносов А.П., Тихонов В.А. Новый гребнесмазыватель твердого типа // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 10. – С. 54–55.
13. Горский А.В., Буйносов А.П. Повысить ресурс бандажей (Опыт Свердловской дороги) // Локомотив. – 1989. – № 11. – С. 10–11.
14. Буйносов А.П. Как контролировать разность диаметров бандажей колесных пар // Локомотив. – 1991. – № 3. – С. 35.

Т. В. Бурнышева¹ к.т.н., А. Ф. Разин² д.т.н., О. А. Штейнбрехер¹

¹Новокузнецкий институт (филиал) Кемеровского государственного университета
факультет информационных технологий
кафедра математики и математического моделирования
Россия, г. Новокузнецк

²Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения
Россия, г. Хотьково

ОЦЕНКА ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ОБОЛОЧЕЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ

Рассчитываются поля напряжений составной оболочечной конструкции при осевом сжатии. Приведено сравнение численного решения с данными натурного эксперимента. Оценено влияние толщин обшивок составных частей конструкции и потери устойчивости крышек люков на осевые перемещения.

Ключевые слова: сетчатые оболочечные конструкции, композиционные материалы, вычислительный эксперимент, численное решение.

В настоящее время в машиностроении широко применяются составные конструкции, отдельными фрагментами которых являются сетчатые оболочки из композиционных материалов [4, 5]. Для таких конструкций актуальным является вопрос о взаимном влиянии составных частей при работе конструкции в целом на сжатие. Сетчатые оболочки [1, 4, 5] представляют собой регулярную систему ребер, соединенных внешней поверхностью с обшивкой. К особенностям относятся вырезы (усиленные и не усиленные) конструктивной или технологической направленности, влияющие на распределение напряжений в конструкции [2, 7, 8, 10].

Рассмотрим оболочечную конструкцию, состоящую из алюминиевого стрингерного отсека и композитной сетчатой оболочки. Структурная схема модели представлена на рисунке 1. Нижняя часть представляет собой цилиндрическую оболочку из композиционных материалов. Высота цилиндра составляет $0,69R$ (R – радиус оболочки). Высота сечения спиральных и кольцевых ребер одинакова; обозначим её d . Ширина сечения составляет $0,25d$, а расстояние между спиральными ребрами по высоте равно $2,63d$. Расстояние между осями пар кольцевых ребер равно $3,56d$. Расстояние между ребрами внутри пары $0,25d$. Конструкция укреплена двумя шпангоутами, встроенным кольцом и четырьмя продольными ребрами. Имеется три компенсированных выреза круглой формы, усиленные двумя окантовками переменной толщины. Внешняя окантовка имеет толщину h_e , поверх которой располагается внутренняя окантовка толщиной h_m . Вырезы под люки закрыты крышками, форма которых совпадает с формой вырезов.

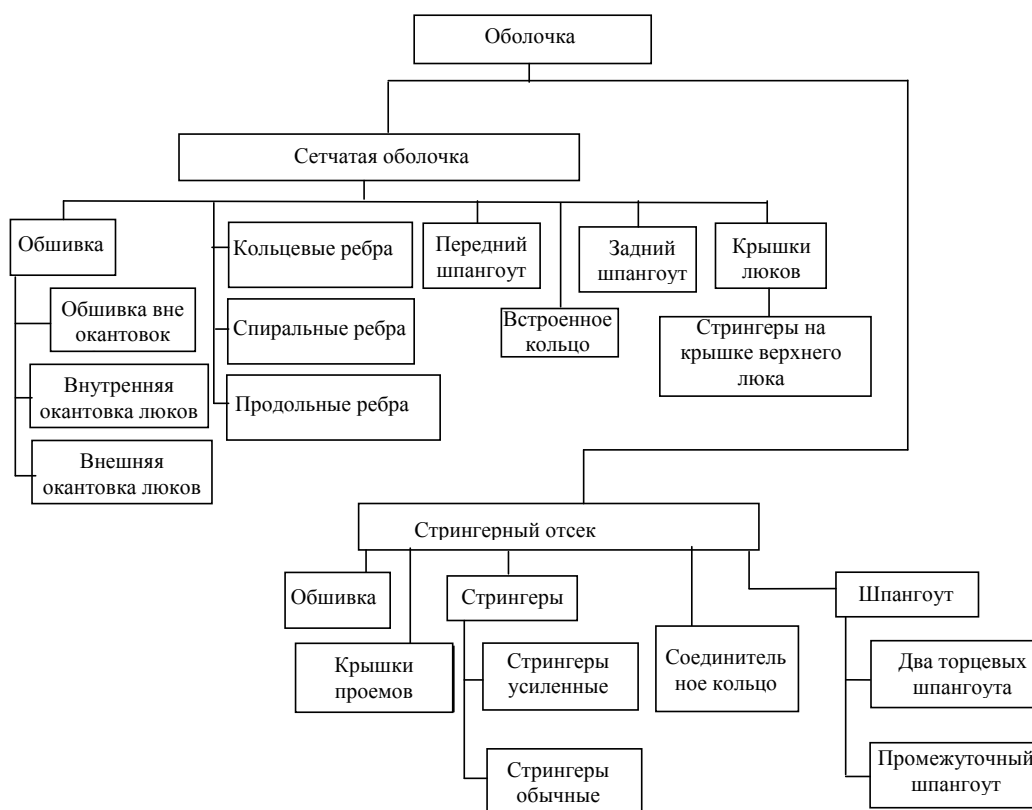


Рисунок 1 – Структурная схема конструкции.

Стрингерный отсек представляет алюминиевую конструкцию цилиндрической формы. Высота этой части конструкции составляет $0,53R$. Он содержит четыре равномерно расположенных по окружности проема, частично закрытых несъёмными крышками, укреплен шестью десятками стрингеров и тремя шпангоутами. Толщины обшивок композитной и алюминиевой частей конструкции равны $h_K = h_C = h$.

Поля напряжений определялись в пакете программ «Композит-НК» [3], в котором реализован метод конечных элементов в виде метода перемещений [9]. Строилась конечно-элементная модель конструкции по структурной схеме (рисунок 1). Схема разбиения обшивки композитной части конструкции на конечные элементы получалась наложением оребрения, конечные элементы при этом получались треугольными. Для моделирования ребер и стрингеров использовался двухузловой конечный элемент с 6-ю степенями свободы в каждом узле и аппроксимацией прогибов эрмитовыми полиномами 3-й степени, учитывающие деформации поперечного сдвига по сдвиговой модели Тимошенко [10]. Обшивка и окантовки моделировались элементами изгибаемой пластины Зенкевича с неполной кубической аппроксимацией прогибов [9]. Перемещения вдоль осей элементов ребер и в плоскости каждого треугольника обшивки аппроксимировались линейными сплайнами. Вдоль образующей оболочка нагружалась сжимающей силой $\bar{N}$. Погонная нагрузка была распределена не равномерно по торцу, на котором был запрещен поворот нормали относительно касательной к круговому сечению. Задача решалась в физически и геометрически линейной постановке. Конечно-элементная модель представлена на рисунке 4-а.

При проведении натурного эксперимента оболочка устанавливалась вертикально и нижней кромкой опиралась на жесткое металлическое кольцо. Верхняя кромка нагружалась сжимающей силой посредством специального нагружающего устройства

через жесткую плиту, опираемую на верхнюю кромку. Численно приложенную нагрузку представляли в виде комбинации $\vec{N}$ равномерной нагрузки $\vec{F}$ и неравномерно распределенного момента:

$$\vec{N} = 0,877\vec{F} - 1,765(\sin \alpha \cdot 0,1\vec{F}) - 0,093(\sin \alpha \cdot 0,1\vec{F}).$$

В процессе нагружения измерялись перемещения вдоль образующей. Для этого на конструкции были закреплены датчики перемещений и деформаций, схема расположения которых представлена на рисунке 2.

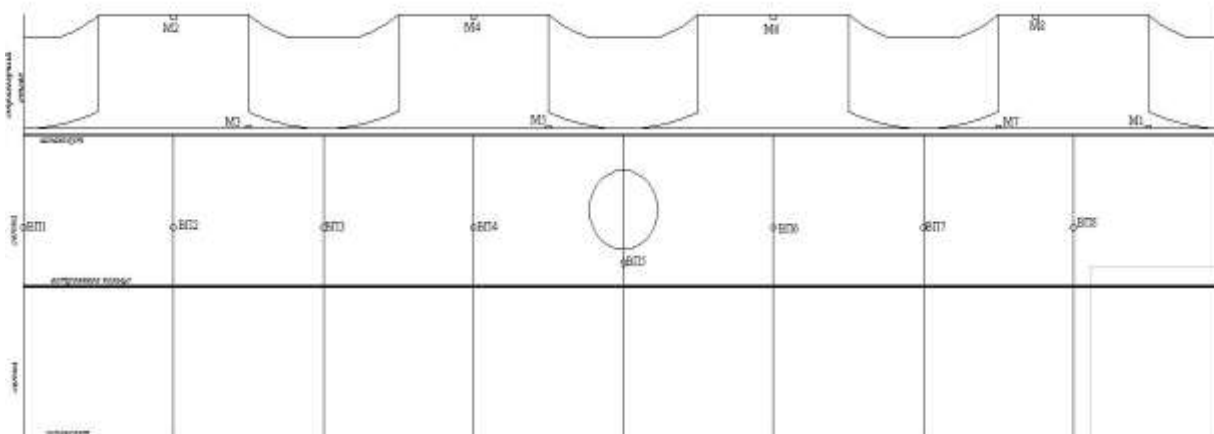


Рисунок 2 – Схема расположения датчиков перемещения и деформации на развертке конструкции.

На рисунке 3-а приведено распределение значений осевых перемещений на развертке композитной части конструкции по результатам численного расчета и данным натурного эксперимента. Наибольшие различия между расчетными и экспериментально измеренными перемещениями достигаются в зоне первого нижнего люка (слева) – датчики ВП3. Данные различия можно объяснить геометрически нелинейной связью между деформациями и перемещениями, как результат - большие перемещения при приложенных нагрузках вблизи люка. Либо потерей устойчивости крышки люка в упругой зоне во время натурного эксперимента.

Оценим влияние потери устойчивости крышек люков с помощью численного эксперимента. С учетом симметрии модели рассмотрим шесть состояний: 1) закрыты все люки, 2) открыт один нижний люк, 3) открыты два нижних люка, 4) открыт верхний люк, 5) открыты один нижний и верхний люки, 6) открыты все люки. На рисунке 3-б приведены распределения значений осевых перемещений численного расчета осевых перемещений в композитной части конструкции при полностью открытых и закрытых люках. Анализ результатов показывает, что раскрытие верхнего люка дает увеличение осевых перемещений в его окрестности (датчик ВП5) на 9,5%. Влияние раскрытия нижних люков мало – увеличение осевых перемещений в их окрестности порядка 2% (датчики ВП4 и ВП6).

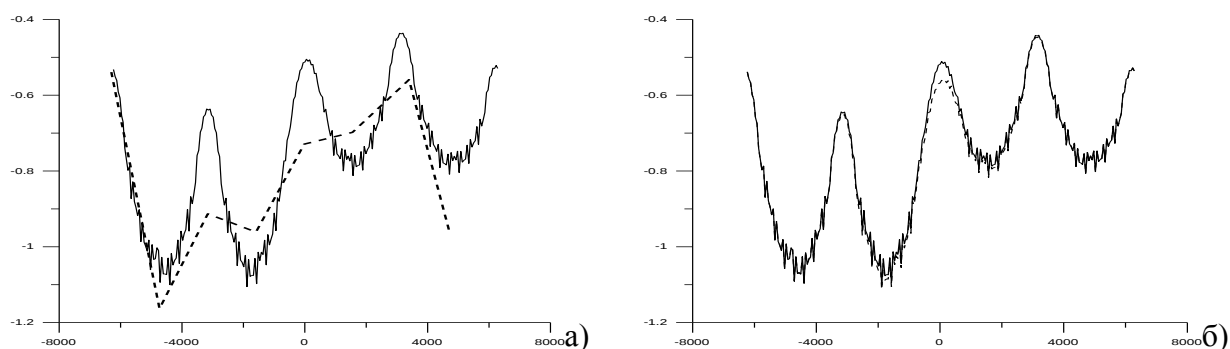


Рисунок 3 – Распределение u_s в композитной части конструкции:
а) — — — — — натурный эксперимент, **—** численный расчет;
б) — — — — — численный расчет при открытых люках, **—** при закрытых люках.

Построенная конечно-элементная модель была выбрана за основную при проведении вычислительных экспериментов. В силу особенности изготовления композитов, их физико-механические свойства определяются уже после создания конструкции. На физико-механические свойства влияет соотношение связующего и наполнителя, а также изменения окружающей среды (температуры, влажности и т.д.). При серийном изготовлении рассматриваемой конструкции физико-механические характеристики композиционного материала могут не совпадать с номинальными.

При численном расчете полей напряжений конструкции варьировался параметр Eh , где E – модуль упругости материала, h – толщина обшивки. Для определения влияния параметра Eh_K композитной части и толщины обшивки алюминиевой частей конструкции на осевые перемещения были проведены две серии полнофакторных вычислительных экспериментов [6]. В первой серии в качестве фактора был выбран параметр Eh_K композитного отсека, откликом – значения осевых перемещений в датчиках композитной части конструкции. Фактор варьировался от $3000h_K$ кгс до $9000h_K$ кгс с шагом $3000h_K$. Во второй серии фактором являлась толщина обшивки стрингерного отсека h_C , откликом – значения осевых перемещений в датчиках стрингерного отсека. Толщина варьировалась от $1/3h$ до h с шагом $1/3h$. Распределения осевых перемещений в алюминиевой части конструкции приведены на рисунке 4 – б).

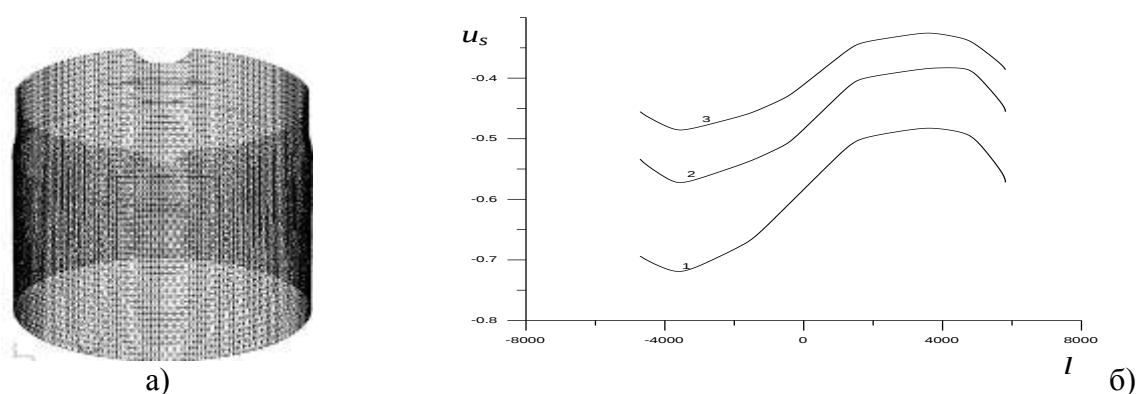


Рисунок 4 – Результаты численного моделирования:
а) конечно-элементная модель конструкции; **б)** распределение u_s в стрингерном отсеке при варьировании h_C : 1 - $h_C = 1/3 h$; 2 - $h_C = 2/3 h$; 3 - $h_C = h$.

Анализ результатов вычислительных экспериментов показал: взаимное влияние факторов Eh_K и h_C мало; влияние толщины обшивки стрингерного отсека на перемещения в композитной части конструкции незначительно; влияние параметра Eh_K композитной части конструкции на перемещения в стрингерном отсеке также незначительно.

Полученные результаты можно использовать при оценке значений перемещений в оболочечных конструкциях сложной структуры. Для достижения большей точности при численных расчетах необходимо решать задачу в геометрически нелинейной постановке.

Список литературы:

1. Бурнышева Т.В. Учет конструктивных вырезов при расчете полей напряжений ортотропных оболочечных конструкций из композиционных материалов при статическом деформировании // Научный вестник НГТУ. - 2011. - №3 (44) - С. 93-102
2. Бурнышева Т.В., Каледин В.О. Сравнение дискретного и континуального подхода к расчету напряженного состояния сетчатых оболочечных конструкций при статическом нагружении // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. - №4 – С. 113-116
3. Бурнышева Т.В., Каледин В.О., Равковская И.В., Эптешева С.В. Развитие пакета программ математического моделирования сопряженных задач механики неоднородных конструкций // Вестник Кемеровского государственного университета. № 1(41) 2010. – - С. 3-8.
4. Васильев В.В. Исследование влияния формы ячейки на напряженное состояние композитной сетчатой конструкции при локальном нагружении / В.В. Васильев, М.В. Никитин, А.Ф. Разин// Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – М.: НТЦ «Информтехника». – 2008. – Вып. 1(138) – 2(139). – 90 с.
5. Васильев В.В., Разин А.Ф. Композитные сетчатые балочные элементы для авиационных конструкций// Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – М.: НТЦ «Информтехника». – 2006. – Вып. 1(142) – 2(143). –с. 3-6.
6. Виварский М. С., Лурье М. В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. Киев: «Техніка», 1975, 168 стр.
7. Каледин В.О. Численно-аналитические модели в прочностных расчетах пространственных конструкций. НФИ КемГУ. – Новокузнецк, 2000. – 204 с.
8. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 712 с.
9. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. – 392 с.
10. Тимошенко С.П., Гере Дж. Механика материалов: учебник для вузов. 2-е издание, стер. СПб.: Издательство "Лань", 2002. - 672с.

В. М. Бушуев, Р. К. Мусин д.т.н., И. Л. Синани д.т.н.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
механико-технологический факультет
кафедра сварочного производства и технологии конструкционных материалов
Россия, г. Пермь
Sinani.PGTU@yandex.ru

СТРУКТУРА ШЛИКЕРНОГО ПОДСЛОЯ И ФОРМИРОВАНИЕ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ ПИРОУГЛЕРОДНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ГЕРМЕТИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ УУКМ

В статье представлены результаты исследования микроструктуры шликерного подслоя после насыщения пироуглеродом и механизм формирования на его поверхности пироуглеродного покрытия при пиролизе метана с использованием изотермического способа. Показано, что шликерный подслоя состоит из конгломератов, которые состоят из блоков слоистого строения, имеющих высокодисперсную структуру, что является основной структурной предпосылкой увеличения прочностных характеристик шликерного подслоя.

Осаждение пироуглеродного покрытия на поверхности шликерного подслоя начинается с образование мелких зародышей, дальнейший рост которых подчиняется правилу геометрического отбора и кристаллиты растут с максимальной скоростью в направлении их вершин, что формирует столбчатую структуру, почти с теоретической плотностью.

Ключевые слова: шликерный подслоя, конгломераты, пироуглеродное покрытие, пиролиз метана, высокодисперсная структура, микроструктура, зародыши, кристаллит, УУКМ, столбчатая структура.

К настоящему времени ряд отраслей российской промышленности, таких как металлургическая, полупроводниковая, химико-металлургическая, нуждаются в разработке новых конструкционных материалов, устойчивых в экстремальных условиях высокотемпературного и химического воздействия агрессивных металлических расплавов и химических сред.

Наиболее перспективными материалами для использования и изготовления крупногабаритных и сложнопрофильных конструкций практически любого типоразмера, эксплуатируемых в жестких условиях высокотемпературного и агрессивного воздействий, являются углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), обладающие высокой коррозионной стойкостью и повышенным комплексом физико-механических свойств [1-3]. Основным недостатком этого класса УУКМ является их высокая проницаемость. В литературе отсутствуют, какие либо методы и подходы, касающиеся разработки УУКМ и конструкций на их основе, обладающих герметичностью в сложных условиях эксплуатации.

В работе [4] нами выявлены основные технологические закономерности изготовления несущей основы из углеродной ткани Урал ТМ-4 путем пиролиза метана в термоградиентном режиме, а для формирования на ней герметизирующей композиции, состоящей из шликерного подслоя и пироуглеродного покрытия, установлены кинетические законы роста пироуглерода как на внешнем контуре

твердой поверхности [5], так и в объеме шликерного покрытия [6] с применением изотермического способа пиролиза метана.

Настоящее исследование является продолжением работ по разработке технологических основ изготовления герметичных конструкций из УУКМ и ставит целью исследование структуры насыщенного пироуглеродом шликерного подслоя и формирование на его поверхности пироуглеродного покрытия, включая отдельные стадии его роста, в едином изотермическом цикле пиролиза метана.

На рис. 1 приведена микроструктура шликерного подслоя, насыщенного пироуглеродом, при различных увеличениях, снятая с помощью оптического микроскопа Неофот-21 (а) и растрового электронного микроскопа PSEM-500 «Филипс» (б). Из рисунка 1а видно, что частицы графитового порошка в процессе их нанесения на поверхность несущей основы образуют конгломераты, которые вытягиваются в направлении приложенной деформации. Поперечное сечение таких конгломератов определяется размером частиц графитового порошка и составляет 10-18 мкм, в то время как их длина в 5-8 раз превышает их поперечное сечение. Как правило, такие образования имеют форму трапеции, которые вытянуты вдоль своих оснований, по границам которых в процессе насыщения пироуглеродом образуются поры размером 10-20 мкм.

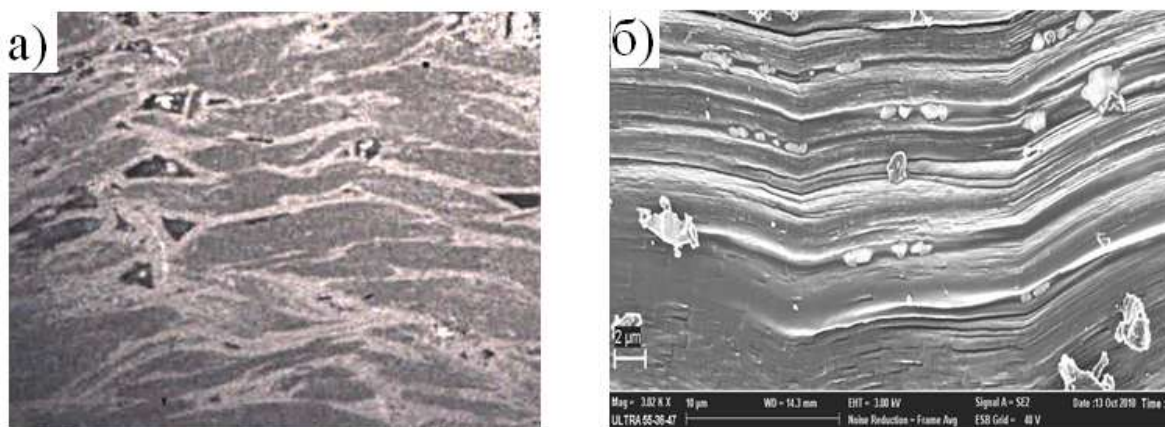


Рис. 1 – Микроструктура шликерного подслоя после насыщения пироуглеродом: а) x1020; б) x 5000 (растровая микроскопия).

Исследования конгломератов (рис. 1.б) с помощью растровой электронной микроскопии показали, что они состоят из блоков слоистого строения, имеющих высокодисперсную структуру, обусловленную начальными размерами графитового порошка.

При осаждении пироуглерода на поликристаллические подложки его начальные слои состоят из мелких зерен размером ≤ 1 мкм, что можно объяснить большим числом центров кристаллизации. В процессе насыщения конгломератов шликерного подслоя пироуглеродом начальные размеры его кристаллов соизмеримы с расстояниями между конгломератами и тем более между частицами порошка внутри конгломератов. Методами оптической и растровой микроскопии установлено, что максимальный размер по границам конгломератов составляет 0,6-1 мкм, а в теле самих блоков 0,2-0,4 мкм. Причина формирования такой дисперсной структуры вероятней всего заключается в повышении скорости образования центров кристаллизации, ядром которых являются активная поверхность мелкодисперсных графитовых частиц, а также некоторые пространственные затруднения для дальнейшего роста зародышей кристаллов. Такое слоистое строение с чередующимися фрагментами мелкодисперсной

матрицы из пироуглерода и высокодисперсного графитового каркаса является основной структурной предпосылкой увеличения прочностных характеристик шликерного подслоя и служит некоторой компенсацией снижения прочности за счет образования пор в структуре шликерного подслоя.

Как упоминалось ранее, временной цикл насыщения шликерного покрытия не завершает технологический процесс образования герметичной композиции, а на поверхности насыщенного подслоя должен быть сформирован пироуглеродный слой без прекращения технологического процесса в целом. Рост пироуглерода на подложках с такой шероховатостью предусматривает определенную стадию насыщения подложки пироуглеродом для сглаживания шероховатости. Поэтому только когда поток углерода внутрь подложки станет меньше некоторой величины, могут реализоваться условия осаждения пироуглерода на самой поверхности. Постепенное заращивание неровностей слоями пироуглерода позволит получить установившуюся скорость роста пироуглерода.

Выбор температуры осаждения пироуглеродного покрытия должен основываться на получении компактного пироуглеродного покрытия с почти теоретической плотностью. Температуры осаждения более 1000°C , при которых можно ожидать высокие скорости осаждения и, следовательно, сокращение технологического процесса, могут привести к развитию гомогенной реакции в объеме, образованию сажи и вторичных углеводородов [7]. Все это может привести к нарушению компактности пироуглеродного покрытия, уменьшению его плотности и, в итоге, к нарушению герметичности конструкции [8].

Поэтому для формирования пироуглеродного покрытия нами экспериментально выбран интервал температур $970\text{--}990^{\circ}\text{C}$, который должен обеспечить качественную и экономическую стороны процесса [5].

Микроструктура пироуглеродного покрытия включает в себя три стадии роста [9]: 1) зарождение и рост случайно ориентированных кристаллитов; 2) стабильный кооперативный рост столбчатых зерен с преимущественной ориентацией, перпендикулярной подложке; 3) неустойчивый, самостоятельный рост отдельных кристаллитов или их группы.

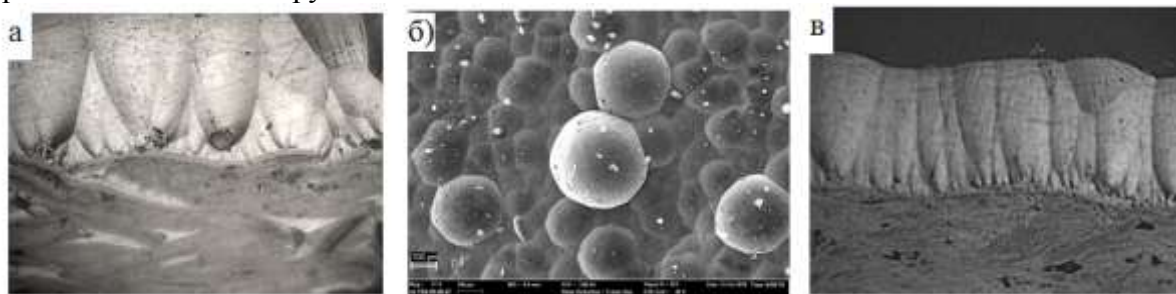


Рис.2 – Формирование пироуглеродного покрытия на шликерном подслое:
а) начальный рост, $\times 1020$; б) морфология роста, $\times 2000$ (растровая микроскопия); в) установившийся рост, $\times 510$

Стадия зарождения вызывает однородное и быстрое образование мелких зародышей на поверхности поликристаллической подложки (рис.2а). Дальнейший рост кристаллов подчиняется правилу геометрического отбора кристаллитов: кристаллиты растут медленнее всего в направлении, перпендикулярном к их граням, и с максимальной скоростью в направлении их вершин. Зерна с другими ориентациями уменьшаются в поперечном сечении и быстро исчезают после того, как их направление роста наталкивается на соседние быстрорастущие кристаллиты. Зарождение новых

кристаллов на поверхности растущих зерен обычно редко, поверхность остается макроскопически параллельна подложке, и общая граница между столбами располагается почти вертикально. Известен механизм самосогласованного совместного столбчатого роста с границами, перпендикулярными подложке [9]. Согласно этому механизму зарождение ступеней роста должно происходить на межзеренной границе, где количество дефектов решетки значительно больше, чем в теле зерна. Ступени роста образуются на общей границе и распространяются в равной степени по примыкающим граням. Однако, как показали наши исследования морфологии поликристаллической поверхности пироуглерода, она характеризуется крупными сфероидальными формами роста (рис.2,б) с выпуклыми вершинами зерен, которые указывают на то, что зарождение ступеней роста с большей скоростью происходит в центре зерна. В результате формируется пироуглеродное покрытие, обладающее столбчатой структурой, высокой плотности и определенной текстурой (рис.2,в).

Переход к третьей стадии роста, если она есть, характеризуется появлением пор по границам зерен. Рост дендритов можно также отнести к третьей стадии роста. Третья стадия в нашем случае реализуется достаточно редко.

Проведенные нами рентгеноструктурные исследования пироуглерода (на аппарате ДРОН-3, медное излучение) в ткане-прошивном каркасе, шликерном подслое и слоях пироуглеродного покрытия не обнаружили других форм углерода кроме графита. По-видимому, для достижения эффекта фракционирования других форм углерода, таких как алмаз [10], карбины, чаоит [11,12], кубический графит [13], необходимы большие содержания в газовой смеси водорода, который оказывает доминирующее влияние на рост различных форм углерода [14]. Для наших целей высокое содержание водорода в газовой смеси оказывает отрицательное влияние на кинетику процесса осаждения пироуглерода и на насыщение пироуглеродом пористой среды, поэтому его содержание ограничивалось 10-15 %.

Процесс формирования компактного пироуглеродного покрытия может быть с большой достоверностью спрогнозирован с помощью уравнения приведённого нами в [5]. Сравнение расчетных и многочисленных экспериментальных данных показало, что различие между ними практически отсутствует ($\pm 5\%$). При этом на шликерном подслое образуются компактные пироуглеродные осадки практически теоретической плотности.

Выводы

1. Микроструктура шликерного подслоя, насыщенного пироуглеродом представляет собой конгломераты, вытянутые в направлении приложенной деформации. Показано, что конгломераты состоят из блоков слоистого строения, имеющих высокодисперсную структуру, что является основной структурной предпосылкой увеличения прочностных характеристик шликерного подслоя.

2. Установлено, что первоначальный рост пироуглеродного покрытия на шликерном подслое вызывает однородное образование мелких зародышей, дальнейший рост которых подчиняется правилу геометрического отбора: кристаллиты растут с максимальной скоростью в направлении их вершин, что формирует столбчатую структуру, почти с теоретической плотностью.

Список литературы:

1. В.М. Бушуев, П.Г. Удинцев, В.Ю. Чунаев, А.Н. Ершова. Перспективы применения углеродных композиционных материалов в химическом аппаратостроении // Химическая промышленность. 2003. т. 80., № 3. С.38-45.
2. В.М. Бушуев, П.Г. Удинцев, В.Ю. Чунаев, А.Н. Ершова. Разработка и перспективы применения углеродных композиционных материалов в технологической оснастке, применяемой при проведении высокотемпературных процессов // Электрохимия. 2003, № 12. С. 120-127.
3. В.М. Бушуев, И.Л. Синани, Н.А. Хохлявин. Разработка эффективной технологии изготовления герметичных к расплаву и парам кремния реторт, применяемых в процессе парофазного силицирования // Перспективные материалы. 2010 г. № 9а, С. 105-110.
4. И.Л. Синани, В.М. Бушуев, Р.К. Мусин. Закономерности пироуплотнения тканепрошивных углеродных каркасов в термоградиентном режиме для изготовления герметичных конструкций // Научно-технический вестник Поволжья, 2012, №1, С.125-130.
5. И.Л. Синани В.М. Бушуев Кинетика кристаллизации пироуглерода при пиролизе метана // Коррозия, материалы, защита, 2012, №2, С. 28-32.
6. И.Л. Синани, В.М. Бушуев, Я.В.Лямин. Кинетика объемного насыщения пироуглеродом пористой углеродной среды // Научно-технический вестник Поволжья, 2012, №1, С. 121-124.
7. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учебн. для вузов. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 1998. – 516 с.
8. Пат РФ 2186726 кл. СО1В31/00 от 26.11.2001. Способ герметизации изделий из углеграфитовых материалов / В.М. Бушуев и др.
9. Holman W.R., Huegel F.J. // Jbid. – 1968. –Vol.5. – Р. 127-148.
10. Д.В. Федосеев, В.В. Дерягин, В.П. Варнин и др. // ДАН СССР, 1976, № 228, С. 371.
11. В.И. Касаточкин, В.В. Коршак, К.П. Кудрявцев и др. // ДАН СССР, 1974, № 214, С. 587.
12. Касаточкин В. И., Штеренберг Л.Е., Казаков М.К. и др. // ДАН СССР, 1973, № 209, С. 388.
13. Aust R. B., Drickamer H. G. // Science. 1963, Vol. 140, P. 817.
14. Федосеев Д.В., Галимов Э.М. и др. // ДАН СССР, 1971, № 201, С. 1149.

А. Б. Ветошкин к.т.н., Д. В. Куделин, Т. Н. Несиоловская д.т.н.

Ярославский государственный технический университет
химико-технологический факультет
кафедра «Химия и технология переработки полимеров»
Россия, г. Ярославль
nesiolovskayatn@ystu.ru

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ИСПЫТАНИЯ НА ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА УСИЛЕНИЯ НАПОЛНЕННЫХ БУТАДИЕН-СТИРОЛЬНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ

Показано, что эффективность применения наполнителей в некристаллизующихся эластомерах определяется геометрическим усилением, ориентацией макромолекул при деформировании, распределением цепей по натяжениям, характером тяжей. Превалирующее влияние того или иного фактора, определяющего уровень свойств наполненных резин, зависит от условий испытания.

Ключевые слова: сложнодеформированное состояние, одноосное растяжение, деформационно-прочностные свойства, сопротивление раздиру, геометрическое усиление.

Эффективным и относительно простым способом повышения работоспособности изделий в соответствии с непрерывно растущими запросами потребителей является совершенствование рецептуры за счет наполнения резин. Эффект усиления резин активным наполнителем проявляется в таких отличиях их механического поведения от ненаполненных вулканизатов, как увеличение жесткости, повышение уровня предельных характеристик и др. [3]. Испытания резин, подтверждающие эти явления, проводят обычно в условиях одноосного растяжения. В реальных условиях эксплуатации большинство изделий работают в сложнапряженном состоянии, при отсутствии преимущественного направления действия внешней силы, что, безусловно, вносит коррективы в поведение резин.

В этой связи целью настоящей работы явилось изучение влияния режима нагружения на эффект усиления резин на основе каучука СКМС-30АРК. В качестве наполнителя использовали техуглерод марки N339, в количестве от 10 до 50 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука.

Исследовали деформационно-прочностные характеристики резин и сопротивление раздиру. Одноосное растяжение реализовывали в соответствии с действующими стандартами. Сложнапряженное состояние моделировали продавливанием круглой резиновой диафрагмы стальным сферическим индентором с помощью специальных реверсивных приставок для стандартных испытательных машин [2]. Концентрацию напряжений при раздире создавали путем нанесения сквозного надреза длиной 1 ÷ 4 мм в центральной части диафрагмы.

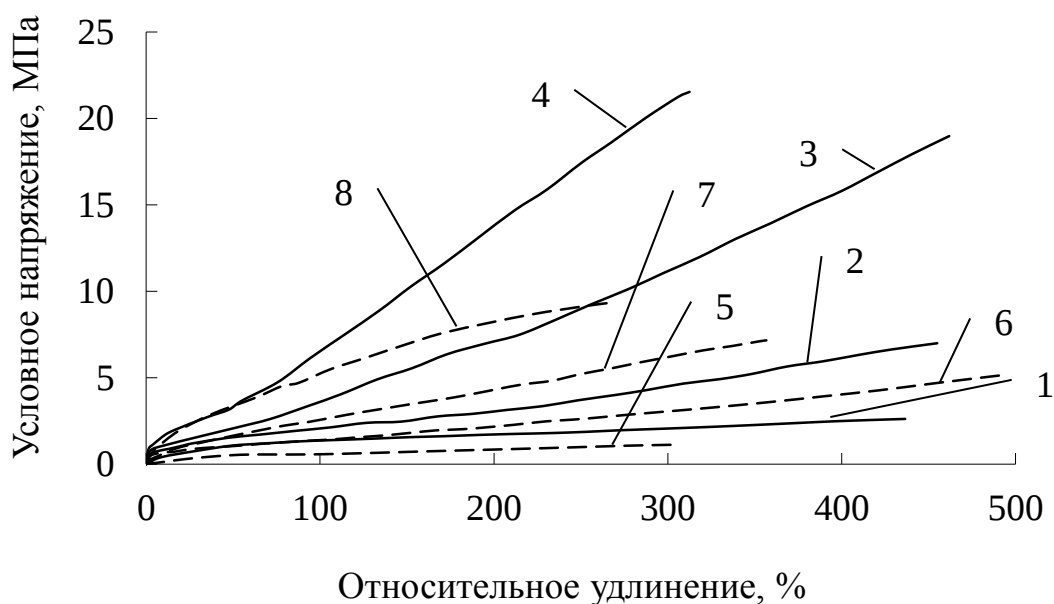
Коэффициент усиления ($k_{ус}$) рассчитывали как:

$$k_{ус} = \frac{P_{нап}}{P_{ненап}}, \quad 1)$$

где $P_{нап}$ – показатель наполненной резины;

$P_{ненап}$ – соответствующий показатель ненаполненной резины.

Ненаполненная резина на основе СКМС-30АРК при испытании в режиме одноосного растяжения ведет себя типично для эластомеров – закон Гука выполняется при малых деформациях, в дальнейшем высоким деформациям соответствуют незначительные изменения напряжения. В условиях сложноподпряженного состояния закон Гука не выполняется, чем и обусловлены очень низкие значения напряжений. Влияние активного наполнителя на деформационно-прочностные свойства резин в условиях сложноподпряженного состояния аналогично тому, которое наблюдается при одноосном растяжении: кривая растяжения идет тем выше, чем больше в резине активного наполнителя (рисунок 1). Это явление можно объяснить геометрическим усилением – деформация наполненной резины ниже, чем истинная деформация матрицы, т.к. деформация агрегатов наполнителя практически отсутствует. При этом положение кривых растяжения при испытании как ненаполненных, так и наполненных резин в сложноподпряженном состоянии ниже, чем при испытании их в условиях одноосного растяжения. Отличие, по-видимому, связано с тем, что при одноосном растяжении, уже при небольших деформациях начинается перестройка исходной надмолекулярной структуры материала, связанная с ориентированием макромолекул и надмолекулярных образований вдоль оси нагружения. К моменту разрушения параметры вновь образованной ориентированной структуры резины вносят основной вклад в уровень её предельных характеристик [4].



1, 2, 3, 4 – одноосное растяжение; 5, 6, 7, 8 – сложноподпряженное состояние.
Содержание техуглерода, масс. ч.: 1, 5 – 0; 2, 6 – 10; 3, 7 – 30; 4, 8 – 50.

Рис. 1– Зависимость напряжение – деформация резин от содержания наполнителя.

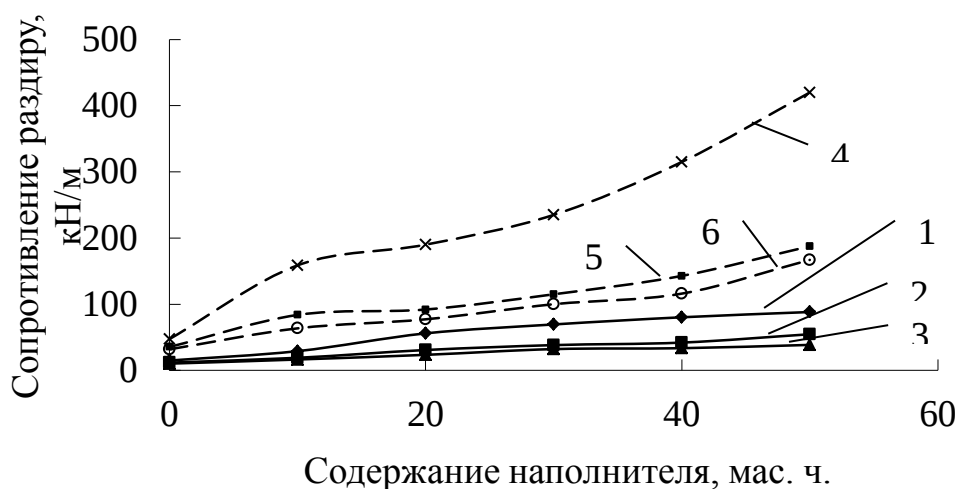
Следует отметить, что коэффициент усиления резин при малых деформациях выше для испытаний в условиях сложноподпряженного состояния во всем диапазоне наполнения, что связано с отличием в поведении ненаполненных резин. С увеличением деформации значения коэффициентов усиления сближаются (таблица 1).

Таблица 1– Коэффициенты усиления резин, рассчитанные по деформационно-прочностным показателям

$k_{\text{ус}}$ при удлинении	Условия испытания							
	Одноосное растяжения				Сложнонапряженное состояние			
	Содержание техуглерода, мас.ч.							
	10	30	40	50	10	30	40	50
10%	1.9	2.5	3.9	3.9	5.6	5.1	7.5	10.6
30%	1.6	2.0	3.1	3.2	2.5	3.4	5.4	7.1
300%	2.1	5.2	8.0	10.0	3.2	5.6	8.3	-
в момент разрыва	2.7	7.3	7.4	8.3	4.7	6.4	8.4	8.4

* – разрушение образца произошло при удлинении менее 300%

Введение активного наполнителя приводит к росту сопротивления раздиру как при испытаниях в условиях одноосного растяжения, так и в сложнонапряженном состоянии (рисунок 2).



1, 2, 3 – одноосное растяжение; 4, 5, 6 – сложнонапряженное состояние.
Размер дефекта, мм: 1, 4 – 1; 2, 5 – 3; 3, 6 – 4.

Рис. 2– Влияние техуглерода на сопротивление резин раздиру.

Это согласуется с представлениями о способности каучука к тяжеобразованию [1]. Как известно некристаллизующиеся каучуки не обеспечивают вулканизатам сколько либо существенную способность к тяжеобразованию. Введение технического углерода увеличивает способность к тяжеобразованию резин на основе СКМС-30АРК, что выражается ростом сопротивления раздиру. Уровень сопротивления раздиру во всем диапазоне наполнения техническим углеродом выше для сложнонапряженного состояния. По-видимому, тяжи нужно рассматривать как одну из составляющих процесса усиления. Превалирующую роль будет играть среднее натяжение цепей, зависящее от локального изменения взаимного расположения соседних агрегатов в процессе деформирования всего образца. Поскольку при деформировании в сложнонапряженном состоянии происходит не только увеличение расстояния между частицами наполнителя, но и повороты агрегатов, можно предположить, что в данном

случае существует совокупность цепей, имеющих разные функции распределения по натяжениям, что обеспечивает рост предельной нагрузки.

Размер дефекта, и в тех и в других условиях испытания, оказывает отрицательное влияние на величину сопротивления раздиру.

Коэффициент усиления несколько выше для случая сложнапряженного состояния, что особенно заметно при высоком содержании наполнителя (таблица 2).

Таблица 2– Коэффициенты усиления резин, рассчитанные по сопротивлению раздиру

k_{yc} при размере дефекта	Условия испытания									
	Одноосное растяжение					Сложнонапряженное состояние				
	Содержание техуглерода, мас. ч.									
	10	20	30	40	50	10	20	30	40	50
1 мм	2.0	3.8	4.7	5.4	5.9	3.4	4.0	5.0	6.6	8.9
3 мм	1.6	2.6	3.3	3.4	4.7	2.4	2.5	3.1	4.0	5.3
4 мм	1.6	2.3	3.2	3.3	3.8	2.0	2.4	3.5	3.6	5.2

Во всех случаях результаты испытаний лежат в пределах доверительного интервала, что позволяет считать полученные данные корректными.

Таким образом, эффективность применения активных наполнителей в некристаллизующихся эластомерах определяется так называемым геометрическим усилением, ориентацией макромолекул при деформировании, распределением цепей по натяжениям, характером тяжей. Условия испытания оказывают значимое влияние на проявление эффекта усиления бутадиен-стирольных эластомеров. Если при одноосном растяжении основной вектор внешнего напряжения совпадает с направлением ориентации макромолекул в материале и возникающая анизотропия свойств является основным положительным фактором, то в сложнапряженном состоянии разрушение материала, по-видимому, происходит за счет «расщепления» надмолекулярных структур, вследствие чего процессы ориентации не имеют решающей роли. Особенности проявления эффекта усиления бутадиен-стирольных эластомеров дают новые подходы к прогнозированию работоспособности резиновых изделий.

Список литературы:

1. Зуев Ю.С. Разрушение эластомеров в условиях, характерных для эксплуатации. – М.: Химия, 1980. 288 с.
2. Куделин Д.В., Ветошкин А.Б., Соловьев М.Е., Барышев А.С., Гудков С.В. Деформационно-прочностные свойства резин в сложнапряженном состоянии // Сб-к тез. докл. 7-й Украинской с международным участием научно-технической конференции резинщиков «Эластомеры: материалы, технология, оборудование, изделия». – Днепропетровск. 2008. с. 34-35.
3. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. – М.: Химия, 1991. 261 с.
4. Тугов И.И., Кострыкина Г.И. Химия и физика полимеров: Учебное пособие для вузов. – М.: Химия, 1989. 432 с.

Д. В. Вожегов, Д. А. Страбыкин д.т.н

«Вятский государственный университет»
факультет автоматизации и вычислительной техники
кафедра электронных вычислительных машин
Россия, г. Киров
vodimetry@rambler.ru

МЕТОД ПАРАЛЛЕЛЬНОГО АБДУКТИВНОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ФАКТОВ

Предлагается метод параллельного абдуктивного вывода с определением фактов. Дается формальная постановка задачи. Описываются основные процедуры метода. Приводится пример логического вывода.

Ключевые слова: абдуктивный логический вывод, определение фактов, параллельные вычисления.

Моделирование правдоподобных рассуждений относится к одному из разделов искусственного интеллекта, связанному с представлением, пониманием и управлением поведением различных систем в условиях неполной или некорректной информации [1]. В этой связи заслуживает внимания исследование и разработка новых видов и методов логического вывода, связанных с моделированием правдоподобных рассуждений. Актуальность подобных работ обусловлена потребностями постоянно расширяющейся области целесообразного применения систем искусственного интеллекта.

В работе предлагается метод параллельного абдуктивного вывода с определением фактов, в основе которого лежит процедура поиска фактов [2], использующая операцию деления дизъюнктов. Метод позволяет определить факты, которые привели к успешному выводу, при этом не прерывает процедуру вывода, а также является параллельным и двунаправленным.

Постановка задачи. Представим исходные посылки множеством дизъюнктов $M = M' \cup F$, где M' – дизъюнкты посылок, содержащие два и более литерала, F – однолитеральные дизъюнкты – факты. Заключение (наблюдение) представим множеством дизъюнктов – m , а дополнительные посылки – M^D . Множество определяемых фактов (однолитеральных дизъюнктов) будет состоять из двух подмножеств: фактов основных – E и фактов дополнительных – F^{Dn} посылок. Тогда задача абдуктивного логического вывода с определением фактов может быть сформулирована следующим образом.

Установить, является ли заключение логическим следствием исходных посылок: $M \Rightarrow m$, и, если дедуктивный логический вывод успешен, то определить множество участвующих в нем фактов: $E \in F$ [2].

Если заключение не является логическим следствием исходных посылок, то определить множество дополнительных посылок M^D и множество фактов $E \in F$, обеспечивающих успешный дедуктивный логический вывод заключения: $M \cup M^D \Rightarrow m$. И, если абдуктивный логический вывод успешен (множество $M \cup M^D$ – непротиворечиво), то определить множество F^D возможных дополнительных фактов $F^D = \{L_1, \dots, L_G\}$ и семейство s множеств F^{Dn} дополнительных фактов $s = \{F^{D1}, F^{D2}, \dots, F^{Dn}, \dots, F^{DN}\}$, а также определить семейство S множеств дополнительных

посылок M^{DFn} , содержащих факты, которые обеспечивают успешный дедуктивный вывод заключения $S=\{M^{DF1}, M^{DF2}, \dots, M^{DFn}, \dots, M^{DFN}\}$.

Абдуктивный логический вывод с определением фактов завершается успешно, если $M \Rightarrow m$ и $E \neq \emptyset$ ($E \in F$) или $M \cup M^D \Rightarrow m$ (множество $M \cup M^D$ – непротиворечиво) и

$$\bigcup_{n=1}^N (M^{DFn} \cap F^D) \neq \emptyset, M \cup M^{DFk} \Rightarrow m \text{ (множество } M \cup M^{DFk} \text{ – непротиворечиво) } M^{DFk} \in S,$$

$k=1, \dots, K; 1 \leq K \leq N$. При этом для k -го ($k=1, \dots, K$) успешного варианта абдуктивного логического вывода формируется два множества фактов: $E \in F$ и $F^{Dk} \in S$ таких, что $E \cup F^{Dk} \neq \emptyset$.

Формирование множества дополнительных посылок. Определение выводимости заключения из исходных посылок и формирование множества дополнительных посылок совмещаются в методе абдуктивного логического вывода в едином процессе специального дедуктивного вывода, основанном на процедуре вывода.

Процедура вывода. Специальный дедуктивный вывод использует процедуру вывода $W' = \langle M', F, d, q, p, M'_1, m, \partial, E \rangle$, в которой: $M' = \{D_1, D_2, \dots, D_i, \dots, D_I\}$ – множество исходных дизъюнктов, $D_i = L_1^i \vee L_2^i \vee \dots \vee L_j^i \vee \dots \vee L_{J_i}^i$ – дизъюнкт i -й секвенции, состоящий из двух и более литералов L_j^i ; $F = \{L^1, L^2, \dots, L^V\}$ – множество однолитеральных исходных дизъюнктов (фактов); $d = L_1 \vee L_2 \vee \dots \vee L_k \vee \dots \vee L_K$ – дизъюнкт заключения, состоящий из литералов L_k ; q, p – пара признаков: q – признак решения ($q=0$ – есть решение, $q=1$ – нет решения), p – признак возможности продолжения вывода ($p=1$ – продолжение вывода не возможно, $p=0$ – продолжение вывода возможно); M'_1 – новое множество исходных дизъюнктов; m – новое множество выводимых дизъюнктов; ∂ – дополнение, которое представляет собой вспомогательный остаток, используемый при формировании дизъюнктов дополнительных исходных посылок; E – множество фактов ($E \in F$), обеспечивающих успешный дедуктивный логический вывод заключения.

Вычисление дополнения. Дополнение ∂ вычисляется с помощью операции группового деления дизъюнктов [3]. Операция группового деления дизъюнкта d на множество дизъюнктов $M_0 = \{D_g, g=1, \dots, G\}$, результатом которой является остаток ∂ , записывается так: $d \% M_0 = \partial$.

Обозначим через $\tilde{D}_g = \{L_j^g, j=1, \dots, J_g\}$, $\tilde{d} = \{L_k, k=1, \dots, K\}$ множества литералов, входящих соответственно в дизъюнкты D_g и d , а через $\emptyset$ – пустое множество. Кроме того, символ “-” будем использовать как знак разности множеств. Тогда остаток ∂ определится следующим образом:

- 1) если $\tilde{d} \cap (\bigcup_{g=1}^G \tilde{D}_g) = \emptyset$, то $\partial = 1$;
- 2) если $\tilde{d} \cap (\bigcup_{g=1}^G \tilde{D}_g) \neq \emptyset$ и $\tilde{d} - (\bigcup_{g=1}^G \tilde{D}_g) = \emptyset$, то $\partial = 0$;
- 3) если $\tilde{d} \cap (\bigcup_{g=1}^G \tilde{D}_g) \neq \emptyset$ и $\tilde{d} - (\bigcup_{g=1}^G \tilde{D}_g) = \tilde{\partial}$, $\tilde{\partial} \neq \emptyset$,
то $\partial = L_1 \vee L_2 \vee \dots \vee L_u \vee \dots \vee L_U$, где $L_u \in \tilde{\partial}$ ($u=1, \dots, U$) и $\tilde{\partial} = \{L_1, L_2, \dots, L_U\}$.

Выполнение процедуры вывода. Процедура вывода применима, если $M \neq \emptyset$ и $J_i, K \geq 1$ ($i=1, \dots, I$). При $M=\emptyset$ в W' -процедуре сразу устанавливается $q=p=1, \partial=d$. Иначе выполняются следующие действия.

1. Формируются и упрощаются остатки исходных дизъюнктов:

1) исходные дизъюнкты делятся на выводимый дизъюнкт: $b_i = D_i \div d, i=1, \dots, I$. Если существуют остатки от деления $b_i=0$ и D_i - факты, то они включаются во множество E . Причем, если хотя бы один остаток $b_i=0$, то устанавливается $q=0, p=1, \partial=0$ и производится переход к п.7 (вывод успешно завершается), иначе выполняется следующее действие.

2) Исключаются остатки $b_i=1$. Если все остатки равны единице, то вывод не возможен; устанавливается $q=p=1, \partial=d$ и производится переход к п.7, иначе выполняется следующее действие.

3) Проверяется наличие фактов. Если фактов нет ($F=\emptyset$), то принимается $B_k=b_k, k=1, \dots, K$ (где K число остатков, полученных после удаления единичных остатков) и выполняется п.3. Иначе остатки b_k делятся специальным образом на вспомогательный дизъюнкт $\Gamma = \overline{L^1} \vee \overline{L^2} \vee \dots \vee \overline{L^V}$, составленный из инверсий литералов фактов: $B_k = b_k \div \Gamma, k=1, \dots, K$. Деление осуществляется по правилам: $B_k = b_k$, если $R_k = b_k \div \Gamma = 1$ и $B_k = R_k$ - в противном случае.

2. Формируется множество фактов, участвующих в обеспечении успешного дедуктивного логического вывода заключения. Определяется множество $e = \{\overline{L^1}, \overline{L^2}, \dots, \overline{L^W}\}$ инверсий литералов фактов, использованных при вычислении остатков

$B_k, k=1, \dots, K: e = \tilde{\Gamma} \cap (\bigcup_{k=1}^K \tilde{b}_k)$, где $\tilde{\Gamma}$ - множество литералов дизъюнкта Γ , а $\tilde{b}_k$ -

множество литералов остатка b_k . Вычисляется множество фактов E , путем инвертирования литералов множества $e: E = \{L^1, L^2, \dots, L^W\}$. Проверяются остатки $B_k, k=1, \dots, K$, если хотя бы один остаток $B_k=0$, то устанавливается $q=0, p=1, \partial=0$ и производится переход к п.7 (вывод успешно завершается), иначе выполняется следующий пункт.

3. Составляется выражение $\bigwedge_{k=1}^K B_k$, которое упрощается путем перемножения

дизъюнктов и исключения конъюнкций, содержащих сомножители вида $L \& \overline{L}$ ($0 \& L$). Производится проверка: не равняется ли полученное выражение нулю. Если преобразуемое таким образом выражение равно нулю, то устанавливается $q=0, p=1, \partial=0$ и осуществляется переход к п.7 (вывод успешно завершается); в противном случае выполняется следующий пункт.

4. Полученное в п.3 выражение после перемножения дизъюнктов и упрощения является дизъюнктивной формой вида: $X_1 \vee X_2 \vee \dots \vee X_p \vee \dots \vee X_P$, в которой $X_p = L_1^p \& L_2^p \& \dots \& L_{R_p}^p$. Эта дизъюнктивная форма разделяется на множество конъюнкций: $L_1^p \& L_2^p \& \dots \& L_{R_p}^p, p=1, 2, \dots, P$. Затем каждая такая конъюнкция X_p инвертируется $\overline{X_p}$ и трансформируется в новый выводимый дизъюнкт $\overline{L_1^p} \vee \overline{L_2^p} \vee \dots \vee \overline{L_{R_p}^p}$. Полученные таким образом дизъюнкты включаются во множество m . Устанавливаются значения признаков: $q=1$ и $p=0$.

5. Формируется новое множество исходных дизъюнктов: $M'_1 = M' - M_0$, где M_0 – подмножество дизъюнктов множества M' , для которых выполняется условие $D \div d \neq 1$.

6. Вычисляется дополнение ∂ для дизъюнкта d с помощью операции группового деления дизъюнктов: $\partial = d \% M_0$.

7. Фиксируются результаты выполнения процедуры W' .

Специальный дедуктивный вывод. Специальный дедуктивный вывод методом деления дизъюнктов заключается в многократном применении W' -процедур и состоит из ряда шагов. На каждом шаге вывода W' -процедуры применяются к имеющимся выводимым и соответствующим им исходным дизъюнктам, образуя новые выводимые и новые исходные дизъюнкты, используемые на следующем шаге. В процессе логического вывода строится формула дополнительных посылок, на случай не успешного завершения вывода. Процесс вывода заканчивается, когда для каждого выводимого на очередном шаге дизъюнкта или будет получено решение ($q=0$), или будет установлено, что продолжение вывода не возможно ($p=1$). Причем, вывод завершается успешно, если для всех, выводимых на последнем шаге дизъюнктов, были получены решения ($q=0$).

Для более полного описания параллельного алгоритма формирования множества дополнительных посылок воспользуемся специальной индексной функцией, обеспечивающей уникальную идентификацию каждой процедуры и ее параметров. [2].

Индексная функция $i(h)$ определяется для индексной переменной t индуктивно следующим образом: $i(1)=t$, $t=1, \dots, T$; $i(2)=t.t_i=i(1).t_{i(1)}$, $t_{i(1)}=1, \dots, T_{i(1)}$; $i(3)=t.t_i.t_E$ ($E=t.t_i$), $i(3)=i(2).t_{i(2)}$, $t_{i(2)}=1, \dots, T_{i(2)}$; и т.д. В общем случае: $i(h+1)=i(h).t_{i(h)}$, $t_{i(h)}=1, \dots, T_{i(h)}$.

Будем считать, что $i(0)$ означает отсутствие индекса у индексируемой переменной, например, $T_{i(0)}=T$, а также, что $i(1)=i(0).t_{i(0)}=t$.

Кроме этого, введем обозначения: h – номер шага вывода, Q – общий признак решения ($Q=0$ – есть решения, $Q=1$ – нет решений), P – общий признак возможности продолжения вывода ($P=1$ – продолжение вывода не возможно, $P=0$ – продолжение вывода возможно), Ψ – формула дополнительных посылок, а M^D – множество дизъюнктов дополнительных посылок. Тогда описание метода можно представить в следующем виде.

$$W' = \langle M', F, d, q, p, M'_{1,m}, \partial, E \rangle,$$

1. Определяются начальные значения: $h=1$, $M'_{i(0)}=M'$, $m=\{d_1, \dots, d_T\}$, $i(1)=t$; $t=1, \dots, T$, где T – число дизъюнктов в выводимой секвенции; $E_0=\emptyset$.

2. Выполняются W' -процедуры текущего (h -го) шага. Для выводимых дизъюнктов множества m на первом шаге ($h=1$), а в последующем ($h>1$) для дизъюнктов множеств $m_{i(h-1)}$, полученных в процедурах предыдущего шага, характеризующихся признаками $p_{i(h-1)}=0$ и $q_{i(h-1)}=1$ выполняются следующие W' -процедуры:

$$W'_{i(h)} = \langle M'_{i(h-1)}, F, d_{i(h)}, q_{i(h)}, p_{i(h)}, M'_{i(h)}, m_{i(h)}, \partial_{i(h)}, E_{i(h)} \rangle,$$

$$i(h)=i(h-1).t_{i(h-1)}; t_{i(h-1)}=1, \dots, T_{i(h-1)}.$$

3. Формируются значения общих признаков решения (Q_h) и окончания вывода (P_h), строится формула (Ψ) дополнительных посылок и определяется множество фактов (E) успешного дедуктивного вывода:

$$Q_h = \bigvee_{A=1}^B q_{i(h)}, P_h = \bigwedge_{A=1}^B (\bar{q}_{i(h)} \vee p_{i(h)}); \Psi_{i(h-1)} = \bigwedge_{A=1}^B (\partial_{i(h)} \vee \bar{p}_{i(h)} \Psi_{i(h)} \vee \bar{q}_{i(h)});$$

$$E_h = E_{h-1} \cup \bigcup_{A=1}^B E_{i(h)}; \text{ где } A=t_{i(h-1)}, B=T_{i(h-1)}.$$

4. Проверяются значения общих признаков решения (Q_h) и окончания вывода (P_h). Если $Q_h=0$, то вывод успешно завершается. В этом случае устанавливается $Q=0$, $P=P_h$, $M^D=\emptyset$ и выполняется п. 6. При $Q_h=1$ анализируется признак P_h . Если $P_h=0$, то h увеличивается на единицу и выполняется п.2 (процесс продолжается). Иначе ($P_h=1$) устанавливается $P=1$ и выполняется следующий пункт.

5. Формула дополнительных посылок Ψ преобразуется в конъюнктивную нормальную форму: $\Psi=D_{I+1}D_{I+2}...D_{I+n}...D_{I+N}$. Дизъюнкты этой формы и образуют множество дизъюнктов дополнительных посылок: $M^D=\{D_{I+n}, n=1,...,N\}$.

6. Специальный дедуктивный вывод завершается. Причем, при $Q=0$ вывод завершается успешно и дополнительные посылки не требуются. Факты успешного дедуктивного вывода содержатся во множестве $E=E_h$. При $Q=1$ вывод завершается неудачно, но в результате вывода формируется множество дизъюнктов дополнительных посылок M^D .

Метод параллельного абдуктивного вывода с определением фактов.

Входными данными метода являются: множество дизъюнктов исходных посылок M ($M=M'\cup F$, где M' – дизъюнкты посылок, содержащие два и более литерала, F – однолитеральные дизъюнкты – факты) и множество дизъюнктов заключения m . А выходными данными метода являются: признак завершения абдуктивного вывода Θ , семейство множеств фактов $E\cup F^{Dk}$, содержащее множество фактов успешного дедуктивного вывода E и семейство множеств дополнительных фактов абдуктивного вывода $F^{Dk}\in S$, а также семейство дополнительных посылок $M^{DFk}\in S$, $k=1,...,K$.

Признак Θ имеет два значения. Если $\Theta=0$, то вывод завершен успешно и дизъюнкты дополнительных посылок содержатся во множестве M^D , причем, при $M^D=\emptyset$ дополнительные посылки не требуются. Если $\Theta=1$, то вывод завершен неудачно (объединенное множество дизъюнктов исходных и дополнительных посылок является противоречивым).

Метод абдуктивного логического вывода с определением фактов состоит из следующих преобразований.

1. Производится формирование множества дополнительных посылок M^D для заданных множеств дизъюнктов исходных посылок (M) и наблюдения (m). Если в результате выполнения специального дедуктивного вывода выясняется, что дополнительные посылки не требуются ($Q=0$), то принимается $\Theta=0$ и абдуктивный вывод успешно завершается. При этом факты успешного дедуктивного вывода содержатся во множестве E . Иначе выполняется второе преобразование.

2. Анализируется противоречивость множества дизъюнктов дополнительных посылок и выполняется проверочный дедуктивный вывод. Производится конъюнктивное перемножение дизъюнктов дополнительных посылок: $f=D_{I+1}\&D_{I+2}\&... \&D_{I+N}$. Если $f=0$, то множество дизъюнктов дополнительных посылок противоречиво. Принимается $\Theta=1$, $M^D=\emptyset$ и абдуктивный вывод завершается неудачно. Иначе формула f инвертируется, и полученные конъюнктивные сомножители образуют множество m' выводимых дизъюнктов для проверочного дедуктивного вывода.

Выполняется проверочный дедуктивный вывод дизъюнктов множества m' из множества дизъюнктов исходных посылок M . Если этот вывод завершается успешно, то это означает противоречивость объединенного множества дизъюнктов посылок. Принимается $\Theta=1$, $M^D=\emptyset$ и абдуктивный вывод с определением фактов завершается неудачно. Напротив, если проверочный дедуктивный вывод завершается неудачно, то объединенное множество дизъюнктов посылок не противоречиво, что свидетельствует об успешном окончании абдуктивного логического вывода. Устанавливается $\Theta=0$, при

этом множество M^D содержит дизъюнкты дополнительных посылок. Выполняется следующее преобразование.

3. Формируется множество F^D возможных дополнительных фактов $F^D = \{L_1, \dots, L_G\}$ абдуктивного вывода, содержащее все не инверсные литералы дополнительных посылок. Определяется семейство s множеств F^{Dn} дополнительных фактов $s = \{F^{D1}, F^{D2}, \dots, F^{Dn}, \dots, F^{DN}\}$, представляющее собой все возможные сочетания литералов множества дополнительных фактов F^D ($N=2^G-1$).

4. Формируется семейство S множеств дополнительных посылок M^{DFk} , содержащих факты, которые обеспечивают успешный вывод заключения $S = \{M^{DF1}, M^{DF2}, \dots, M^{DFk}, \dots, M^{DFK}\}$. Каждое множество M^{DF} семейства S проверяется на противоречивость.

Формирование множества M^{DF} производится следующим образом. Осуществляется деление каждого дизъюнкта D'' множества M^D на дизъюнкт d'' , составленный из литералов соответствующего множества F^D : $b'' = D'' \div d''$. Если остаток $b'' = 1$, то соответствующий ему дизъюнкт D'' сохраняется во множестве дополнительных посылок M^{DF} . В противном случае дизъюнкт D'' исключается из множества M^{DF} . В семейство S включаются множества M^{DF} , которые содержат не исключенные дизъюнкты посылок и литералы фактов из соответствующих им множеств фактов F^D .

Осуществляется проверка на противоречивость каждого множества дизъюнктов дополнительных посылок M^{DF} (с помощью конъюнктивного перемножения дизъюнктов множества M^{DF}) и объединенного множества дизъюнктов M исходных и дополнительных M^{DF} (с помощью проверочного дедуктивного логического вывода). Множества M^{DF} , приведшие к противоречивости при любой из указанных проверок, исключаются из семейства множеств дополнительных посылок S . Если после проверок $S = \emptyset$, то $\Theta = 1$, и абдуктивный вывод с определением фактов завершается неудачно. В противном случае устанавливается $\Theta = 0$. При этом каждое множество дизъюнктов дополнительных посылок M^{DF} , входящее в семейство S , содержит факты из соответствующего множества возможных фактов F^D . Множества найденных фактов, входящих во множества дополнительных посылок, обеспечивающих успешный дедуктивный вывод заключения, после объединения с множеством фактов успешного дедуктивного вывода (E), образуют искомое семейство множеств фактов $E \cup F^{Dk}$, $k=1, \dots, K$.

Пример. Требуется выполнить абдуктивный логический вывод с определением фактов заключения (наблюдения) d_1 из множества посылок $M = \{D_1, D_2, D_3\}$ представленных дизъюнктами: $d_1 = \neg A \vee G$; $D_1 = \neg A \vee B$; $D_2 = \neg E \vee F$; $D_3 = \neg D \vee \neg C \vee F \vee G$. При этом $M = M'$, так как $F = \emptyset$.

1. Производится формирование множества дополнительных посылок для заданного множества дизъюнктов исходных посылок M^D . Специальный дедуктивный вывод в примере заканчивается на третьем шаге неудачно: заключение d_1 не является следствием исходных посылок D_1, D_2, D_3 .

2. Анализируется противоречивость множества дизъюнктов дополнительных посылок и выполняется проверочный дедуктивный вывод. В примере $M^D = \{D_4, D_5, D_6\}$, где $D_4 = \neg B \vee D$, $D_5 = \neg B \vee C$, $D_6 = \neg B \vee E$. При этом $M \cup M^D \Rightarrow d_1$ и множество $M \cup M^D$ – непротиворечиво.

3. Формируется множество F^D возможных дополнительных фактов абдуктивного вывода $F^D = \{C, D, E\}$, содержащее все не инверсные литералы дополнительных посылок. Определяется семейство s множеств дополнительных фактов $s = \{F^{D1}, \dots, F^{D7}\}$,

представляющее собой сочетания литералов множества дополнительных фактов: $F^{D1}=\{C\}$, $F^{D2}=\{D\}$, $F^{D3}=\{E\}$, $F^{D4}=\{C,D\}$, $F^{D5}=\{C,E\}$, $F^{D6}=\{D,E\}$, $F^{D7}=\{C,D,E\}$.

4. Формируется семейство S множеств дополнительных посылок M^{DF} , содержащих факты, которые обеспечивают успешный вывод заключения. Каждое множество M^{DF} семейства S проверяется на противоречивость.

Формирование множества M^{DF} производится путем деления каждого дизъюнкта D'' множества M^{DF} на дизъюнкт d'' , составленный из литералов соответствующего множества F^D : $b''=D''\div d''$.

- 1) $F^{D1}=\{C\}$. $b_4=D_4\div C=\neg B$, $b_5=b_6=1$. $M^{DF1}=\{C, \neg B\vee D, \neg B\vee E\}$.
- 2) $F^{D2}=\{D\}$. $b_4=b_6=1$, $b_5=D_5\div D=\neg B$. $M^{DF2}=\{D, \neg B\vee C, \neg B\vee E\}$.
- 3) $F^{D3}=\{E\}$. $b_4=b_5=1$, $b_6=D_6\div E=\neg B$. $M^{DF3}=\{E, \neg B\vee C, \neg B\vee D\}$.
- 4) $F^{D4}=\{C,D\}$. $b_4=b_5=\neg B$, $b_6=D_6\div (C\vee D)=1$. $M^{DF4}=\{C,D, \neg B\vee E\}$.
- 5) $F^{D5}=\{C,E\}$. $b_4=b_6=\neg B$, $b_5=D_5\div (C\vee E)=1$. $M^{DF5}=\{C,E, \neg B\vee D\}$.
- 6) $F^{D6}=\{D,E\}$. $b_4=D_4\div (E\vee D)=1$, $b_5=b_6=\neg B$. $M^{DF6}=\{E,D, \neg B\vee C\}$.
- 7) $F^{D7}=\{C,D,E\}$. $b_4=b_5=b_6=\neg B$. $M^{DF7}=\{C,D,E\}$.

Анализируется противоречивость множеств M^{DF} и выполняется проверочный дедуктивный вывод. При этом $M\cup M^{DF}\Rightarrow d_1$ и множества $M\cup M^{DF}$ – непротиворечивы.

Таким образом, абдуктивный вывод заключения $d_1=\neg A\vee G$ с определением фактов завершен успешно ($\Theta=0$). Получено семь вариантов решения задачи, каждый из которых характеризуется множеством дополнительных посылок M^{DF} , обеспечивающим успешный дедуктивный вывод заключения и содержащим найденные факты F^D .

Вывод. Разработанный метод абдуктивного вывода заключений с определением фактов имеет следующие достоинства. Параллельное выполнение процедур вывода на каждом шаге метода ускоряет логический вывод, а также позволяет выполнять его на современных многоядерных вычислительных системах более эффективно, с точки зрения аппаратных и энергетических затрат. Определение фактов, обеспечивающих успешный логический вывод, требует минимального дополнительного времени, так как большая часть необходимых вычислений осуществляется одновременно с самим выводом. Выходные данные метода, могут быть использованы для создания методов прогнозирования фактов, а также дают возможность реализации гибридных систем, объединяющих логический вывод и другие модели искусственного интеллекта, такие как нейронные сети и нечеткая логика.

Список литературы

1. Вагин, В. Н. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / В. Н. Вагин, Е. Ю. Головина, А. А. Загорянская, М. В. Фомина; под ред. В. Н. Вагина, Д. А. Поспелова. – М. : Физматлит, 2004. – 704 с.
2. Вожегов Д. В., Страбыкин Д. А. Метод параллельного дедуктивного логического вывода с определением фактов. Научно-технический вестник Поволжья. №1 2011г. – Казань : Научно-технический вестник Поволжья, 2011. – С. 97-99.
3. Страбыкин, Д. А. Метод параллельных вычислений для абдуктивного вывода на знаниях. Известия Академии наук. Теория и системы управления. – 2000.– № 5. – С. 101–106.

В. И. Воловач к.т.н., А. С. О. Мамедов, А. А. Попов к.т.н.

Поволжский государственный университет сервиса
факультет информационно-технического сервиса
кафедра «Информационный и электронный сервис»
Россия, г. Тольятти
ssunrise@mail.ru

АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КОГЕРЕНТНОГО И НЕКОГЕРЕНТНОГО МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ ОХРАНЫ

В статье рассматривается помехоустойчивость радиотехнических устройств охраны и обосновывается возможность использования когерентного и некогерентного методов обнаружения. Показано, что предпочтительным для использования является когерентное обнаружение. Вводится показатель количественной оценки помехоустойчивости радиотехнических устройств охраны.

Ключевые слова: радиотехническое устройство обнаружения, помехоустойчивость, когерентное и некогерентное обнаружение, показатель оптимальности обнаружения.

При рассмотрении вопросов обнаружения объектов радиотехническими устройствами обнаружения (РУО), используемыми в различных системах охраны, кроме определения вероятностных характеристик обнаружения и законов дальности действия РУО [1], [2], необходимо также проанализировать помехоустойчивость таких устройств. Потребность в этом вполне очевидна, поскольку достоверное обнаружение объектов РУО в значительной степени связано с помехоустойчивостью различных вариантов построения таких устройств, использованием тех или иных методов обнаружения, видов модуляции сигнала и выбором из них наиболее оптимальных.

Под помехоустойчивостью РУО будем понимать, как и для всех других радиотехнических систем, их способность противостоять различным мешающим действиям помех. В результате проектирования должна быть созданы такие радиотехнические системы охраны, которые обеспечивают надежное обнаружение объекта в пределах контролируемого периметра территории или объема пространства при определенном уровне помех, характерных для данных условий эксплуатации.

С помехоустойчивостью РУО непосредственно связана задача обнаружения объекта в пределах контролируемой зоны, которая сводится к обнаружению зондирующего, отраженного от объекта, сигнала $u_c(t, \lambda)$ на фоне помехи $u_{\Pi}(t)$, т. е. к анализу принятого колебания $u_{\Pi\Pi}(t)$:

$$u_{\Pi\Pi}(t) = \theta u_c(t, \lambda) + u_{\Pi}(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (1)$$

где θ – случайная величина, принимающая только два значения: при $\theta = 1$ в выходном сигнале присутствуют сигнал $u_c(t, \lambda)$ и помеха $u_{\Pi}(t)$, при $\theta = 0$ в выходном сигнале присутствует только помеха $u_{\Pi}(t)$; T – время работы охранного устройства.

Решение задачи обнаружения отраженного от объекта сигнала на фоне помехи (1), а также оценка параметров этого сигнала, позволяют помимо прочего определить возможность и целесообразность применения того или иного метода обнаружения. Помимо этого может быть определен и показатель оптимальности обнаружения устройства (о котором будет сказано ниже), зависящий, в свою очередь, от вероятностей правильного и ошибочного принятия решений. Расчет этого показателя

позволяет выбрать конкретную реализацию РУО, способную решать задачу обнаружения требуемым образом, в т. ч. и с приемлемой помехоустойчивостью.

Предположим, что сигнал $u_C(t, \lambda) = u_C(t)$ зависит только от одного непрерывного параметра λ , имеющего априорную плотность вероятности $P(u_C)$. Апостериорная плотность вероятности определяется $P(u_C/u_{\Pi})$ и представляет собой апостериорную вероятность отражения зондирующего сигнала от объекта.

Остановимся на том, как помеха $u_{\Pi}(t)$ представлена в принимаемом РУО сигнале $u_{\Pi}(t)$ для практически значимых случаев. Это позволит судить о соответствующем влиянии помехи на решение задачи обнаружения.

В простейшем случае, который используется для определения верхних границ характеристик обнаружения [3], сигнал, отраженный от обнаруживаемого объекта, считают детерминированным. Пусть сигнал представляет собой произведение некоторой случайной величины θ согласно (1) на известную функцию времени $u_C(t)$. Пусть также сигнал смешивается с аддитивной помехой $u_{\Pi}(t)$. Воздействие (1) на входе приемника с учетом изложенных в [4] рассуждений относительно непрерывности единственного существенного, подлежащего анализу при приеме, параметра λ представим в виде

$$u_{\Pi}(t) = \theta u_C(t) + u_{\Pi}(t), \quad 0 \leq t \leq T. \quad (2)$$

Очевидно, что при приеме сигнала из окружающего антенну пространства происходит также и прием шумов этого пространства. В результате происходит аддитивное суммирование полезного сигнала, шумов окружающего пространства и шумов приемного устройства. Поскольку шумы приемного устройства значительно превосходят шумы окружающего пространства, для упрощения без значительной потери качества решения принимают, что $u_{\Pi}(t)$ представляет собой внутриприемный шум. Аддитивный широкополосный гауссовский шум можно рассматривают как белый гауссовский шум (БГШ).

Плотность вероятности мгновенных значений внутриприемного шума $u_{\Pi}(t)$ подчиняется закону нормального распределения вероятностей [5]:

$$p(u_{\Pi}) = \beta \exp \left[-\frac{1}{W_{\Pi}} \int_0^T u_{\Pi}^2(t) dt \right], \quad (3)$$

где $\beta = [1/\sqrt{2\pi} \sigma_{\Pi}]^n$ – коэффициент пропорциональности; n – число дискрет, определяющих функцию $u_{\Pi}(t)$; W_{Π} – мощность помех, приходящаяся на единицу полосы частот.

Рассмотрим далее более сложный, но, очевидно, и более часто встречающийся случай – обнаружение сигналов со случайными параметрами. Если в сигнале, обрабатываемом приемником РУО, информация о скорости объекта отсутствует, то согласно [6] это означает, что зондирующий сигнал с постоянной амплитудой U_m и несущей частотой ω на входе приемника будет иметь неизвестное доплеровское смещение частоты ω_d так, что

$$u_C(t) = U_m \cos(\omega t + \omega_d t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_C). \quad (4)$$

Заметим, что в выражении (4) амплитуда сигнала U_m может принимать два значения: $U_m = U_{mC}$ – при наличии сигнала и $U_m = 0$ при его отсутствии. Другими словами, амплитуда U_m ведет себя аналогично величине θ в выражениях (1) и (2).

Поскольку дополнительная фаза сигнала φ_C является неизвестной случайной величиной, то принятие правильного решения в этом случае можно интерпретировать как задачу обнаружения сигнала со случайной начальной фазой.

Фаза сигнала φ_C является случайным параметром и характеризуется равномерным законом распределения $p(\varphi_C) = 1/(2\pi)$. Сигнал смешивается с аддитивной помехой в виде БГШ. Входное воздействие, полученное из (2), запишем в виде:

$$u_{\text{СП}}(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi_C) + u_{\text{П}}(t). \quad (5)$$

По принятому РУО воздействию $u_{\text{ПР}}(t)$ устанавливают наличие в нем сигнала. Как видно из приведенных соотношений (1), (2) и (5) помеха окажет существенно влияние на решение задачи обнаружения, т. е. на эффективность работы РУО.

Прежде чем перейти к сравнительному анализу когерентного и некогерентного методов обнаружения, рассмотрим некоторые вероятностные характеристики, используемые в этих случаях.

Для решения задачи обнаружения следует определить вероятности правильного и неправильного решений этой задачи. Названные решения будут определяться и помехоустойчивостью используемых устройств. Пусть наличие сигнала на входе РУО соответствует значению u_{C1} , а отсутствию – значению u_{C0} . Тогда для $P(u_{C1})$ – априорной вероятности наличия сигнала – и $P(u_{C0})$ – априорной вероятности отсутствия сигнала – очевидно, будет выполняться равенство $P(u_{C1}) + P(u_{C0}) = 1$.

При функционировании РУО, как правило, производится проверка правильности двух гипотез [3]:

- первой гипотезы $H1$, предполагающей наличие в сигнале на входе РД полезного сигнала $u_C(t)$ и помехи $u_{\text{П}}(t)$;
- второй гипотезы $H0$, предполагающей отсутствие сигнала и наличие на входе РУО одной только помехи $u_{\text{П}}(t)$:

$$\begin{cases} H1: u_{C1} = u_C + u_{\text{П}}; \\ H0: u_{C0} = u_{\text{П}}. \end{cases} \quad (6)$$

В идеализированном случае, который, впрочем, не обсуждается в настоящей статье, для каждой из сформулированных гипотез предполагают отсутствие помехи $u_{\text{П}} = 0$.

Для определения названных гипотез запишем вероятности: ложного обнаружения $P_{\text{ЛО}} = P(u_{C1}/u_{C0})$ и пропуска сигнала $P_{\text{ПС}} = P(u_{C0}/u_{C1})$. Тогда вероятность правильного обнаружения определяется $P_{\text{ПО}} = 1 - P_{\text{ПС}}$, а вероятность правильного необнаружения сигнала $P_{\text{НО}} = 1 - P_{\text{ЛО}}$.

Можно утверждать, что гипотеза $H1$ принята правильно, если справедливо выражение

$$P(H1) = P(u_{C1})P_{\text{ПО}} = P(u_{C1})[1 - P_{\text{ПС}}], \quad (7)$$

правильность гипотезы $H0$ можно определить из выполнения следующего равенства

$$P(H0) = P(u_{C0})P_{\text{НО}} = P(u_{C0})[1 - P_{\text{ЛО}}]. \quad (8)$$

В результате правильное решение будет определяться через названные гипотезы следующим образом

$$P_{\text{ПРАВ}} = P(H1) + P(H0), \quad (9)$$

или

$$P_{\text{ПРАВ}} = P(u_{C1})[1 - P_{\text{ПС}}] + P(u_{C0})[1 - P_{\text{ЛО}}]. \quad (10)$$

Для неправильного решения или ошибки запишем

$$P_{\text{НЕПРАВ}} = 1 - P_{\text{ПРАВ}} = P(u_{C1})P_{\text{ПС}} + P(u_{C0})P_{\text{ЛО}}. \quad (11)$$

Вероятность неправильного решения принято называть также показателем оптимальности обнаружения объекта $P_{\text{ОО}}$ [1]. Показатель оптимальности обнаружения

P_{00} необходимо минимизировать; очевидно (11), что этот показатель зависит от априорных вероятностей наличия и отсутствия сигнала, вероятностей пропуска сигнала и ложного обнаружения. При этом вероятности пропуска сигнала и ложного обнаружения, а также правильного обнаружения и необнаружения сигнала находят для различных начальных условий.

Для обнаружения объекта следует вынести однозначное решение, которое может сопровождаться двумя видами ошибок. В одном случае при принятии решения «да» происходит ложное обнаружение, когда регистрируется только помеха; в другом случае принимается решение «нет», когда наряду с помехой присутствует сигнал, т. е. осуществляется пропуск объекта. На достоверность обнаружения объекта существенное влияние окажут помехи, а также, в случае применения РУО турникетного типа [8], возможное появление сигналов «просачивания» [9]. Осуществить обнаружение с учетом вышеназванных ошибок позволяют некоторые правила, использующие функцию выигрыша, которая максимальна при правильном решении задачи обнаружения [10].

Для нахождения решений (10) и (11) следует определить вероятности ложного обнаружения $P_{\text{ЛО}}$ и пропуска сигнала $P_{\text{ПС}}$; причем для определенности полагают, что появление и отсутствие сигнала на входе приемника РУО равновероятны.

Рассмотрим влияние помех на вероятность обнаружения в наиболее простом виде, не учитывая многолучевой характер сигнала, отраженного от обнаруживаемого объекта. Пусть полезный сигнал, поступающий на вход приемника РУО, представляет собой колебание в представленном далее виде, при этом будем считать начальную фазу сигнала равной нулю.

$$u_c(t) = U_{cm} \sin \omega_0 t. \quad (12)$$

Учет начальной фазы обнаруживаемого сигнала в приводимом анализе приведет к некоторому усложнению вычислительных операций, но существенного влияния на полученные выводы не окажет. Это справедливо не только для рассматриваемого далее однолучевого сигнала, изменение начальной фазы многолучевого сигнала будет изменяться в небольших пределах.

Сказанное невозможно отнести к напряжению помехи, действующей на вход приемника РУО, поскольку фаза флуктуационного колебания имеет равномерное распределение от 0 до 2π , и все возможные значения фазы в этом интервале являются равновероятными. В результате величины напряжения помехи могут изменяться в значительных пределах.

Поступающая на вход приемника РУО помеха может быть представлена в следующем виде

$$u_{\Pi}(t) = U_{\Pi m}(t) \sin[\omega_0 t + \varphi_{\Pi}(t)] = U_{\Pi m}(t) \cos \varphi_{\Pi}(t) \sin \omega_0 t + U_{\Pi m} \sin \varphi_{\Pi}(t) \cos \omega_0 t. \quad (13)$$

В результате при суммировании сигнала и помехи получаем:

$$\begin{aligned} u_{\text{СП}}(t) &= U_{cm} \sin \omega_0 t \{U_{\Pi m}(t) \sin[\omega_0 t + \varphi_{\Pi}(t)]\} = \\ &= [U_{cm} + U_{\Pi m}(t) \cos \varphi_{\Pi}(t)] \sin \omega_0 t + U_{\Pi m} \sin \varphi_{\Pi}(t) \cos \omega_0 t. \end{aligned} \quad (14)$$

Анализ выражения (14) приводит к выводу: помеха относительно принимаемого сигнала может быть разложена на две составляющие. Первая составляющая будет совпадать по фазе с сигналом, вторая составляющая будет отставать от сигнала на $\pi/2$ радиан. Вид помех будет определять соотношение между этими составляющими.

Представление помехи относительно сигнала в виде суммы синфазного и ортогонального векторов позволяет реализовать два основных метода, широко используемых на практике: когерентного и некогерентного обнаружения. Очевидно, что в силу общих подходов к обнаружению объектов, возможно предположить

использование обоих методов при реализации радиотехнических систем охраны. Вместе с тем, желательно провести анализ, позволяющий определить предпочтительность использования этих методов обнаружения в практическом применении.

При когерентном обнаружении предусматривается реагирование РУО на колебание, представляющее собой сумму сигнала и синфазной к нему составляющей помехи. Характеристикой является превышение сигнала над помехой, определяемое следующим образом

$$m_k^2 = U_{cm}^2 / \overline{U_{пс}^2}, \quad (15)$$

в котором $\overline{U_{пс}^2}$ представляет собой дисперсию амплитуды синфазной составляющей помехи.

При некогерентном обнаружении реагирование РУО осуществляется на амплитуду суммарного колебания сигнала и помехи. Характеризуют такое обнаружение также превышением сигнала над помехой и определяют выражением

$$m_{нк}^2 = U_{cm}^2 / [\overline{U_{пс}^2} + \overline{U_{оп}^2}], \quad (16)$$

где $\overline{U_{оп}^2}$ – дисперсия амплитуды ортогональной сигналу составляющей помехи.

Удобным для практического применения является представления дисперсии каждой из амплитуд помехи в виде $2\sigma^2 = \overline{U_{пс}^2} + \overline{U_{оп}^2}$.

Сравнение выражений (15) и (16) позволяет сделать вывод о преимущественном использовании для обнаружения в РУО когерентного метода, обеспечивающего более уверенное обнаружение в силу большего превышения сигнала над помехой.

Для количественной оценки помехоустойчивости РУО будем использовать соотношение

$$П_{уст} = P(u_{сп}) / P(u_c), \quad (17)$$

в котором помехоустойчивость определяется отношением вероятностей выполнения РУО задачи обнаружения при наличии $P(u_{сп})$ и отсутствии $P(u_c)$ помех.

В радиотехнических системах сравнительную оценку помехоустойчивости проводят для различных случаев модуляции сигналов при когерентном и некогерентном методах обнаружения. Рассматривая зависимость [11] помехоустойчивости от метода обнаружения, можно сделать следующий вывод: наиболее значительные различия в помехоустойчивости когерентного и некогерентного методов обнаружения сигналов наблюдаются при значительных вероятностях значения показателя оптимальности обнаружения $P_{оо}$. Максимальный выигрыш в мощности сигнала составит при когерентном обнаружении два раза. Уменьшение вероятности неправильного обнаружения сигнала снижает величину выигрыша.

Используя найденные выше вероятности неправильного решения задачи обнаружения [12] и зависимость помехоустойчивости от когерентности обнаружения [11], можно определить максимальные значения выигрыша в мощности сигнала для анализируемых вариантов построения РУО. По названной зависимости помехоустойчивости РУО для интересующего нас диапазона изменений вероятности $P_{оо}$ составим табл. 1, в соответствии с которой проведем интересующий анализ. В зависимости и, соответственно, в табл. 1 используется коэффициент $m_x^2 = (m_{нк} / m_k)^2$.

Таблица 1

Зависимость помехоустойчивости РУО от когерентности обнаружения.

P_{00}	10^{-5}	$0,5 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}	$0,5 \cdot 10^{-7}$	10^{-7}	10^{-8}	10^{-10}
m_x^2	1,269	1,251	1,237	1,226	1,219	1,214	1,211

Для двухканального РУО величина m_x^2 составит 1,211, а для одноканального – 1,251. В результате можно утверждать, что применение двухканального варианта построения РУО, в отличие от вероятности неправильного решения задачи обнаружения, не приносит существенного выигрыша в мощности сигнала. Преимущественным является применение когерентного метода обнаружения, который дает для обоих вариантов построения РУО не менее 20% выигрыша в помехоустойчивости.

В представленной статье показано, что помеха, поступающая на вход приемника РУО, может быть представлена в виде суммы синфазной и ортогональной сигналу обнаружения составляющих; такое представление позволяет использовать для обнаружения методы когерентного и некогерентного обнаружения. Вследствие большего превышения уровня сигнала над помехой предпочтительным является когерентное обнаружение. Введен показатель количественной оценки помехоустойчивости РУО, определяемый отношением вероятностей выполнения задачи обнаружения при наличии и отсутствии помехи.

Список литературы:

1. Воловач В.И. Определение вероятности обнаружения протяженных объектов радиотехническими устройствами охранной сигнализации // XII Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». Сборник докладов конференции. Том III. – Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ», 2006. С. 2000–2009.
2. Воловач В.И. Оценка достоверности обнаружения объекта по статистическому распределению дальности действия радиотехнических устройств охранной сигнализации // Известия Самарского научного центра РАН. Спец. выпуск «Наука – промышленности и сервису». Выпуск 2. 2006 г. С. 134–144.
3. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2004. – 608 с.
4. Воловач В.И. Реализация оптимальной структуры обнаружения радиотехнических устройств охранной сигнализации // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2009. Т 5, №2. С. 43–49.
5. Хьюбер Дж. П. Робастность в статистике: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 304 с.
6. Воловач В.И. Обнаружение объектов в условиях априорной неопределенности относительно параметров движения // Проблемы и решения современной технологии. Сборник научных трудов ПТИС. Выпуск 5. Часть II. – Тольятти: ПТИС, 1999. С. 62–66.
7. Воловач В.И. Помехоустойчивость типовых вариантов построения радиотехнических устройств охранной сигнализации // Школа университетской науки: парадигма развития, 2010, т. 2, № 1(1). С. 265–270.
8. Воловач В.И. Реализация структуры обнаружения одноканальных турникетных радиотехнических устройств охраны на основе сравнения корреляционных интегралов // Вестник Волжского университета имени В.Н. Татищева. Серия «Информатика». Вып. 18, 2011. – С. 91–97.
9. Воловач В.И. Достоверность обнаружения объектов в системах охраны периметра в прожекторном режиме // Проблемы и решения современной технологии. Сборник научных трудов ПТИС. Выпуск 6. Часть II. – Тольятти, ПТИС, 2000. С. 37–44.
10. Воловач В.И. Реализация структуры обнаружения в радиотехнических устройствах охранной сигнализации // Вестник Тольяттинского государственного университета сервиса: Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 1. – Тольятти, Изд-во ТГУС, 2006. С. 46–57.
11. Теплов Н.Л. Помехоустойчивость систем дискретной передачи информации. – М.: Сов. радио, 1964. – 258 с.
12. Воловач В.И. Некоторые особенности определения помехоустойчивости радиотехнических устройств охранной сигнализации // XVI Всероссийская научно-техническая конференция «Методы и средства измерений физических величин». Материалы Всероссийских научно-технических конференций (Computer-Based Conferences). – Нижний Новгород: Нижегородский научный и информационно-методический центр «Диалог», 2006. С. 23–26.

В. И. Воловач к.т.н., А. А. Попов к.т.н., А. В. Савенко

Поволжский государственный университет сервиса
факультет техники и технологий сервиса
кафедра «Информационный и электронный сервис»
Россия, Тольятти
ssunrise@mail.ru

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБНАРУЖЕНИЯ И РАЗЛИЧЕНИЯ СИГНАЛОВ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ ОХРАНЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПРИНЦИПЫ АКТИВНОЙ И ПОЛУАКТИВНОЙ ЛОКАЦИИ

Рассмотрена задача обнаружения и различения сигналов радиотехническими устройствами охраны для случаев активной и полуактивной радиолокации. Получено одно из возможных выражений для определения отношения правдоподобия. Приведены практически важные выражения для определения условных вероятностей правильного и ложного обнаружения.

Ключевые слова: задача обнаружения и различения сигналов, активная радиолокация, полуактивная радиолокация, зондирующий сигнал, оптимальный приемник, отношение правдоподобия, критерий Неймана-Пирсона.

Задача обнаружения и различения сигналов на фоне шума в радиотехнических устройствах охраны (РУО) и, соответственно, связанная с решением этой задачи достоверность обнаружения объекта в пределах контролируемого пространства (зоны обнаружения), в формализованном для всех радиотехнических систем виде хорошо известна [1] и сводится к определению одного из двух сигналов $u_{C1}(t, \lambda_1)$ или $u_{C2}(t, \lambda_2)$, который присутствует на входе приемника в принятом воздействии $u_{ПР}(t)$. При радиолокации на ближних дальностях, реализуемой в РУО, задачу обнаружения протяженных объектов можно рассматривать как задачу обнаружения сигналов с известными или случайными параметрами. При этом рассмотрение сигнала с детерминированными параметрами представляет практический интерес, поскольку позволяет определить верхние границы характеристик обнаружения [2].

В зависимости от реализации структуры обнаружения РУО возможно различное математическое представление названной задачи. Так, при применении турникетных датчиков охранной сигнализации [3, 4], в которых используется принципа полуактивной радиолокации, рассматриваются два сигнала: зондирующий и отраженный. При этом зондирующий сигнал формируется одним радиотехническим датчиком (РД), а отраженный от объекта сигнал принимается приемником другого РД. Оба датчика, как правило, расположены на одной линии – рубеже охраны. Решение о вторжении в контролируемое пространство (пересечение объектом рубежа охраны) принимается, как по отсутствию сигнала в приемнике, так и по изменению параметров зондирующего сигнала, наблюдаемому в режиме «просачивания» [5]. Следует найти разрешение одного из сигналов или, другими словами, оптимальным образом установить по принятому воздействию на входе приемника РУО $u_{ПР}(t)$, какой из сигналов был передан, и, соответственно, решить произошло ли вторжение в контролируемое пространство. Для турникетных датчиков с учетом замечаний [6]

относительно величины либо пределов изменения априорной плотности вероятности параметров сигнала λ запишем интересное выражение в виде

$$u_{\text{ПР}}(t) = \theta u_{\text{C1}}(t) + (1 - \theta) u_{\text{C2}}(t) + u_{\text{П}}(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (1)$$

где T – время работы турникетного датчика.

Величина θ в выражении (1), может принимать два значения: $\theta = 1$ – в принятом воздействии $u_{\text{ПР}}(t)$ присутствует отраженный от объекта сигнал $u_{\text{C1}}(t)$, что предполагает нарушение границ контролируемого пространства; $\theta = 0$ – в принятом воздействии присутствует зондирующий сигнал $u_{\text{C2}}(t)$, свидетельствующий об отсутствии проникновения объекта; сигнал помехи $u_{\text{П}}(t)$ присутствует в принятом воздействии постоянно. Очевидно, что оценка дискретного параметра θ позволяет получить решение (1).

Отметим, что достоверность обнаружения объекта при использовании турникетных ДОС может быть снижена вследствие появления упомянутого ранее сигнала «просачивания» [5]; известны также пути повышения достоверности обнаружения [6], [7] в этом случае. Вместе с тем, появление сигнала «просачивания» на входе приемника РУО не изменяет вид выражения (1) и его решение. Безусловно, важно для корректного решения (1) учесть параметры сигнала «просачивания» таким образом, чтобы максимизировать правильность оценки параметра $\theta = 1$ и, в результате, увеличить достоверность обнаружения. Другими словами, значению $\theta = 1$ соответствует наличие в принятом воздействии не только отраженного сигнала $u_{\text{C1}}(t)$, но и сигнала «просачивания» $u_{\text{ПР}}(t)$.

При реализации в РУО принципа активной радиолокации, что характерно для устройств охраны площадей и пространств помещений или открытых территорий, зондирующий сигнал не попадает в приемно-передающую антенну и, следовательно: $u_{\text{C2}}(t, \lambda_2) \equiv 0$. В этом случае общую задачу обнаружения можно свести к обнаружению сигнала $u_{\text{C1}}(t, \lambda_1)$ на фоне помехи $u_{\text{П}}(t)$.

Известно, что зондирующий сигнал $u_{\text{C2}}(t, \lambda_2)$ представляет собой детерминированную и известную функцию аргументов t и λ . Параметры $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k\}$, в свою очередь, представляют собой существенные параметры, т. е. определяющие непосредственно функционирование системы охраны параметры. К таким параметрам относят параметры самого зондирующего радиосигнала (амплитуда, частота и фаза колебания, время появления радиоимпульса и т. п.) и параметры отраженного сигнала, т. е. параметры, представляющие обнаруживаемый объект (его размеры, площадь отражающей поверхности, наличие «блестящих» точек и т. п.) и характер его движения в пределах зоны обнаружения (дальность до объекта, скорость, направление).

Предположим, что сигнал, отраженный от обнаруживаемого объекта, является детерминированным; причем этот сигнал $u_{\text{C}}(t, \lambda) = u_{\text{C}}(t)$ зависит только от одного непрерывного параметра λ и представляет собой произведение некоторой случайной величины θ на известную функцию времени $u_{\text{C}}(t)$. Пусть также данный сигнал смешивается с аддитивной помехой $u_{\text{П}}(t)$ и единственный существенный параметр λ непрерывен. С учетом сформулированных ограничений и особенностями, изложенными в [8], можно записать

$$u_{\text{ПР}}(t) = \theta u_{\text{C}}(t) + u_{\text{П}}(t), \quad 0 \leq t \leq T. \quad (2)$$

По аналогии с (1) в выражении (2) величина θ – некоторая случайная величина, которая может иметь только два значения: при $\theta = 1$ в выходном сигнале присутствуют сигнал $u_{\text{C}}(t, \lambda)$ с вероятностью, соответствующей правильному принятию решения о присутствии объекта, и помеха $u_{\text{П}}(t)$; при $\theta = 0$ в выходном сигнале присутствует только помеха $u_{\text{П}}(t)$ с вероятностью, соответствующей правильному принятию решения об отсутствии объекта в зоне обнаружения. В отличие от способа полуактивной

локации достоверность обнаружения при активной локации может оказаться выше, поскольку отсутствует сигнал «просачивания». Отметим, что использование двухканальных РД, использующих одновременно принципы активной и полуактивной локации, позволяет в значительно повысить достоверность обнаружения объекта.

Решения (1) и (2) принимаются на основании априорных данных о сигнале $u_{\text{ПР}}(t)$, подлежащем приему, и корректной обработки реализации принятого воздействия. Параметры сигнала λ определенным образом [8] влияют на решения (1) и (2). Там же определено, что выбор априорной плотности вероятности параметров λ не оказывает практически значимого влияния на принимаемое воздействие $u_{\text{ПР}}(t)$ в системах, работающих с большим массивом наблюдений, к которым возможно отнести и РУО как элементы систем, работающих постоянно, и имеющих в силу этого оптимальные алгоритмы обработки реализаций.

В результате решения задачи обнаружения отраженного от объекта сигнала на фоне помехи (1) или (2) и оценки параметров этого сигнала, становится возможным получить структурную схему приемника РУО и, рассмотрев степень соответствия приемника РУО типовым схемам оптимальных приемников, использовать это при последующем анализе работы радиотехнических РД. Одновременно, может быть определен показатель оптимальности обнаружения устройства, зависящий, в свою очередь, от вероятностей правильного и ошибочного принятия решений.

Для решения задачи обнаружения следует предположить, что помеха является белым гауссовским шумом (БГШ) вследствие неизбежности существования неустранимых причин – тепловых и других шумов приемного устройства и окружающего пространства. Шумами окружающего пространства вследствие их относительной малости без существенных потерь качества решения можно пренебречь. В результате $u_{\text{П}}(t)$ представляет собой внутриприемный шум; плотность вероятности мгновенных значений внутриприемного шума $u_{\text{П}}(t)$ подчиняется закону нормального распределения вероятностей.

Для решения задачи обнаружения (2) определяют функцию правдоподобия [6], [7] для значений $\theta = 1$ и $\theta = 0$ с учетом взаимной независимости сигнала и помехи, а также того, что принятое воздействие $u_{\text{ПР}}(t)$ представляет собой непрерывный случайный процесс.

Далее находят отношение правдоподобия для заданной области сигнала, которое с учетом вычисленных значений функций правдоподобия, будет иметь вид

$$l(u_{\text{ПР}}) = \exp\left(-\frac{W_{\text{С}}}{W_{\text{П}}}\right) \exp \frac{2}{W_{\text{П}}} \int_0^T u_{\text{С}}(t) u_{\text{ПР}}(t) dt, \quad (3)$$

где $W_{\text{С}} = \int_0^T u_{\text{С}}^2(t) dt$ – энергия зондирующего сигнала.

Если в выражении (3) отношение правдоподобия окажется больше некоторого порога γ , то должен быть сделан вывод о наличии сигнала обнаружения на входе приемника РУО, т. е. присутствии объекта. В соответствии с выбранным критерием обнаружения определяется величина порога γ . Как правило, в системах охраны, как и во многих других локационных приложениях, используют критерий Неймана-Пирсона, который, позволяет получить максимальную вероятность обнаружения сигнала от объекта. Вероятность ложных обнаружений задают постоянной и достаточно малой.

Для решения задачи обнаружения должно выполняться очевидное неравенство $l(u_{\text{ПР}}) > \gamma$. Учитывая сказанное и используя результат (3), после преобразования приходим к выражению, определяющему структуру оптимального приемника РУО:

$$\frac{2}{W_{\Pi}} \int_0^T u_C(t) u_{\Pi P}(t) dt > \ln \gamma + \frac{W_C}{W_{\Pi}} = u_{\text{ПОР}}, \quad (4)$$

где $u_{\text{ПОР}}$ – величина порогового уровня, определяемая при выбранном критерии обнаружения заданной вероятностью ложного обнаружения $P(u_{C1}/u_{C0})$.

Анализ (4) позволяет сделать вывод о полном соответствии структуры приемника РУО при известной задержке сигнала структуре классического оптимального приемника детерминированных сигналов [9]. В приемнике РУО устанавливается степень взаимной корреляции между входным воздействием $u_{\Pi P}(t)$ и зондирующим сигналом $u_C(t)$. После этого мера корреляции сравнивается с порогом ограничения $u_{\text{ПОР}}$, который определяется в соответствии с выражением (4). Приемник РУО должен содержать коррелятор, в котором осуществляется перемножение и интегрирование сигналов $u_C(t)$ и $u_{\Pi P}(t)$, и пороговое устройство с заданным порогом ограничения $u_{\text{ПОР}}$. Если напряжение на его выходе превосходит нуль, то принимается решение о наличии сигнала и, соответственно, о вторжении в контролируемую зону. При напряжении, равном нулю, принимается решение об отсутствии сигнала. В результате, можно говорить о приемнике сигналов РУО как об оптимальном приемнике [7], [10].

Определить порог ограничения $u_{\text{ПОР}}$ возможно, используя критерий Неймана-Пирсона. Для чего, в свою очередь, следует определить условные вероятности правильного обнаружения $P(u_{C1}/u_{C1})$ и ложного обнаружения $P(u_{C1}/u_{C0})$. Вероятность правильного обнаружения $P(u_{C1}/u_{C1})$ будет оцениваться выражением [11]:

$$P(u_{C1}/u_{C1}) = 1 - \Phi\{u_{\text{ПОР}} [2W_C/W_0]^{-0,5} - [2W_C/W_0]^{0,5}\}, \quad (5)$$

где W_0 – спектральная плотность мощности внутриприемного БГШ; $u_{\text{ПОР}}$ – величина порогового уровня, определяемая при использовании критерия Неймана-Пирсона заданной вероятностью ложного обнаружения $P(u_{C1}/u_{C0})$, которую находят из выражения

$$P(u_{C1}/u_{C0}) = 1 - \Phi\{u_{\text{ПОР}} [2W_C/W_0]^{-0,5}\}. \quad (6)$$

В результате вычислений [6] при заданной вероятности ложного обнаружения $P(u_{C1}/u_{C0})$ можно сделать вывод о зависимости величины напряжения $u_{\text{ПОР}}$ от закона нормального распределения $p[u_{\text{СП}}^k(t)/u_{C0}]$.

Проведенный анализ ряда особенностей решения задачи обнаружения и различения сигналов на фоне шума в РУО [9], [12] позволил получить следующие выводы:

1. При решении задачи обнаружения и различения сигналов на фоне шума в РУО, т. е. при решении задачи о достоверном обнаружении объекта следует учитывать какой принцип – активной и полуактивной – локации в РУО применен; в соответствии с этим будет строиться решение названной задачи.
2. Появление сигнала «просачивания» при использовании турникетных РД может снизить достоверность обнаружения объекта. Получить приемлемую достоверность позволяет учет параметров сигнала «просачивания» при решении задачи обнаружения.
3. Существенными параметрами сигнала в РУО являются параметры, характеризующие как сам зондирующий сигнал, так и обнаруживаемый объект, причем для представления последнего необходимо учитывать параметры его движения. Параметры, характеризующие обнаруживаемый объект, определяют параметры отраженного от него сигнала.
4. Выбор априорной плотности вероятности параметров сигнала λ в системах, работающих с большим массивом наблюдений, к которым можно отнести и РУО, практического влияния на принимаемое воздействие $u_{\Pi P}(t)$ не оказывает.

5. Структура приемника РУО при известной задержке сигнала полностью соответствует структуре классического оптимального приемника детерминированного сигнала.
6. Анализ отношения правдоподобия позволяет определить вероятность правильного обнаружения в различных условиях обнаружения, в частности при детерминированном зондирующем сигнале. Величина порогового напряжения при таком сигнале будет определяться законом нормального распределения.

Список литературы:

1. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2004. – 608 с.
2. Теоретические основы радиолокации / Под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Советское радио, 1978. – 608 с.
3. Воловач В.И. Особенности обнаружения объектов радиотехническими датчиками охранных систем турникетного типа // Синергетика природных, технических и социально-экономических систем: сборник статей всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Тольятти: Изд-во ТГУС, 2006. С. 85–90.
4. Воловач В.И. Реализация структуры обнаружения одноканальных турникетных радиотехнических устройств охраны на основе сравнения корреляционных интегралов // Вестник Волжского университета имени В.Н. Татищева. Серия «Информатика». Вып. 18, 2011. – С. 91–97.
5. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Достоверность обнаружения объектов в системах охраны периметра при наличии сигнала «просачивания» // Проблемы и решения современной технологии. Сборник научных трудов ПТИС. Выпуск 6. Часть II. – Тольятти: ПТИС, 2000. С. 3–6.
6. Воловач В.И. Реализация структуры обнаружения в радиотехнических устройствах охранной сигнализации // Вестник ТГУС. Серия «Проблемы и решения современной технологии»: межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 1. – Тольятти: Изд-во ТГУС, 2006. С. 46–57.
7. Воловач В.И. Реализация оптимальной структуры обнаружения радиотехнических устройств охранной сигнализации // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2009. Т 5, №2. С. 43–49.
8. Воловач В.И. Особенности реализации структуры обнаружения радиотехнических устройств охранной сигнализации, использующих принцип активной радиолокации // Известия Самарского научного центра РАН. Спец. выпуск «Наука–промышленности и сервису». Выпуск 2. 2006 г. – С. 145–150.
9. Воловач В.И. Некоторые особенности оптимальной обработки сигналов радиотехнических устройств обнаружения пространственных охранных систем // Научно-технический вестник Поволжья. №6, 2011. – С. 129–132.
10. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 336 с.
11. Хьюбер Дж. П. Робастность в статистике. – М.: Мир, 1984. – 304 с.
12. Воловач В.И., Гареев Э.Р. К вопросу реализации структуры обнаружения одноканальных радиотехнических устройств охраны турникетного типа // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации: сб. статей I международной заочной научно-технической конференции / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти: Изд-во ПВГУС, 2011. С. 126–136.

Д. А. Габриелян

МАИ, Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
факультет двигателей летательных аппаратов
кафедра ракетных двигателей
Россия, г. Москва
david@gbri.ru

МАГНИТОТЕПЛОВОЙ ДВИГАТЕЛЬ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МАГНИТОТЕПЛОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Работа посвящена магнитотепловой технологии и ее развитию в двигателестроении с учетом современного состояния энергетики. Целью применения магнитотепловой технологии является создание экологически безопасных и эффективных двигателей и генераторов электрического тока. Устройства, основанные на такой технологии, могут получить применение почти в любой сфере деятельности человека.

Ключевые слова: магнитотепловая технология, магнитотепловой двигатель, альтернативная энергетика.

I. Введение

Традиционная энергетика в плане своего дальнейшего технического и технологического развития практически исчерпала себя. Для поддержания необходимого уровня потребления углеводородов нужно совершенствовать и разрабатывать новые методы добычи их нетрадиционных источников (тяжелая и сверхтяжелая нефть, битумы, нефтеносные пески и сланцы). Помимо этого проблема традиционной энергетики заключается все в большем ухудшении экологии окружающей среды.

Все это вместе взятое вызывает беспокойство общества, в плане выбора дальнейшего пути развития энергетики в масштабах всего современного мира. В связи с этим, большинство развитых стран в последнее время большое внимание уделяют решению проблем энергетики будущего. Прежде всего, это постепенный уход от традиционной топливной энергетике, развитие существующих альтернативных методов ее получения и поиск новых нетрадиционных путей продвижения в промышленных масштабах.

В настоящей работе представлен один из возможных путей развития будущей энергетики и основанная на нем технология. Предлагаемая технология отличается от традиционной, тем, что использует низкопотенциальную тепловую энергию, на уровне температуры близкой к температуре окружающей среды, что приводит к целому ряду преимуществ, как экономического, так и экологического характера.

II. Состояние альтернативной энергетики

Суммарные инвестиции в конце 2010 года в альтернативную энергетику составили рекордное значение в 211 млрд. долларов США [1]. Всего за один год эта цифра выросла на 51 млрд. Ведущими инвесторами являются Китай – 50 млрд. долларов США, Германия – 41, США – 30, Италия – 14 и Бразилия – 7 млрд. долларов США. Именно в этих странах наиболее продуктивно развивается альтернативная энергетика. Параллельно с этим ведется политика энергосбережения, позволяющая

вторично использовать энергоресурсы. Все делается для того чтобы демпфировать негативное воздействие со стороны традиционной энергетики и совершить плавный переход на новую энергетику.

По данным REN21 [1] доля альтернативной энергетики в производстве мировой энергии в 2009 году составила 16%, тогда как атомная энергетика - около 3%, а традиционная – 81%. В ряде стран поставлена цель значительного увеличения доли производства суммарной энергии возобновляемыми источниками до 20-50% к 2020г. (Израиль, Германия, Франция, Дания, Швеция, Португалия и др.) (Рис.1.). А небольшие страны, потребление энергии которых мало по сравнению с другими рассчитывают и вовсе полностью перейти на альтернативную энергетику к 2013 году (Тонго и Фиджи).

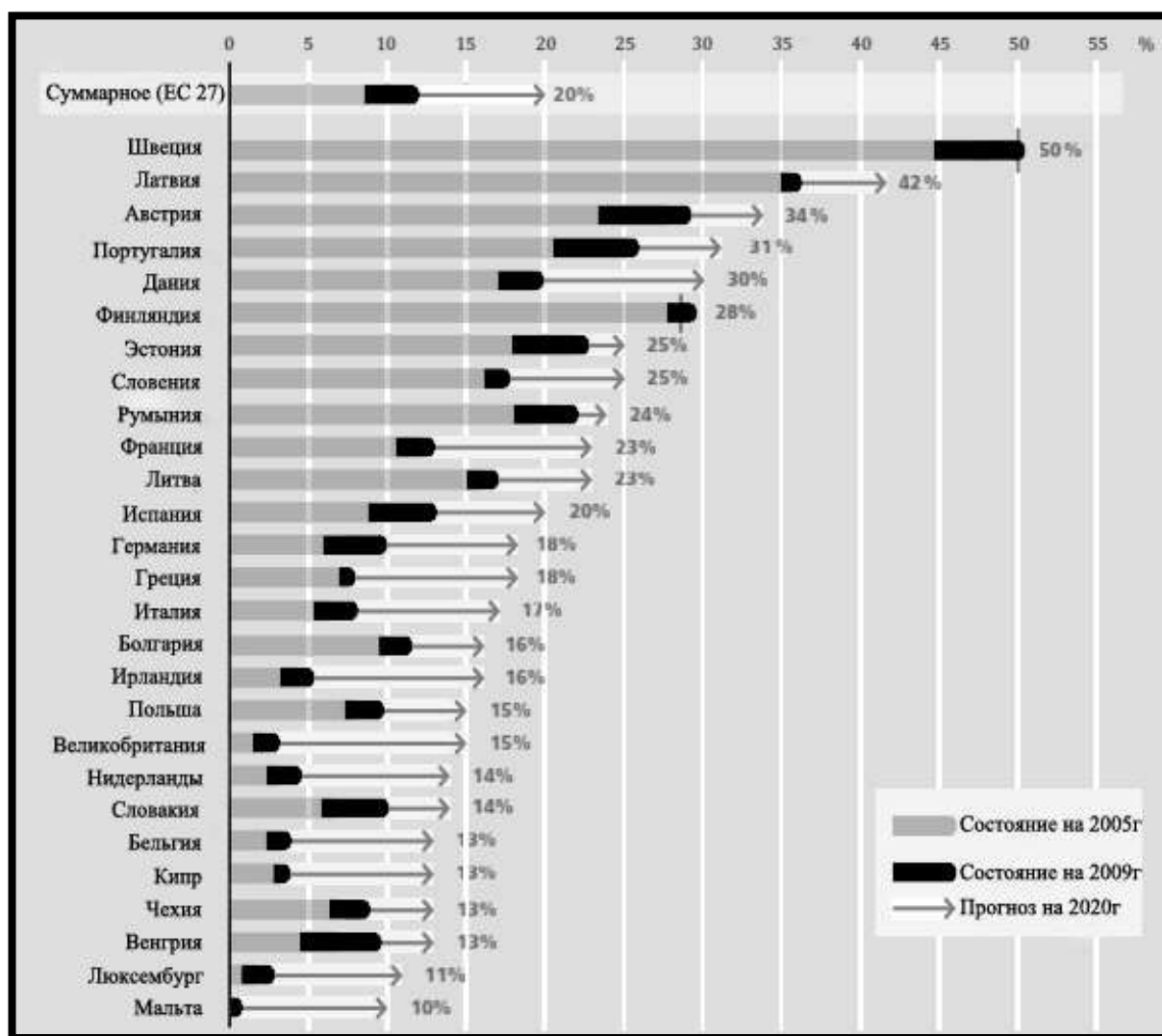


Рис.1. Доля ВИЭ в энергетике Европейского Содружества на период с 2005 по 2009 и с прогнозом на 2020 года [1].

В течение периода с конца 2005г. и по 2010г. суммарное повышение мощности основных альтернативных видов энергетики, включая солнечную (фотоэлементы, концентраторы, нагреватели), ветровую и биотопливную, произошло от 15% почти до 50% [1]. Солнечная энергетика, основанная на фотоэлементах, развивается намного быстрее остальных, за ней следуют биодизельная и ветровая энергетики. (Рис.2.).

Альтернативная энергетика получило обширное развитие в трех направлениях:

- ❖ Производство электричества для бытового и промышленного потребления (электростанции на различных ВИЭ);
- ❖ Системы водоснабжения и нагрева (геотермальная энергетика солнечные коллекторы и т.п.)
- ❖ Топливо для экологически чистого транспорта (этанол, биодизель и т.п.).

По докладу компании REN21 [1] ясно, что вся политика ведущих стран направлена на создание и поиск новой энергетики способной полностью заменить

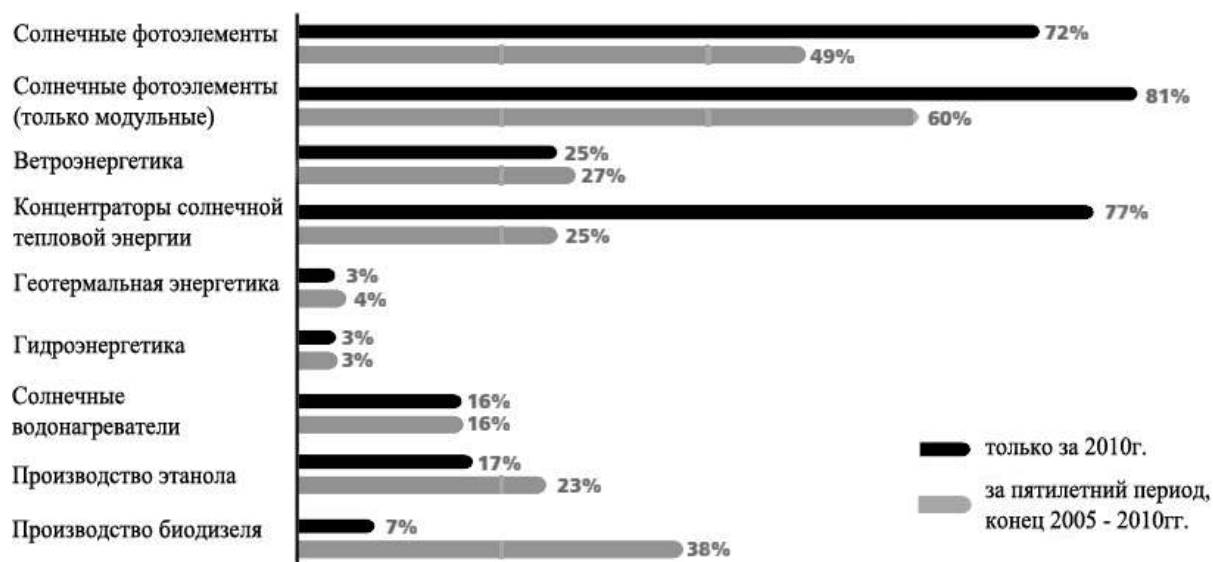


Рис.2. Средние значения роста мощности возобновляемых источников энергии и производства биотоплив за 2005 – 2010 гг. [1]

традиционную. Земля каждый день получает от Солнца в тысячу раз больше энергии, чем ее вырабатывается всеми электростанциями мира, если сделать перерасчет в условное топливо, то оно составит около 100 трлн. тонн [2]. Задача здесь состоит в том, чтобы научиться эффективно использовать хотя бы ее небольшое количество. Но используемые в настоящее время технологии преобразования солнечной энергии для получения промышленного тепла и электричества весьма трудоемки и экономически до последнего времени не конкурентно способны. Из этого следует необходимость модернизации нынешней альтернативной энергетики, а так же осуществление поиска новых эффективных способов производства энергии на промышленном уровне с использованием возобновляемых источников энергии.

Упомянутые выше возобновляемые источники энергии (Рис.2) имеют как положительные, так и отрицательные стороны. К достоинствам можно отнести повсеместную распространенность большинства их видов и экологическую безопасность, а также эксплуатационные затраты по использованию нетрадиционных источников не содержат топливной составляющей.

Недостатки - это часто малая плотность потока энергии (удельная мощность) и изменчивость во времени. Первое обстоятельство заставляет создавать большие площади для энергоустановок, перехватывающие поток используемой энергии (приемные поверхности солнечных установок, площадь ветроколеса, протяженные плотины приливных электростанций и т.п.). Это приводит к большой материалоемкости подобных устройств, а, следовательно, к увеличению удельных капиталовложений по сравнению с традиционными энергоустановками.[3]. Больше неприятностей доставляет изменчивость во времени таких источников энергии, как

солнечное излучение, ветер, приливы, сток малых рек, тепло окружающей среды. Если, например, изменение энергии приливов строго циклично, то процесс поступления солнечной энергии, хотя в целом и закономерен, содержит значительный элемент случайности, связанный с погодными условиями. Еще более изменчива и непредсказуема энергия ветра. Зато геотермальные установки при неизменном дебите геотермального потока в скважинах гарантируют постоянную выработку энергии, однако, эти потоки встречаются далеко не везде и имеют локальный характер.

III. Магнитотепловая технология

В данной работе рассматривается иной метод получения энергии из альтернативных источников. Речь пойдет о магнитотепловой технологии на примере магнитотеплового двигателя (МТД), работа которого основана на известных физических принципах, а именно магнитных фазовых переходах, происходящих в некоторых ферромагнетиках, под воздействием теплового импульса. С использованием таких материалов, в процессе их периодического намагничивания и размагничивания с помощью теплового импульса в магнитном поле (например, в поле постоянных магнитов), совершается механическая работа с возможностью преобразования ее в электрический ток. В качестве источника тепловой энергии может выступать любой теплоноситель: жидкость, газ, солнечное излучение, геотермальные воды и т.д. В отличие от других установок нетрадиционной энергетики работоспособность МТД не зависит от погодных условий - он может функционировать в любой климатической зоне, если подобраны соответствующие рабочие материалы.

Магнитотепловые устройства это компактные установки, не требующие больших территорий, так же являются масштабируемыми и способны работать в системе с другими устройствами. Такого рода установки могут получить применение в домашнем хозяйстве и в промышленности как автономные энергоустановки, в транспортной отрасли как силовые установки и сервоприводы для автомобилей и летательных аппаратов. Весьма актуально использование магнитотепловой технологии в космосе.

Однако при проектировании такого двигателя возникает ряд проблем. Это связано с необходимостью решения целого ряда задач из различных областей физики, в частности: магнитостатики, гидродинамики, теплофизики, гидравлики, аэродинамики и т.д. применительно к разработке рабочего проекта МТД. Практическому внедрению опытного образца двигателя, предшествует большая подготовительная работа, связанная с поиском оптимальных технических решений конструкционного исполнения двигателя с учетом большого числа параметров.

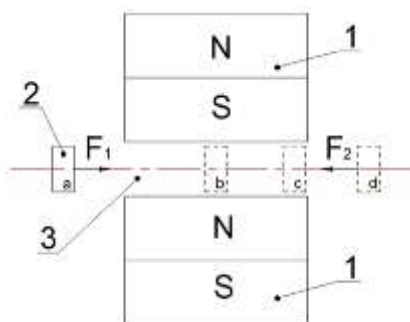


Рис.3. Принцип работы МТД [4].

1 – постоянные магниты; 2- рабочее ферромагнитное тело; 3 – межполюсный зазор.

На простом примере рассмотрим принцип работы МТД (Рис.3). Ферромагнитное рабочее тело 2, находящееся при температуре ниже точки Кюри T_c , по мере ввода в

магнитное поле спонтанно намагничивается и на него начинает действовать сила притяжения F_1 (Рис.3.а), которая движет ферромагнетик к магнитному центру системы вдоль градиента магнитной индукции. В рассмотренном варианте магнитный центр расположен в геометрическом центре системы, где силы взаимодействия уравниваются друг друга, $F_1 = F_2$ (Рис.3.б). Это равновесие может быть нарушено и рабочее тело приобретет однонаправленное движение, если в момент начала действия на ферромагнетик тормозящей противоположно направленной силы F_2 перевести ферромагнетик в парамагнитное состояние [3].

Величина скачка намагниченности в точке магнитного фазового перехода, происходящая под воздействием теплового импульса, в конечном счете, и определяет величину высвобождающейся, действующей на рабочее тело силы:

$$F = m \cdot \sigma(H, T) \cdot dB/dx \quad [4],$$

где m – это масса рабочего элемента, если элемент составной, то в формуле учитывается только масса магнитного материала; $\sigma(H, T)$ – удельная намагниченность рабочего элемента, которая зависит от напряженности внешнего магнитного поля H и температуры элемента T ; dB/dx – градиент магнитной индукции вдоль действия магнитной силы. Удельная намагниченность магнитного материала имеет резкую зависимость от температуры вблизи точки Кюри. Вследствие этого тело может совершать магнитный фазовый переход в пределах нескольких градусов, что значительно уменьшает затраты тепла в целом.

Если закрепить множество рабочих элементов, расположенных с определенным шагом на свободно вращающемся диске по его периферии и подобающе организовать их нагрев и охлаждение, то каждый набегавший элемент, находясь в ферромагнитном состоянии, будет вытеснять предыдущий, уже перешедший в парамагнитное состояние, тем самым вырабатывая механическую энергию вращения [4].

Первые разработки изобретений основанных на магнитотепловых эффектах были опубликованы в конце 19 века. Этим направлением занимались ведущие умы того времени Т.А.Эдисон (Британский патент №16709), Н.Тесла (патент США №428057), М.А.Шварц (патент США №1431545) и другие. Это были, как правило, магнитотепловые двигатели и генераторы электрического тока. Данные устройства работали за счет циклического нагрева и охлаждения рабочего ферромагнетика в присутствии внешнего магнитного поля, которые создавалось электромагнитами или постоянными магнитами. Тепло же являлось продуктом горения различных углеводородов из-за необходимости в высоких температурах для размагничивания железа. У таких двигателей был весьма низкий КПД из-за больших тепловых потерь, не имея практического использования, с развитием традиционной энергетики стали терять интерес ученых. В дальнейшем, с открытием в 1895г. Пьером Кюри температуры, при которой ферромагнитные изначально вещества, такие как железо, теряли свои сильные магнитные свойства, становясь при этом парамагнитными, удалось значительно усовершенствовать МТУ. Эта температура получила имя своего открывателя – точка или температура Кюри.

Важным шагом в развитие МТТ стало использование редкоземельных металлов, в качестве как магнитомягких так и магнитотвердых материалов. Изучив магнитные свойства гадолиния (Gd), стало ясно, что этот металл хорошо подходит для рабочего элемента МТУ из-за фазового магнитного перехода в районе температуры окружающей среды (Таблица 1) [4]. Данное новшество позволило рассматривать в качестве источников тепловой энергии низкопотенциальные источники, такие как вода, солнечная радиация, геотермальные потоки и т.д. А в перспективе позволит отказаться от дорогих и сверхстойких к температурным нагрузкам материалов, что должно удешевить технологию производства.

Таблица 1 - Точка Кюри и коэффициент теплопроводности ферромагнетиков [6]

Элемент	Точка Кюри T_C , °C	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м*К) при 300К
Co, кобальт	1115	100
Fe, железо	771	80,4
Ni, никель	354,4	90,9
Gd, гадолиний	20	10,6
Tb, тербий	-53,5	11,1
Dy, диспрозий	-184	10,7
Ho, гольмий	-253	16,2

Гадолиний по сравнению с другими ферромагнетиками обладает малым коэффициентом теплопроводности (Таблица 1), что влияет на интенсивность и время нагрева (охлаждения) рабочего элемента. В перспективе развития метода целесообразно использовать и создавать сплавы не дорогих металлов, которые будут иметь наперед заданные магнитные и тепловые свойства необходимые для создания эффективных устройств определенного типа и назначения.

Низкие рабочие температуры, в пределах до 100°C позволили использовать мощнейшие на сегодня постоянные магниты на основе Nd-Fe-B для создания магнитной системы (Таблица 2). Основными определяющими параметрами для ПМ является коэрцитивная сила H_C , комплекс $(BH)_{max}$, характеризующий максимальную запасенную энергию магнита, и остаточная намагниченность B_r . Данные магниты вышли на мировой рынок не так уж и давно. Спеченный неодим-железо-бор (Nd-Fe-B) магнит - самый мощный из современных постоянных магнитов присутствующих на рынке. Высокие магнитные характеристики и относительно низкие цены делают Nd-Fe-B наиболее подходящим материалом при проектировании новых магнитных систем. Его недостатком является относительно низкие предельные температуры, после которых магнит начинает терять свои свойства. Для Nd-Fe-B максимальная рабочая температура составляет 100-200 °C [3]. Учитывая, что многие технические устройства, в том числе и МТД работают при температурах ниже 100 °C, то магниты на основе Nd-Fe-B наилучшим образом подходят для поставленных задач с точки зрения экономичности, эффективности и компактности.

Таблица 2 - Основные материалы и свойства постоянных магнитов [6]

Группа материалов	H_C , кА/м	B_r , Тл	$(BH)_{max}$, кДж/м ³	Предельная температура, °C
Nd-Fe-B	840 - 1100	1,1 - 1,5	240 - 420	100 - 200
Sm-Co	650 - 880	0,9 - 1,2	150 - 250	300 - 350
Al-Ni-Co-Fe	50 - 160	0,7 - 1,4	30 - 80	450 - 550
Ферриты (оксиферы)	160 - 290	0,2 - 0,4	20 - 30	250

В настоящее время направлением магнитотепловой технологии занимаются частные компании и некоторые научные деятели, в том числе автор настоящей работы, однако, явных успехов не достигнуто. Существует ряд лабораторных моделей доказывающих целесообразность и актуальность технологии, так компанией Vortex Energy Inc. проведена оценка удельной мощности устройств. Основываясь на

экспериментальных данных величину удельной мощности устройства можно довести до значения порядка 1Вт./грамм рабочего тела и выше [7].

IV. Заключение

В работе проведен анализ состояния нетрадиционной энергетики, приведены прогнозы ее развития до 2020г. Показаны достоинства и недостатки традиционной и альтернативной энергетик, предложено использование магнитотепловой технологии, как в двигателестроении, так и в других отраслях деятельности.

Показано, что основными достоинствами магнитотепловой технологии являются:

1. Экологическая безопасность. Использование низкопотенциальной тепловой энергии окружающей среды (вода, радиация Солнца, геотермальные источники и т.п.).

2. Многофункциональность. МТТ может получить применение в: быту и домохозяйстве – отопление и электропитание; в промышленности – системы энергосбережения и автономного питания предприятий; в машиностроении – двигательные установки и генераторы тока и т.д.

3. Способность работать в любой климатической зоне.

4. Масштабируемость установки. С увеличением габаритов и размеров основных узлов установки, а так же наращивание числа функциональных блоков, растет общая мощность.

5. Комбинирование с другими технологиями преобразования энергии, к примеру, с тепловыми насосами.

6. Значения рабочих температур в пределах 100°С, что обеспечивает высокий ресурс работы узлов и деталей устройств и упрощает требования к выбору материалов.

Выявлено, что для внедрения данной технологии в промышленность и создания рабочего образца необходимо использовать все передовые технологии машиностроения; разрабатывать новые материалы, отвечающие заданным магнитным и тепловым свойствам, с привлечением нанотехнологий и многое другое. В перспективе развития магнитотепловой технологии необходимо будет провести детальный анализ распределения магнитных и тепловых полей в зависимости от ряда факторов для выявления оптимальных параметров установки и основных ее узлов.

Список литературы:

1. Janet L. Sawin, Eric Martinot. Отчет компании REN21// «Renewables 2011. Global status report» - Париж, REN21 Secretariat, 2011. - 116с.

2. Снугирев А. Энергетика будущего: пособие / Экологический правозащитный центр «Bellona». СПб: Изд-во ООО «ПЦ Синтез». 2008 - 36с.

3. Gabrielyan D., «Computer simulation usage for thermodynamic signature analyze of thermomagnetic engine» // 4th European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS) - Saint-Petersburg, July 2011.

4. Бедбенов В.С. "Устройство для преобразования солнечной энергии в механическую" // Авторское свидетельство СССР SU 1453998. 1987г.

5. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З., Физические величины: справочник. М: Изд-во Энергоатомиздат, 1991. – 1234с

6. Официальный сайт компании Dexter Magnetic Technologies, Inc. [Электронный ресурс]; Magnetic grade material - Режим доступа: <http://www.dextermag.com/>, Нью-Йорк, США 2011г. (дата обращения 04.10.2011)

7. Официальный сайт компании Vortex Energy, Inc. [Электронный ресурс]; Магнитотепловая технология производства энергии - Режим доступа: http://www.vortexenergy.ru/brochure_1r.html США 2010г. (дата обращения 04.10.2011)

**А. М. Гирфанов к.т.н., А. В. Дворянкин, Д. В. Неделько к.т.н.,
С. А. Михайлов д.т.н., Т. А. Мухаметшин**

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ
кафедра аэрогидродинамики
Россия, г. Казань
mta1978@bk.ru

Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 г.г. Государственный контракт № П665 от 19 мая 2010 г.

К ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОСНОВНЫХ АГРЕГАТОВ ВЕРТОЛЕТА

Предложен способ определения остаточного ресурса основных агрегатов вертолета с учетом фактических условий его эксплуатации. Для определения характеристик режима полета по ограниченному числу параметров полета, регистрируемых штатными защищенными бортовыми самописцами, использована технология искусственных нейронных сетей.

Ключевые слова: вертолет, ресурс, повторяемость режимов полета, искусственные нейронные сети.

Особенность эксплуатации вертолетов заключается в том, что назначенные ресурсы основных дорогостоящих агрегатов (редукторов, валов трансмиссии, втулок и лопастей несущего и рулевого винтов, автоматов перекоса, агрегатов системы управления), как правило, существенно меньше ресурса конструкции планера. Такое положение обусловлено тем, что рассматриваемые агрегаты работают в напряженных условиях воздействия переменных динамических нагрузок, создаваемых вращающимися лопастями несущего и рулевого винтов и имеющих достаточно широкий амплитудно-частотный спектр с числом циклов за ресурс, превышающим десятки или даже сотни миллионов. Поэтому ресурсы основных динамически нагруженных агрегатов определяются усталостной прочностью их конструкции на основе концепции «безопасного ресурса», согласно которой возникновение усталостных трещин в силовых элементах конструкции недопустимо.

Как известно, уровень переменных напряжений в конструкции агрегата существенным образом зависит от условий эксплуатации вертолета (режимов полета, полетной массы, центровки, и интенсивности маневрирования вертолета). Также, безопасный ресурс динамически нагруженных агрегатов определяется не только уровнем переменных нагрузок, но и относительной продолжительностью ее действия, что собственно и лежит в основе методологии решения проблемы оценки остаточного ресурса особо ответственных агрегатов вертолета [1].

Обзор литературы [2] и сведений, размещенных в глобальной сети интернет, показал, что в этом случае эффективны так называемые искусственные нейронные сети (ИНС), широко применяемые в различных областях деятельности. В данной работе для решения задачи определения полетных характеристик вертолета, применен

многослойный перцептрон, нейроны в котором расположены слоями и имеют однонаправленные связи между ними. В качестве активационной функции нейронов выбран сигмоид. Подстройка весовых коэффициентов производится методом обратного распространения ошибки. При правильном построении связей и подборе весовых коэффициентов синапсов нейронная сеть может сколь угодно точно вычислять любую непрерывную функцию от своих входов. На рисунке 1 представлен один из результатов идентификации нормированных значений центровки вертолета по летным данным, где символом треугольника показаны данные, вычисляемые ИНС по записям бортового регистратора, а сплошной - линией известные из полетного листа величины для нескольких полетов (ступени).

Задача идентификации режимов полета в первую очередь требует определения критериев, однозначно характеризующих тот или иной маневр, выполненный вертолетом в эксплуатации. В частности, на рисунке 2 показан результат автоматизированного определения участков (пунктирная линия) «кабрирования» вертолета в ходе выполнения одного полета (символ «х»). Очевидно, что при кабрировании вертолет также выполняет «набор высоты». Поэтому в качестве дополнительного критерия для различия между этими режимами выбран неизменный общий шаг несущего винта при входе и в течение всего участка кабрирования.

В целом для решения задачи требуется идентификация 13 групп режимов полета с различными вариациями: работа на земле; висение; взлет; горизонтальный полет; набор высоты; моторное снижение; снижение на режиме самовращения несущего винта; развороты на режимах горизонтального полета и снижения; ввод в горку и вывод из пикирования с вертикальной перегрузкой; вывод из горки и ввод в пикирование с вертикальной перегрузкой; полет на предельно малой высоте с включением автоматической системы огибания рельефа местности; посадка; сочетания перечисленных режимов (маневров) и неиндифицируемые.

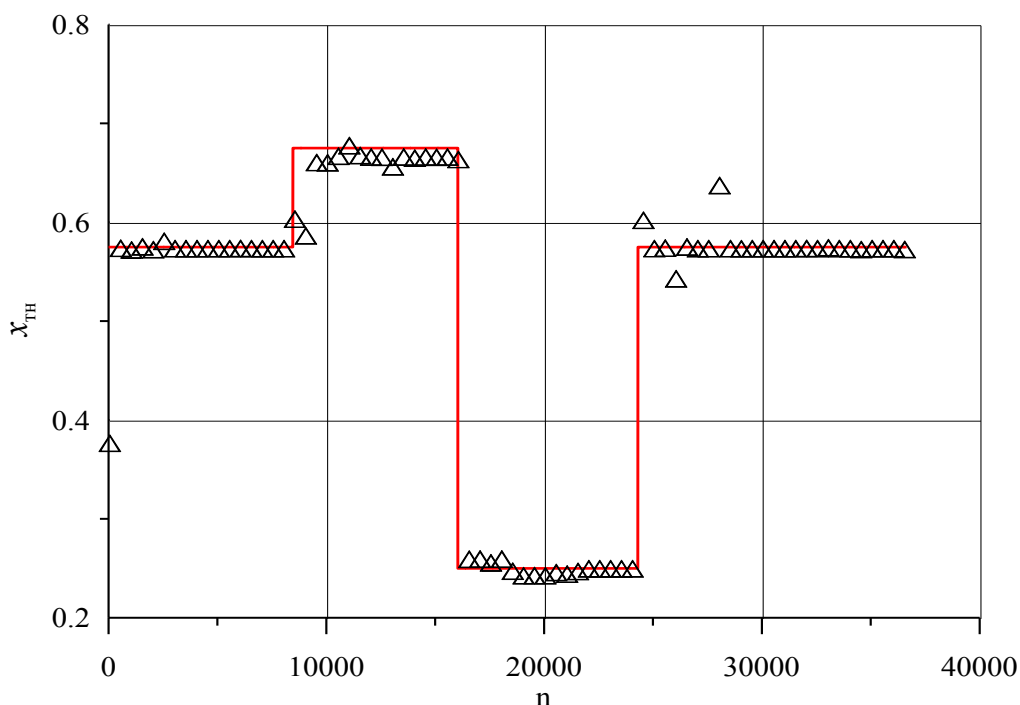


Рис. 1. – Результаты идентификации нормированных значений центровки вертолета по летным данным.

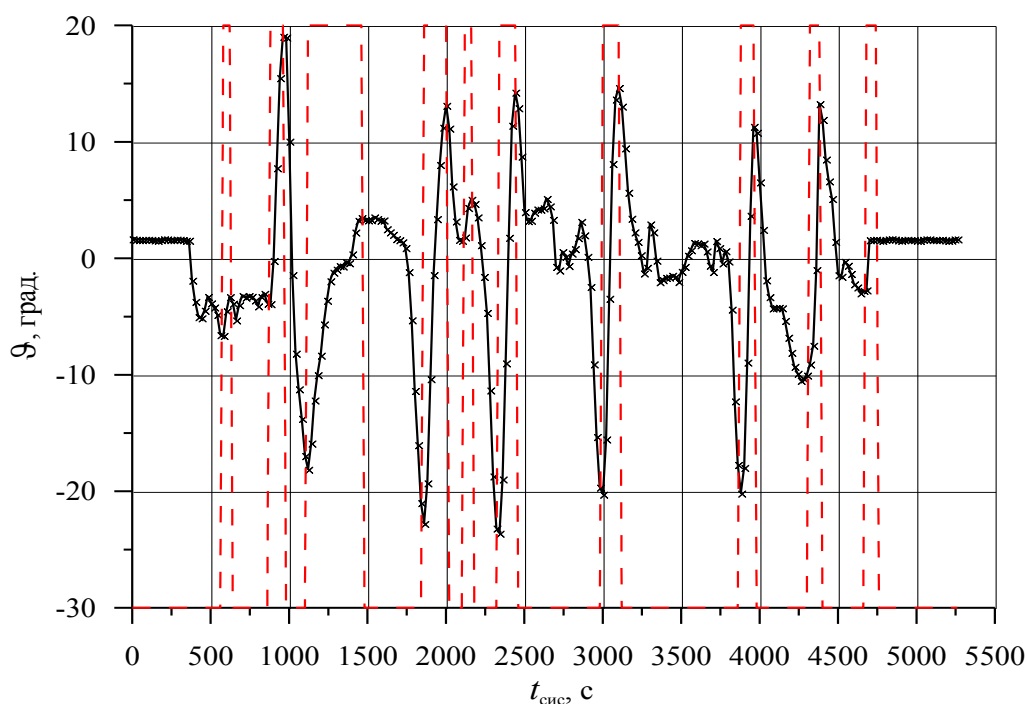


Рис. 2. – Результат автоматизированного определения участков (пунктирная линия) «кабрирования» вертолета в ходе выполнения одного полета (символ «х»).

Для определения остаточного ресурса основных агрегатов вертолета предлагается следующая методика:

1. С использованием результатов стендовых испытаний агрегата и принятых отраслевыми институтами видов кривой усталости для каждого использованного материала, определяется кривая усталости для силовой конструкции агрегата;

2. Полученная кривая «опускается» на запас, принятый в нормативных документах, в зависимости от количества испытанных образцов, разброса материалов испытаний, стабильности производства, возможности контроля в эксплуатации и т.п.;

3. По результатам идентификации режимов полета определяется фактическое время (и количество циклов нагружения агрегата) на каждом режиме полета;

4. С использованием измеренных в полете нагрузок (по результатам летных испытаний вертолета имеются измерения нагрузок на определенном агрегате и на каждом режиме полета с учетом взлетных весов вертолета), количества циклов нагружения, имевших место на соответствующем режиме полета за исследуемое время эксплуатации, и полученной кривой усталости, определяется усталостная повреждаемость [3] агрегата за исследуемое время эксплуатации, как сумма отношений количества циклов на каждом режиме к количеству циклов до разрушения на нагрузке, соответствующей этому режиму полета;

5. Полученные фактические повреждаемости суммируются в процессе эксплуатации;

6. Критерием исчерпания усталостной долговечности конструкции является достижение суммы повреждаемости 0,5 (с учетом коэффициента запаса на использование гипотезы линейного суммирования повреждаемостей); учитывая, что для каждого агрегата установлен назначенный ресурс, представляющий собой часть расчетного (предельно допустимого) ресурса, определяется коэффициент, устанавливающий во сколько раз назначенный ресурс меньше расчетного; на этот коэффициент снижается предельная повреждаемость, равная 0,5;

7. Разница между предельной повреждаемостью (0,5), умноженной на указанный выше коэффициент, и суммой фактических повреждаемостей, представляет собой остаточную повреждаемость конструкции. Величина обратная остаточной повреждаемости является остаточным ресурсом конструкции [3].

Предлагаемый подход позволяет не только предупреждать возможные отказы и непредвиденные достижения предельных состояний, но и более правильно планировать режимы эксплуатации, профилактические мероприятия и снабжение запасными частями. Более того, переход к индивидуальному прогнозированию ведет к увеличению среднего ресурса вертолетов, поскольку уменьшает долю вертолетов преждевременно снимаемых с эксплуатации для ремонта, и открывает путь для обоснованного выбора оптимального срока эксплуатации. В ряде случаев рентабельная эксплуатация может быть продолжена в условиях снижения нагрузок, что особенно актуально в настоящее время, когда многие вертолетные фирмы планируют перевод своих изделий на эксплуатацию по техническому состоянию.

Список литературы:

1. *Володко А.М.* Автоматизированный мониторинг работоспособности и применения зарубежных вертолетов. // Проблемы безопасности полетов. Сборник обзорной информации, ВИНТИ 2003. – с. 3-48.
2. *Горбань А.Н., Россиев Д.А.* Нейронные сети на персональном компьютере. // Новосибирск: Наука (Сиб. отделение), 1996. 276 с.
3. *Михеев Р.А.* Прочность вертолетов. М. Машиностроение. 1984. 280 с.

Г. М. Гончаров д.т.н., И. С. Гуданов к.т.н., А. А. Ломов д.т.н., В. С. Черепенин

Ярославский государственный технический университет
машиностроительный факультет
кафедра технологических машин и оборудования
Россия, г. Ярославль
goudanov@ya.ru

ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛАСТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИ ЭКСТРУЗИИ ПРОТЕКТОРНЫХ ЗАГОТОВОК АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

Рассмотрена математическая модель гидродинамики экструзии с учётом эластического восстановления. Описаны особенности экструзии резиновых смесей через каналы со сложной геометрией границ. Выявлены закономерности, связывающие формообразование свободной поверхности с режимными параметрами экструзии.

Ключевые слова: экструзия, протекторные формующие головки, длинномерные профильные изделия, вязкоупругие жидкости, резиновые смеси, постэкструзионное разбухание, численные методы.

В последнее время одним из основных направлений развития промышленности переработки полимеров является усовершенствование существующих процессов с целью оптимизации условий производства новых видов изделий при использовании новых типов материалов. Наиболее современным и высокотехнологичным способом переработки полимеров является процесс экструзии. Без постоянного совершенствования формующего оборудования, а также изучения технологии экструзии невозможно решение важнейших научно-технических задач в области производства изделий из полимерных материалов [1]. Значительное место в полимерной промышленности занимает производство шин и резинотехнических изделий, при этом особое внимание уделяется качеству подобных изделий, получаемых экструзией [2].

В настоящее время при экструзии различных заготовок (например, деталей автомобильных шин) наблюдаются многочисленные дефекты. Среди таких дефектов можно выделить: наплыв по стыкам протектора, наплыв кромки боковины, гребень по протектору и т.п. вплоть до разрыва заготовки. При экструзии сложных протекторных заготовок шин возникают трудности в достижении заданной формы изделия. Несоответствие какого-либо участка шприцуемой заготовки заданному калибру ведёт к повышенному теплообразованию на данном участке покрышки, а затем и к снижению ресурса ходимости.

В основном вышеуказанные дефекты вызваны явлениями, происходящими в материале в процессе его течения в оформляющих каналах экструзионной головки. Конфигурация канала влияет на развивающиеся в материале напряжения, на образование застойных зон, на равномерность течения полимера в канале и т.д.

Большинство полимерных материалов, а в частности резиновые смеси, являются материалами с вязкоупругими свойствами, которые ответственны за многие из вышеперечисленных дефектов. Резиновые смеси, являясь реологически сложными

средами, при течении в каналах с резко изменяющейся геометрией границ проявляют целый ряд необычных явлений, связанных с наличием конечного времени релаксации напряжений и не наблюдающихся при течениях неньютоновских жидкостей. Важность результатов исследований течений вязкоупругих жидкостей заключается ещё и в том, что они могут быть использованы при проектировании перерабатывающего оборудования и выборе оптимальных режимов переработки. Таким образом, при численном моделировании процессов экструзии, связанных с переработкой резиновых смесей, требуется учитывать их сложное вязкоупругое поведение. Сюда входят такие реологические характеристики полимеров, как сдвиговая вязкость, являющаяся функцией скорости сдвига, продольная вязкость, зависящая от продольной скорости, первая разность нормальных напряжений в простом сдвиговом течении, зависящая от скорости сдвига [3].

Многими авторами с учётом вязкоупругой природы материалов исследуются течения с поверхностью раздела фаз, важные в различных технологических приложениях. Однако немногочисленными являются исследования по формированию экструдата. Для исчерпывания актуальных для экструзии качественных профилей проблем необходимо численное моделирование задачи с учётом максимально возможного числа факторов. Одной из первых сложностей, с которой приходится сталкиваться при моделировании, является выбор реологического уравнения состояния. Наиболее доступными и часто используемыми при моделировании течений резиновых смесей следует считать модели: Максвелла с верхними конвективными членами, Олдройда, Уайта-Метцнера, Фан-Тьен – Таннера, Гезекуса, Леонова, Дои-Эдвардса, FENE-P, POM-POM (DCPP) [4]. Поскольку среди всех явлений поверхностного огрубления для нас интерес представляет лишь эластическое восстановление струи (эффект Баруса), то вполне очевидно, что выбранная модель должна хорошо описывать эволюцию микроструктуры деформируемой среды в условиях релаксации напряжений сдвига. В качестве микроструктуры при течении полимерных материалов обычно понимают конформацию макромолекул, включающую в себя ориентацию в пространстве и степень растяжения макромолекулы [5]. Для протекторных резиновых смесей на основе НК молекулы имеют сильно разветвлённую структуру. Особенно успешными для их описания оказались модель Леонова, Ларсена и Фан-Тьен – Таннера. Плюсами в пользу выбора последней можно назвать: доступность оборудования для определения реодинамики и простоту численной реализации [6].

Рассмотрим следующую модель течения резиновой смеси в канале протекторной головки. В данной статье резиновая смесь рассматривается в качестве несжимаемой вязкоупругой жидкости, течение происходит в ламинарном режиме, а сам процесс принят изотермическим, в связи с чем математическая модель включает в себя уравнения неразрывности, движения и реологическое уравнение состояния вязкоупругой жидкости.

В операторной форме первые два уравнения (1) и (2) могут быть записаны следующим образом:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

$$-\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = 0, \quad (2)$$

где $\mathbf{v}$ – вектор скорости; p – гидростатическое давление и $\boldsymbol{\tau}$ – тензор напряжений.

В качестве реологического уравнения была использована релаксационная модель вязкоупругой жидкости Фан-Тьен – Таннера, основанная на представлении о сеточной структуре молекул полимера. Модель РТТ позволяет с высокой точностью прогнозировать аномалию вязкости раствора полимера и наличие продольной вязкости в течениях обусловленных нормальными напряжениями [7].

Общий тензор напряжений τ раствора полимера состоит из двух частей (3) – составляющей ньютоновского поведения τ_1 , рассчитываемой по уравнению (4), и неньютоновской вязкоупругой составляющей τ_2 , входящей в состав вязкоупругой модели РТТ (5):

$$\tau = \tau_1 + \tau_2, \quad (3)$$

$$\tau_1 = 2\eta_1 D, \quad (4)$$

$$\left[\exp\left(\frac{\varepsilon}{G} \text{tr}(\tau_2)\right) \right] \tau_2 + \lambda \left[\frac{\xi}{2} \overset{\Delta}{\tau}_2 + \left(1 - \frac{\xi}{2}\right) \overset{\nabla}{\tau}_2 \right] = 2\eta_2 D, \quad (5)$$

где λ и G – время релаксации и модуль упругости соответственно; ε и ξ – скалярные материальные параметры ($0 \leq \xi \leq 2$), определяющие поведение модели; D – тензор скоростей деформации. $\overset{\Delta}{\tau}_2$ и $\overset{\nabla}{\tau}_2$ обозначают соответственно верхнюю конвективную и нижнюю конвективную производные тензора напряжений и рассчитываются по формулам (6) и (7):

$$\overset{\Delta}{\tau}_2 = \overset{\circ}{\tau}_2 + D \cdot \tau_2 + \tau_2 \cdot D = \frac{\partial \tau_2}{\partial t} + v \cdot \nabla \tau_2 + \nabla v \cdot \tau_2 + \tau_2 \cdot (\nabla v)^t, \quad (6)$$

$$\overset{\nabla}{\tau}_2 = \overset{\circ}{\tau}_2 - D \cdot \tau_2 - \tau_2 \cdot D = \frac{\partial \tau_2}{\partial t} + v \cdot \nabla \tau_2 - \nabla v \cdot \tau_2 - \tau_2 \cdot \nabla v, \quad (7)$$

где $\overset{\circ}{\tau}_2$ – Яумановская производная.

В верхней области потока жидкость имеет полностью развитый профиль, затем выходит из оформляющей щели и, в конечном счёте, свободно движется в нижней области потока. На стенках формирующего канала выполняется условие прилипания; на свободной поверхности тангенциальные напряжения равны нулю, а нормальные напряжения сбалансированы поверхностным натяжением; на плоскость, проходящую через главную ось потока, задано условие симметрии. Схема течения с соответствующими граничными условиями представлена на рис. 1.

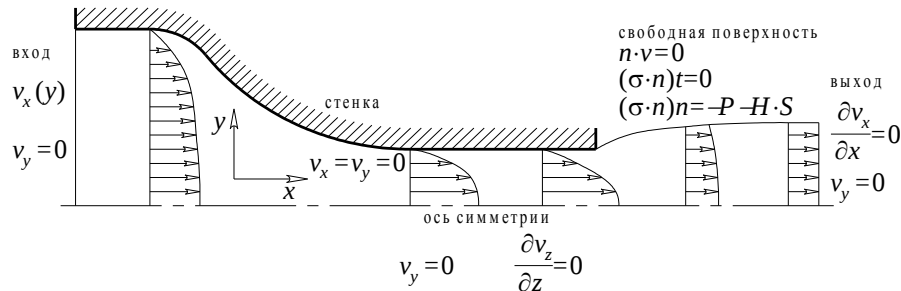


Рис. 1 – Схема течения в сложно профильном формирующем канале.

Численная реализация алгоритма математической модели была выполнена с помощью метода конечных элементов [8]. На первом этапе расчёта производится дискретизация рассматриваемой области течения, заключающаяся в разбиении последней на конечные элементы. Значительные изменения профилирующего канала экструзионной головки по всем трём направлениям пространства требуют использования гибридной неравномерной сетки разбиения [9]. При приближении к выходному сечению густота конечно-элементной сетки постепенно увеличивается, тем самым размеры тетраэдрического симплекс-элемента уменьшаются с 10 до 0,2 мм. В результате дискретизации сложная трёхмерная область была аппроксимирована

набором подобластей (рис. 2) с общим количеством элементов – 276377, узлов – 60536. Для удобства применения аппроксимации Пикарда к области течения со сводной поверхностью к дискретизации были приняты призматические элементы.

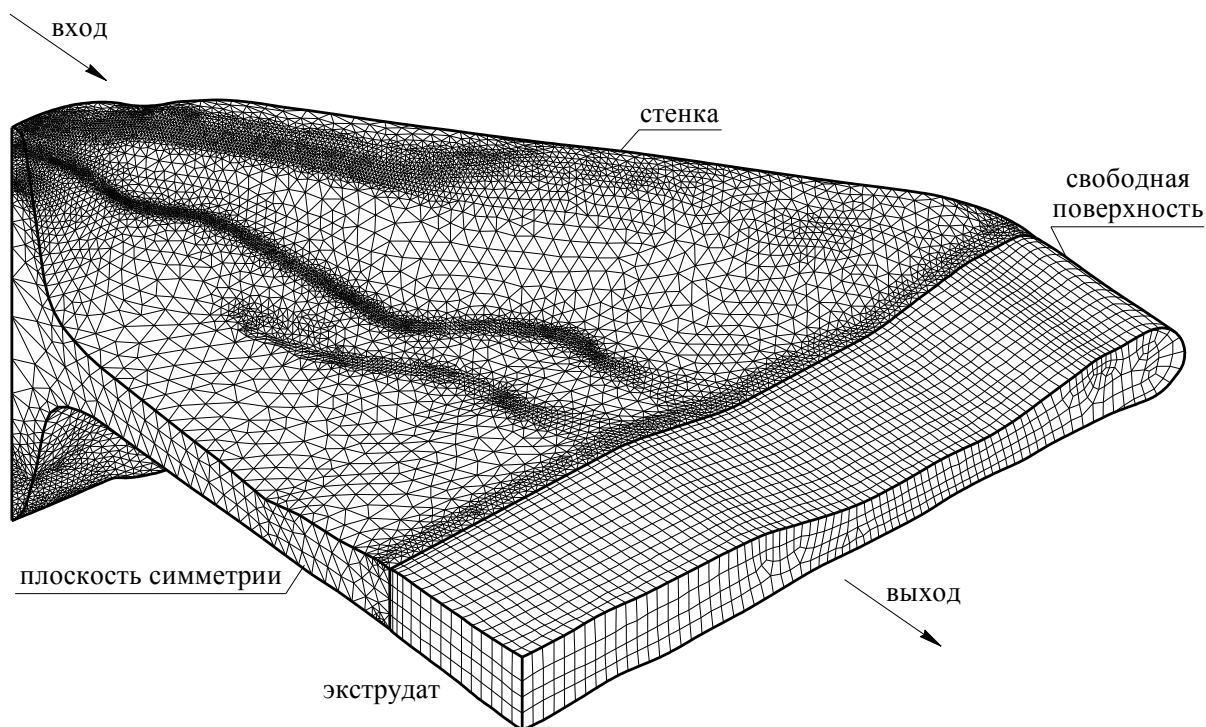


Рис. 2 – Гибридная дискретизация расчётной области течения протекторной головки конечными элементами.

В ходе реологических испытаний резиновой смеси 24-Я-195К были определены следующие характеристики: $\mu=52000 \text{ Па}\cdot\text{с}^n$, $n=0,11$, $\varepsilon=0,3$, $\chi=1,0$.

Полученные в результате численных расчётов изоконтур результирующей скорости и скорости сдвига (рис. 3 и рис. 4) свидетельствуют о неравномерности эластического восстановления по длине протекторной планки. Наиболее быстрое перестраивание скоростного профиля из параболического в линейный происходит в центральной части протекторной заготовки, как следствие – меньшая величина разбухания.

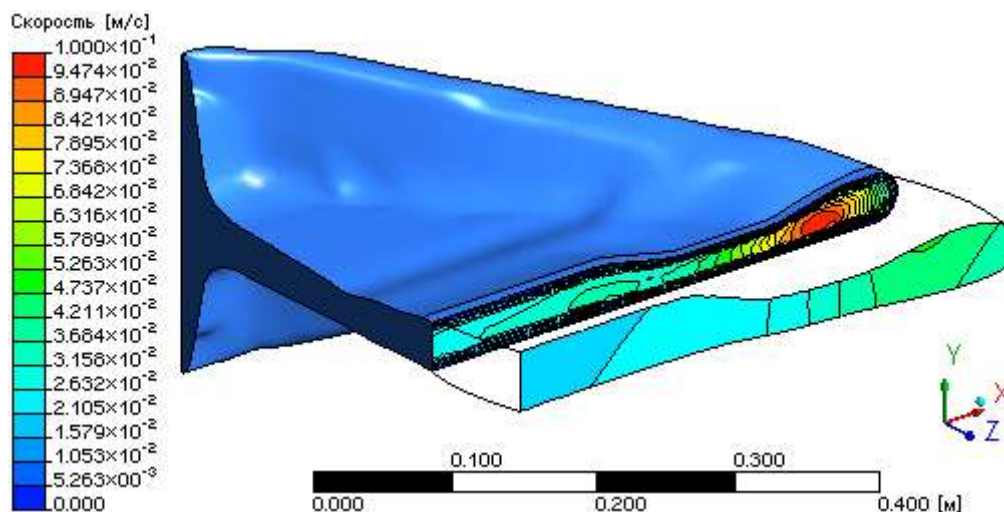


Рис. 3 – Распределение скоростей в формирующем канале протекторной головки.

Вышесказанное подтверждают также данные о распределении безразмерной скорости сдвига ($\gamma/\gamma_{\max}$, $\gamma_{\max}=50 \text{ с}^{-1}$), максимумы которой приходятся на места резкого изменения геометрии – стыки боковины с протекторной частью и наполнительным шнуром. Во многом этому способствует предыстория деформирования материала в формирующем канале. Оформляющие выступы стенок в начале канала, служащие для равномерного распределения материала, влекут за собой накопление чрезмерного упругого потенциала. Оказываемое на материал сдвиговое воздействие по сечению головки не одинаково, равно как и время пребывания материала в отдельных участках области течения, на что явно указывает распределение линий тока в продольном сечении (рис. 5).

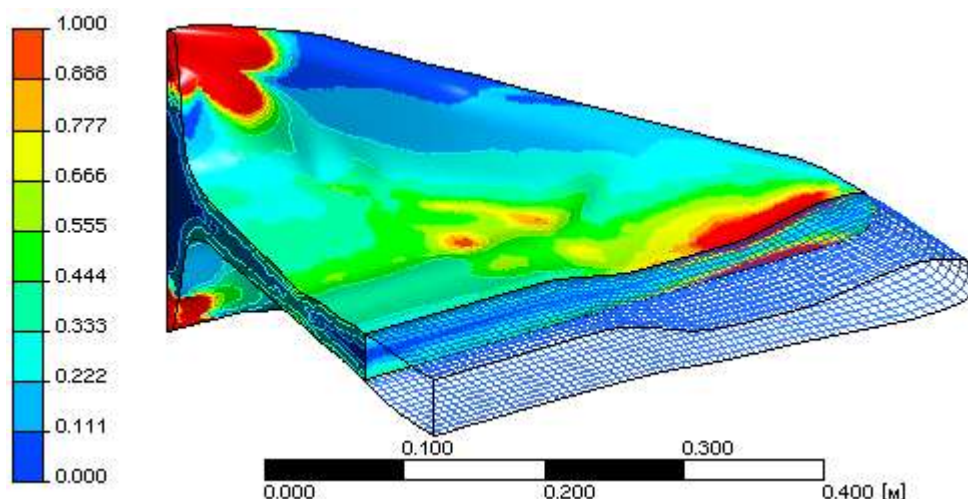


Рис. 4 – Изоконтурные скорости сдвига в формирующем канале протекторной головки.

Превалирующая сосредоточенность линий тока на периферии канала говорит о стремительном росте результирующей скорости по направлению к выходу. Средняя часть канала, характеризующаяся резким передавливанием материала, напротив, будет гарантировать сильную нелинейность скоростного профиля и локальный перепад значений (до 4,85 раз).

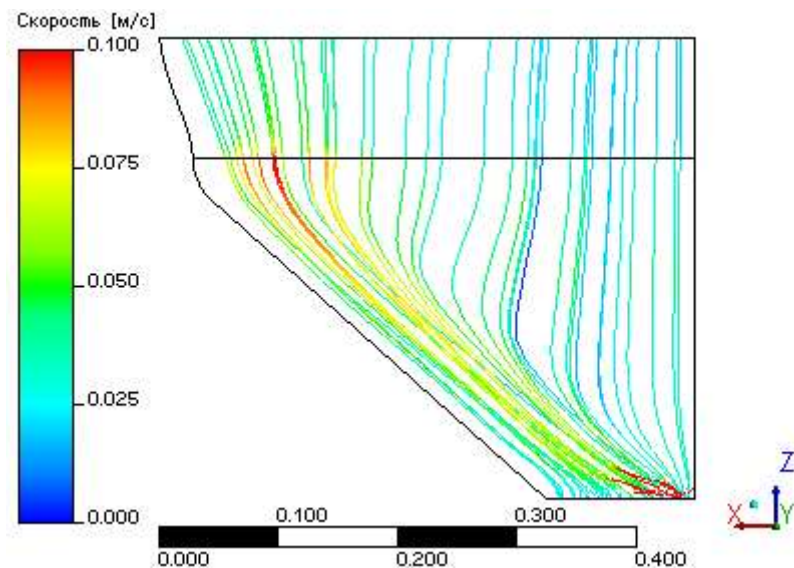


Рис. 5 – Изолинии скорости в продольном сечении формирующего канала протекторной головки.

Более наглядно связь гидродинамических характеристик с параметрами размерного качества иллюстрируют распределения степени разбухания и распределения результирующей скорости, имеющие проекционную связь с профилем выходного сечения протекторной планки (рис. 6).

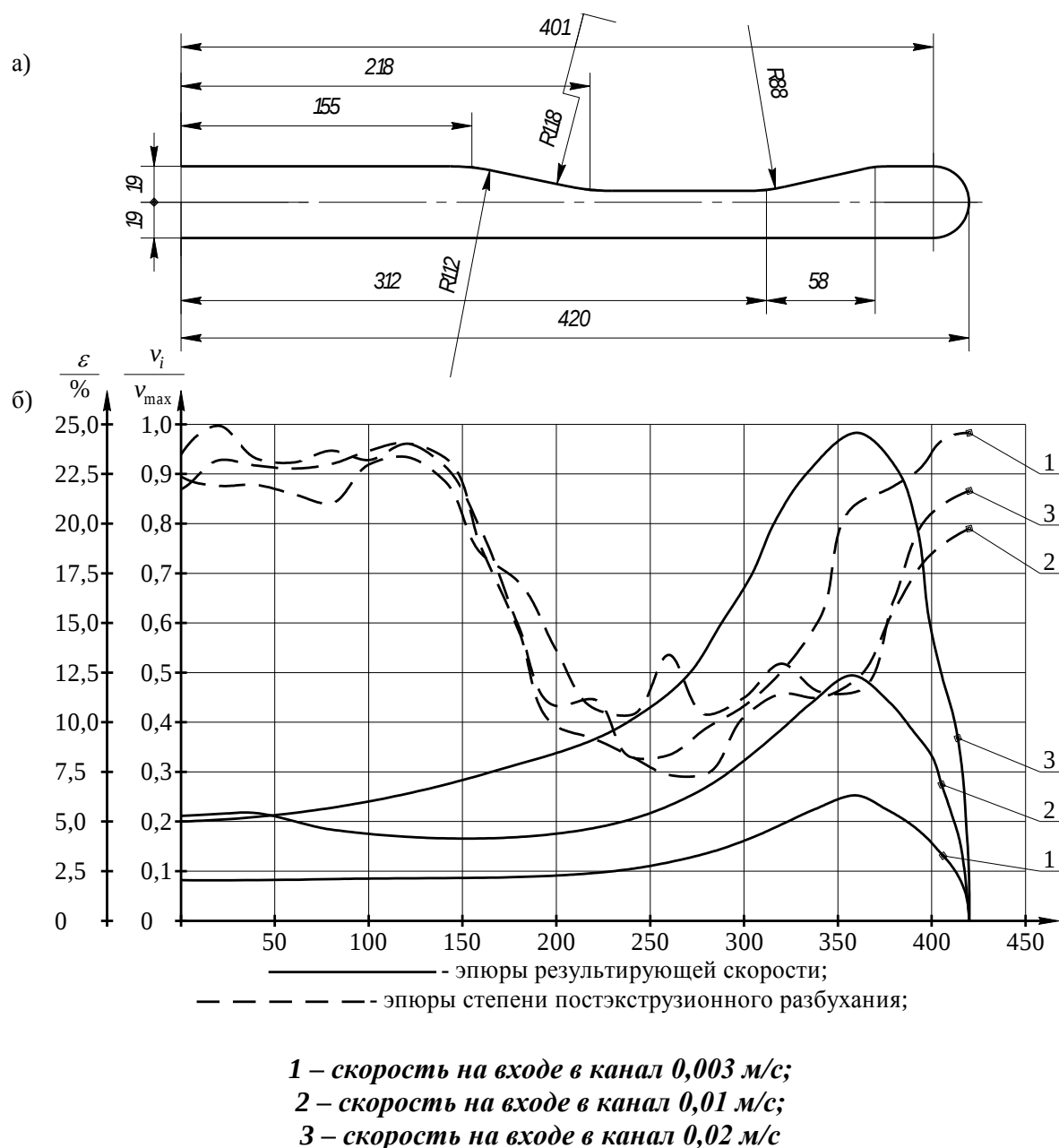


Рис. 6 – Распределения качественных характеристик экструдата:

а) – профиль протекторной планки;

б) распределения результирующей скорости в выходном сечении профилирующей планки и распределения степени разбухания.

Помимо отношения размеров $d_i/d_{\text{зад}}$ использовались следующие характеристики:

- приграничная скорость течения;
- нормальные напряжения;
- напряжения сдвига;
- степень ориентации макромолекул.

Рассмотренный численный подход определения характеристик размерного качества при экструзии длинномерных профилей позволяет определить вклад каждой составляющей в постэкструзионном разбухании получаемых заготовок, выявить наиболее существенные предпосылки негативного формообразования и принять меры

по их устранению. Кроме того метод расчёта достаточно точен и несмотря на свою трудоёмкость прост в реализации решения гидродинамической задачи как в модельных каналах, так и в каналах сложной геометрической формы.

Список литературы:

1. Губер Ф.Е., Тамаркин Б.Ф., Говша А.Г. Проблемы оптимизации процесса шприцевания в промышленности РТИ. – М.: ЦИНТИ химнефтемаш, 1981. – 76 с.
2. Залунаев М.Ю. Метод расчёта процесса экструзии резиновых смесей и оптимизация геометрии профилирующих каналов: Дис. ... канд. техн. наук. – Ярославль, 2001. – 129 с.
3. Хан Ч.Д. Реология в процессах переработки полимеров. – М.: Химия, 1979. – 366 с.
4. Аль-Рваш А.М. Математическое моделирование течения вязкоупругой жидкости в канале вискозиметра с падающим грузом: Дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 2006. – 125 с.
5. Вахтиров А.Ф. Влияние термокапиллярных эффектов на формирование надмолекулярных структур в процессе экструзии сырой резины: Дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 2005. – 124 с.
6. Phan-Tien N., Tanner R.I. A new constitutive equation derived from network theory // J. Non-Newtonian Fluid. Mech. 1979. V. 2. P. 353-365.
7. Carneiro O.S., Nobrega J.M., Pinho F.T., Oliveira P.J. Computer aided rheological design of extrusion dies for profiles // J. Materials Processing Tech. 2001. V. 11. P. 75-86.
8. Раувендааль К. Экструзия полимеров / Пер. с англ. под ред. А.Я. Малкина – СПб.: Профессия, 2006. – 768 с.
9. Микаэли В. Экструзионные головки для пластмасс и резины: Конструкции и технические расчеты. - СПб.: Профессия, 2007. 472 с.

М. С. Гринкрug¹ к.т.н., Н. А. Новгородов², Ю. И. Ткачева³ к.т.н.

¹Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема
факультет математики, информационных технологий и техники
кафедра технических дисциплин
Россия, г. Биробиджан
grinkrug@pgusa.ru

²Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет
электротехнический факультет
кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок и комплексов
Россия, г. Комсомольск-на-Амуре
nikitakms@yandex.ru

³Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет
факультет экологии и химической технологии
кафедра «общая физика»
Россия, г. Комсомольск-на-Амуре
grin@knastu.ru

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КОММУТАЦИИ НАГРУЗОК

Данная статья затрагивает проблему надежности работы основных элементов городских и сельских электрических сетей при управляемой коммутации нагрузок: понижающих трансформаторных подстанций с понижающими трансформаторами (ПТ) различной мощности, дизель-генераторных агрегатов.

Ключевые слова: понижающий трансформатор, дизель-генератор, распределительная сеть, однофазная нагрузка, переходный процесс, коммутация нагрузок.

В основной своей массе нагрузки понижающих трансформаторных подстанций (ПТП) и дизель-генераторов (ДГ) подключаются и отключаются за счет коммутации выключателей различных видов. На практике такие переключения необходимы [1] для того, чтобы достигнуть высокого коэффициента полезного действия работы ПТ и ДГ, снизить потери в них. Переключения нагрузок требуется в силу большого диапазона их изменения.

В [1] и [2] были описаны способы, направленные на экономию электроэнергии в ПТП и топлива ДГ соответственно. В способе [1] рассматривается ПТП, состоящая из двух ПТ с мощностями P_1 и P_2 ($P_1 < P_2$), при ступенчатом регулировании мощности нагрузки. Моменты времени, в которые должно быть выполнено отключение или включение трансформаторов на нагрузку, определяются микроконтроллером по алгоритму, сравнивающему следующие мощности нагрузки со значениями P_1 и P_2 :

1) P_3 – мощность нагрузки, равная значению, при котором КПД трансформаторов равны;

2) P_4 – мощность нагрузки, равная значению, при котором потери в трансформаторе большей мощности равны потерям в обоих трансформаторах, работающих на ту же нагрузку.

В способе [2] рассматривается дизельная электростанция (ДЭС), состоящая из двух ДГ. Алгоритм управления сводится к переключению ДГ в функции мощности нагрузки с использованием микроконтроллера. Моменты времени отключения или включения ДГ на нагрузку определяются условиями:

- 1) $P_{\text{нагр}} < P_{\text{кр1}}$ – подключается ДГ меньшей мощности;
- 2) $P_{\text{кр1}} < P_{\text{нагр}} < P_{\text{кр2}}$ – подключается ДГ большей мощности;
- 3) $P_{\text{нагр}} > P_{\text{кр2}}$ – оба ДГ работают параллельно,

где $P_{\text{нагр}}$ – мгновенная мощность нагрузки кВт; $P_{\text{кр1}}$ – мощность нагрузки, при которой удельные расходы топлива ДГ равны; $P_{\text{кр2}}$ – мощность нагрузки, превышающая номинальную мощность ДГ большей мощности, конкретное значение которой определяется из условия равенства расхода топлива при работе большего ДГ и расхода топлива при одновременной работе двух ДГ на ту же нагрузку.

В упомянутых способах не учитываются:

- 1) возможные броски токов фаз в моменты коммутации нагрузок с ПТ или ДГ с использованием выключателей;
- 2) физическое состояние выключателя до коммутации нагрузки;
- 3) время включения и отключения выключателей (т.е. время от подачи сигнала до непосредственной коммутации контактов выключателя), зависящие от многих внешних факторов, снижающих надежность работы схемы в сложных климатических условиях, при высоких уровнях загрязнения окружающей среды и т.д.

В [3] было рассмотрено два способа снижения несимметрии токов нагрузки ПТ и питающей трансформатор трехфазной линии, что приводит к снижению потерь в них и уменьшению старения изоляции трансформатора и питающей трехфазной кабельной линии. Схема первого способа, по мнению автора, более всего применима для городских ПТП, схема второго способа – для сельских населенных пунктов. Схемы в [3] также используют микроконтроллер для управления выключателями, отключающими и подключающими однофазные нагрузки к трансформатору. Необходимость переключения и величины, отключаемых и подключаемых нагрузок, выбираются микроконтроллером из условия наибольшей близости суммарного тока в каждой из фаз, к среднему значению тока.

В плане надежности работы, упомянутые способы также имеют ряд недостатков в силу:

- 1) наличия выключателей, неспособных обеспечить включение и отключение нагрузок фаз от шин понижающего трансформатора в требуемый момент времени;
- 2) больших значений токов переходных режимов при включении и отключении нагрузок (при малых значениях $\cos\phi$ – чисто индуктивной нагрузке и малых значениях времени начала коммутации нагрузок t) по причине невозможности точного определения момента подключения нагрузок к шинам понижающего трансформатора и их отключения от шин понижающего трансформатора.

Таким образом, из недостатков описанных способов становится ясно, что возможность и стабильность коммутации, а также процессы, протекающие в выключателе и сети при подключении нагрузки, зависят от множества факторов:

- 1) воздействия окружающей среды (влажность, температура, запыленность и загазованность и т.д.);
- 2) состояния выключателя и сети перед коммутацией нагрузок;
- 3) быстродействия выключателя, т.е. времени начала коммутации нагрузки t ;
- 4) уровня несимметрии нагрузок;

5) характеристик нагрузки.

В исследовании [4] на компьютерной модели было установлено, что амплитуда броска тока переходного процесса подключения нагрузки зависит от времени t – от момента, когда напряжение в фазе равно нулю, до начала подключения нагрузки к фазе. В [5] это утверждение было подтверждено при рассмотрении трех случаев изменения нагрузки в фазе понижающего трансформатора мощностью 630 кВА (рассматривался большой уровень индуктивной нагрузки). В каждом из трех случаев изменялось значение начальной нагрузки фазы $I_{нач}$ ($P_{н1}=6304$ Вт; $Q_{н1}=153678$ ВА; $P_{н2}=3362$ Вт; $Q_{н2}=81988$ ВА; $P_{н3}=1261$ Вт; $Q_{н3}=30762$ ВА), значение наброса нагрузки оставалось неизменным $\Delta I \approx 102$ А.

Компьютерное моделирование показало, что при малых значениях коэффициента мощности нагрузки целесообразнее подключать нагрузки к фазе в моменты времени, когда напряжение в фазе максимально.

На рис. 1 представлены зависимости максимальной величины возрастания тока переходного процесса $I_{ф.м}$ от времени начала коммутации t при различных значениях начальной нагрузки фазы $I_{нач}$ и постоянных величинах наброса нагрузки ΔI .

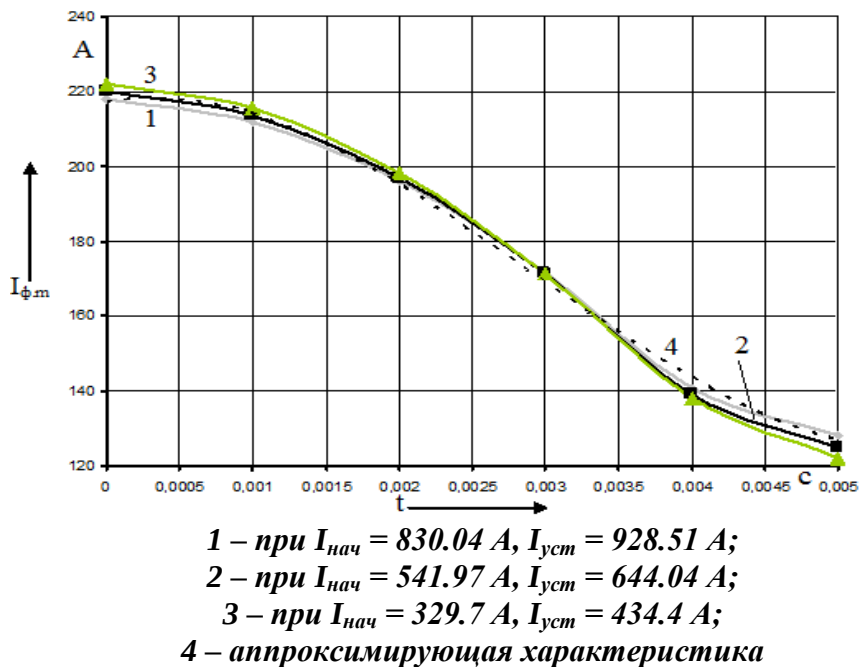


Рис. 1 – Зависимости $I_{ф.м} = f(t)$ (при $\Delta I \approx 102$ А).

Из рисунка 1 видно, что на форму кривых слабо влияет изменение значения $I_{нач}$. Поэтому максимальная величина возрастания тока переходного процесса $I_{ф.м}$ при подключении была представлена как сумма величин, зависящих от времени начала подключения нагрузки t и величины начальной нагрузки фазы $I_{нач}$ при постоянной величине наброса нагрузки $\Delta I \approx 102$ А вида:

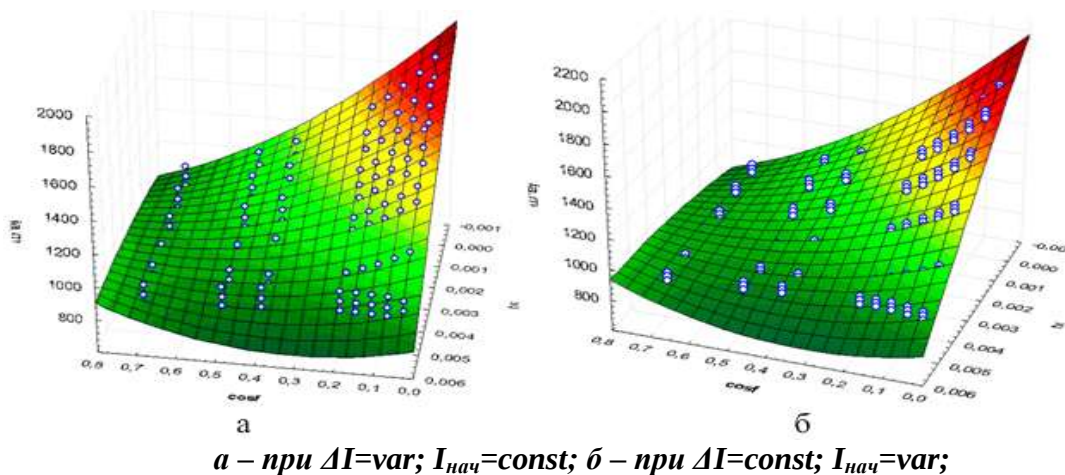
$$I_{ф.м} = a \cdot I_{нач} + b \cdot t^3 + c \cdot t^2 + d \cdot t + e,$$

где a, b, c, d, e – коэффициенты уравнения 3-го порядка, зависящие от параметров трансформатора и величины ΔI . Для аппроксимирующей зависимости рисунка 1: $a=0.976$; $b=1367405345.87$; $c=-11904628.81$; $d=7319.91$; $e=217.25$.

В статье [6] было рассмотрено влияние коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi$ и величины времени коммутации t на максимальную величину возрастания тока

переходного процесса $I_{ф.м}$ для двух случаев: 1) при изменении величины наброса нагрузки $\Delta I = I_{уст} - I_{нач} = 772.4 \text{ А}; 714.5 \text{ А}; 664.5 \text{ А}$ и постоянном значении исходной нагрузки $I_{нач} = 97.3 \text{ А}$; 2) при изменении исходной нагрузки $I_{нач} = 97.3 \text{ А}; 68.2 \text{ А}; 39.1 \text{ А}$ и практически постоянном значении наброса нагрузки фазы $\Delta I = 775 \text{ А}$. Исследование было проведено на компьютерной модели трехфазного двухобмоточного ПТ мощностью 630 кВА (6,3/0,4кВ).

На рис. 2 показаны зависимости (в виде поверхностей) амплитуды переходного процесса тока фазы от коэффициента мощности нагрузки $\cos\phi$ и времени начала коммутации нагрузки для рассматриваемых случаев.



а – при $\Delta I = \text{var}$; $I_{нач} = \text{const}$; б – при $\Delta I = \text{const}$; $I_{нач} = \text{var}$;

Рис. 2 – Зависимости амплитуд переходных процессов тока фазы от коэффициента мощности нагрузки $\cos\phi$ и времени коммутации нагрузки t .

Исследования на компьютерной модели показали, что при увеличении значения коэффициента мощности, время начала коммутации нагрузок, при котором амплитуда бросков тока максимальна, уменьшается. Максимальная величина возрастания тока переходного процесса при подключении, как в случае постоянства исходной нагрузки (рис. 2.а), так и в случае ее изменения (рис. 2.б), может быть представлена как сумма величин, зависящих от величины коэффициента мощности нагрузки и времени начала подключения нагрузки, что в общем случае сводится к уравнению вида:

$$I_{ф.м} = k_1 + k_2 \cdot \cos\phi + k_3 \cdot t + k_4 \cdot \cos^2\phi + k_5 \cdot t \cdot \cos\phi + k_6 \cdot t^2, \quad (1)$$

где $k_1 \dots k_6$ – коэффициенты, зависящие от параметров трансформатора и величины изменения ΔI или $I_{нач}$. Значения коэффициентов для двух случаев рисунка 2 а, б приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов уравнения (1)

Коэффициенты	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
Рис. 2.а	1733,8	-1862,2	-142350	888,8	220030	-3149000
Рис. 2.б	1837,5	-2010,7	-154070	957,9	237740	-3393600

Для снижения воздействия факторов, влияющие на надежность работы понижающих трансформаторов и дизель-генераторов, ниже предложены способы повышения надежности работы понижающих трансформаторов и питающих сетей, учитывающие время начала коммутации, состояние коммутирующих аппаратов до включения и их характеристики.

Первый способ [7] ориентирован на применение в городских ПТП, где каждому зданию выделен один отходящий фидер (ячейка, панель). На рис. 3 приведена схема, состоящая из понижающего трансформатора 1, питающей трехфазной линии 2, однофазных нагрузок 3, подключенных к шинам понижающего трансформатора 4, посредством полупроводниковых модулей 7 на IGBT транзисторах, управляющихся микроконтроллером 6, на которые поступают сигналы с датчиков тока 5, установленных на отходящих кабелях, соединяющих нагрузки с шинами понижающего трансформатора и с датчиков тока 9, установленных на шинах понижающего трансформатора и подающих сигналы на аналоговые входы микроконтроллера, выключателей 8 с приводами, подсоединяющими трансформатор к трехфазной линии 6(10) кВ.

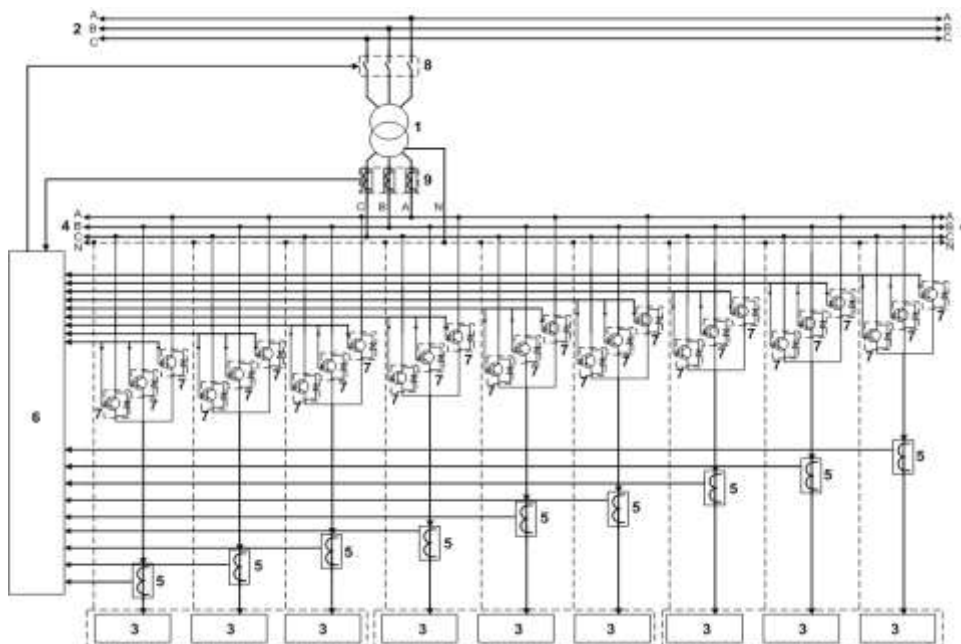


Рис. 3 – Способ повышения надежности работы понижающей трансформаторной подстанции в распределительных сетях 6(10)/0,4 кВ.

Необходимость переключения нагрузок с одной фазы на другую определяется сигналами с датчиков тока 5 и 9. Быстродействие переключения может быть обеспечено полупроводниковыми транзисторными модулями 7. При фиксировании значения нулевого тока датчиком тока 5 и необходимости переключения нагрузки, микроконтроллер посылает управляющий импульс соответствующему транзисторному модулю.

Происходит это следующим образом: датчик тока 5 фиксирует значение тока, равное нулю и посылает аналоговый сигнал микроконтроллеру 6, микроконтроллер через свои аналоговые выходы, по прошествии времени задержки сигнала равном периоду изменения тока, посылает управляющий сигнал на транзисторы модулей 7, которые отключают нагрузку от более загруженной фазы и затем, подключают ее к менее загруженной фазе через время задержки сигнала равное периоду изменения тока, при фиксировании датчиком тока 9 нулевого тока на шинах трансформатора. Положение всех транзисторов и выключателей схемы постоянно отслеживается микроконтроллером по приходящим на его аналоговые входы сигналам с датчиков тока 5. В ситуации неисправности одного из полупроводниковых модулей 7,

микроконтроллер подает сигнал блокировки замыкания транзисторов модулей других фаз при неотключении транзистора модуля какой-либо фазы. При коротком замыкании на шинах понижающего трансформатора на аналоговые входы микроконтроллера поступает сигнал значения тока на шинах, микроконтроллер в случае превышения допустимого тока с выдержкой времени посылает сигнал на отключение трансформатора от трехфазной линии 6(10) кВ выключателям 8 через свои аналоговые выходы.

Второй способ [8] эффективнее всего применять в сельских населенных пунктах, где от шин ПТ питаются отдельные дома, которые можно принять за отдельные однофазные нагрузки. На рис. 4 приведена схема включения понижающего трансформатора, между питающей линией 6 – 10 кВ, и удаленными однофазными нагрузками.

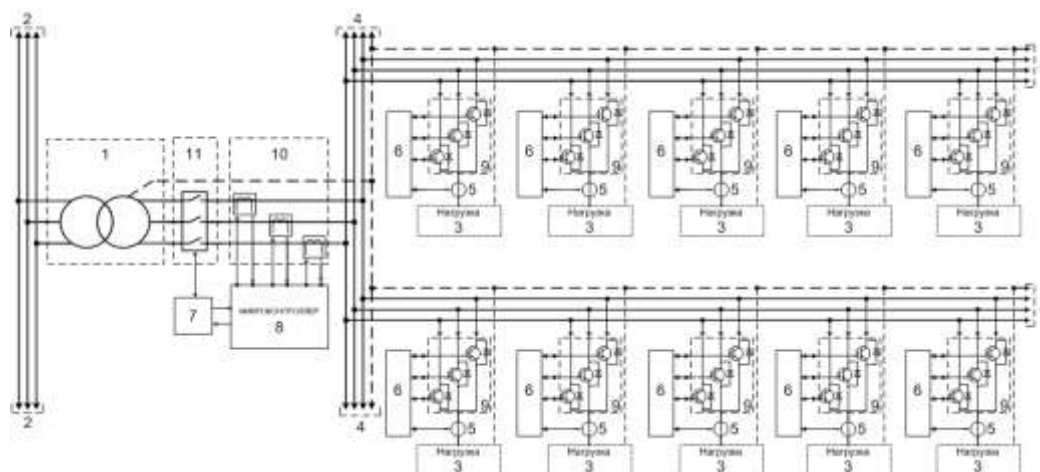


Рис. 4 – Способ повышения надежности работы системы электроснабжения.

На рисунке 4 понижающий трансформатор 1 питается от трехфазной линии 2. Удаленные однофазные нагрузки 3 подключены к трехфазной линии 0,4 кВ с нулевым проводом 4. Датчики тока 5 в цепях, соединяющих нагрузки с трехфазной линией 0,4 кВ, замеряют ток и передают данные на приемопередающие устройства 6, посылающие сигнал на приемопередающее устройство 7 микроконтроллера 8. Полупроводниковые модули, содержащие IGBT-транзисторы 9, подсоединяют нагрузку к фазам линии 0,4 кВ. Датчики тока 10, установленные на шинах 0,4 кВ трансформатора, подают токовые сигналы на аналоговые входы микроконтроллера. Выключатели 11 с приводами необходимы для подключения всех нагрузок к шинам трансформатора.

Необходимость переключения нагрузок с одной фазы на другую определяется данными с датчиков тока 5 и 10. Быстродействие переключения может быть обеспечено полупроводниковыми транзисторными модулями 9. Отключение нагрузки с более нагруженной фазы должно осуществляться в момент равенства нулю тока в кабеле, отходящем на нагрузку. Подключение нагрузки на менее нагруженную фазу должно осуществляться в момент равенства нулю тока в кабеле, отходящем на нагрузку. При фиксировании значения нулевого тока и необходимости переключения нагрузки, микроконтроллер посылает управляющий импульс соответствующему транзисторному модулю.

Происходит это следующим образом: микроконтроллер 8 с помощью приемопередающего устройства 7, посылает управляющий сигнал приемопередающим устройствам 6, управляющим ключами 9, которые сначала отключают нагрузку от

более загруженной фазы и затем, через время задержки сигнала равное периоду изменения тока, подключают ее к менее загруженной фазе. Положение всех ключей и выключателей схемы постоянно отслеживается микроконтроллером. В ситуации неисправности одного из полупроводниковых модулей 9, микроконтроллер подает сигнал блокировки замыкания ключей других фаз при неотключении ключа какой-либо фазы.

Вывод

На работу элементов электрических сетей влияет множество внешних факторов окружающей среды и характеристики нагрузки. В связи с этим, существует необходимость в создании адаптивных систем управления временем коммутации аппаратов, подключающих и отключающих нагрузку (выключателей, транзисторными модулей и т.д.). Первые шаги к созданию подобных систем предприняты в схемных решениях способов [7]-[8], которые обеспечивают снижение токов переходных процессов при включении и отключении нагрузок за счет использования модулей, содержащих IGBT-транзисторы и осуществления включения транзисторов в момент равенства нулю тока на шинах понижающего трансформатора и отключения в момент равенства нулю тока на отходящих кабелях, соединяющих нагрузки с шинами ПТ.

Список литературы:

1. *Ткачева Ю.И.* Разработка методов и технических средств по снижению потерь электроэнергии в распределительных сетях низкого напряжения. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. н., Комсомольск-на-Амуре, 2003. – С. 111-113.
2. *Гринкруг Я.С.* Управление режимами работы дизельных электростанций в автономных сетях электроснабжения. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. н., Комсомольск-на-Амуре, 2006. – С. 106-109.
3. *Митин И.А.* Повышение эффективности работы электрических сетей низкого напряжения при несимметричных режимах работы. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. н., Комсомольск-на-Амуре, 2009. – С. 103-108.
4. *Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И., Новгородов Н.А.* Повышение надежности работы трансформатора при снижении коэффициента несимметрии токов за счет рационального выбора моментов включения и отключения нагрузок // Энергосбережение, электромагнитная совместимость и качество в электрических системах: сборник статей международной научно-практической конференции. – Пенза, 2010. – С. 25-27.
5. *Новгородов Н.А., Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И.* Исследование амплитуд токов переходных процессов при подключении однофазных нагрузок к понижающему трансформатору // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: материалы шестой всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Благовещенск, 2011. – С. 200-203.
6. *Новгородов Н.А., Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И.* Исследование процессов коммутации однофазных нагрузок в распределительных сетях низкого напряжения // Применение инновационных технологий в научных исследованиях: сб. науч. ст. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. – Курск, 2011. – С. 99-104.
7. *Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И., Новгородов Н.А.* Способ повышения надежности работы понижающей трансформаторной подстанции в распределительных сетях 6(10)/0,4 кВ // Патент России № 2010139826/07. 2011. Бюл. № 30.
8. *Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И., Новгородов Н.А.* Способ повышения надежности работы системы электроснабжения // Патент России № 2010139825/07. 2011. Бюл. № 30.

А. М. Долганов¹ к.т.н., Т. Н. Иванова² к.т.н.

¹Чайковский филиал

Пермского национального исследовательского политехнического университета
кафедра автоматизации, информационных и инженерных технологий

²Удмуртский государственный университет

Россия, г. Ижевск
rsg07-8829@udm.net

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООБМЕНА НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ПЛАСТИН ПО КРОМКЕ

Исследование температуры при шлифовании пластин по кромке позволило установить закономерности распространения тепла с учетом охлаждения и определить влияние коэффициента теплообмена на температурное поле.

Ключевые слова: шлифование, пластина, кромка, теплообмен.

При шлифовании пластин с областью клина наличие второй (кроме шлифуемой) свободной поверхности, омываемой смазочно-охлаждающей жидкостью, может существенным образом повлиять на распределение температуры в области наибольшего нагрева, т.е. вблизи ребра клина.

Рассмотрим процесс шлифования пластин по кромке с областью клина, удовлетворяющей условиям задачи [1], с тем изменением, что шлифование идет с принудительным охлаждением и на всех свободных поверхностях осуществляется теплообмен. Математически такая задача сводится к решению дифференциального уравнения теплопроводности, представленного в декартовых координатах с граничными условиями

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\substack{x=0 \\ |z|<h}} = q = \text{const}, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\substack{x=0 \\ |z|>h}} + \alpha T \Big|_{\substack{x=0 \\ |z|>h}} = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} + \alpha T \Big|_{y=0} = 0, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплообмена.

Если ввести обозначения комплексов:

$$\theta = \frac{\pi \lambda \nu T}{2qa}, \quad \beta = \frac{2\alpha a}{\lambda \nu}, \quad X = \frac{\nu x}{2a}, \quad Y = \frac{\nu y}{2a}, \quad Z = \frac{\nu z}{2a}, \quad H = \frac{\nu h}{2a} \quad (2)$$

то перейдем к безразмерному виду

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} + 2 \frac{\partial \theta}{\partial Z} = 0 \quad (3)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{\substack{X=0 \\ |X|<H}} = \pi, \quad -\frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{\substack{X=0 \\ |X|>H}} + \beta \theta \Big|_{\substack{X=0 \\ |X|>H}} = 0, \quad -\frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0} + \beta \theta \Big|_{Y=0} = 0 \quad (4)$$

Фундаментальное решение (1 - 4) будет выглядеть следующим образом:

$$\theta = K(\beta, H) \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(-\xi) K_0(\sqrt{X^2 + \xi^2}) d\xi - \beta \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(\beta X - \xi) K_0 \times$$

$$\times \left(\sqrt{X^2 + \xi^2} \right) dX d\xi - \int_{Z-H}^{Z+H} \int_0^\infty \left\{ \beta \exp \beta Y \int_Y^\infty \left[\frac{2}{R'} \exp(-(\xi + R)) - 2\beta \exp(\beta X - \xi) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \int_X^\infty \frac{dX}{R'} \exp(-(\beta X + R')) \right] dY \right\} dY d\xi. \quad (5)$$

$$\text{где } \xi = (Y - Y') + \sqrt{X^2 + (Y - Y')^2 + Z^2}$$

Первый интеграл этого выражения описывает температурное поле на поверхности клина без теплообмена. Второй - характеризует теплообмен только на той грани клина, по которой движется источник. Третий - отражает вклад, который вносится теплообменом свободной поверхности.

Анализ выражения (5) показывает, что при удалении от ребра клина влияние теплообмена быстро уменьшается.

Окончательное общее решение по расчету температуры на ребре с учетом действия охлаждающей жидкости можно представить в виде зависимости

$$T_n = \frac{2qa}{\pi\lambda \cdot V_u} M\left(\frac{V_u r}{2a}, \alpha, \beta_z\right) B(\beta, \chi) \cdot \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(\xi) K_0 \cdot \left(\sqrt{\rho^2 \sin^2 \beta_z + \xi^2} \right) d\xi. \quad (6)$$

Таким образом, в результате выполненных исследований получено решение задачи о температурном поле при шлифовании пластин по кромке с учетом действия охлаждающей жидкости. Для обеспечения гарантированного теплообмена при шлифовании необходимо учитывать коэффициент теплообмена.

Теплообмен между потоком жидкости и обрабатываемой поверхностью прямопропорционален коэффициенту теплоотдачи α , площади контакта F и температурному напору между температурой обрабатываемой поверхности T_n и температурой жидкости $T_{жс}$. В основу рассматриваемой связи положен закон Ньютона

$$Q = \alpha(T_n - T_{жс})F \quad \text{или} \quad \alpha = \frac{Q}{(T_n - T_{жс})F} \quad (7, a)$$

С другой стороны, из уравнения теплоотдачи Фурье

$$\alpha = - \frac{\lambda}{T_n - T_{жс}} \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n=0} \quad (7, б)$$

где n – нормаль к обрабатываемой поверхности

Следовательно, *коэффициент теплообмена* – это количество тепла, переданное от текущей среды к обрабатываемой поверхности или, наоборот, от обрабатываемой поверхности к текущей среде, через единицу обрабатываемой поверхности, отнесенное к разности температур между обрабатываемой поверхностью и средой.

В общем случае α зависит от геометрических размеров, формы и температуры поверхности теплообмена, гидродинамики, режима движения, скорости, температуры и физических свойств жидкости. Главное влияние на интенсивность теплообмена оказывает скорость потока и режим течения охлаждающей жидкости. Чем выше скорость течения охлаждающей жидкости, тем выше значение коэффициента теплообмена.

Распределение температуры в зоне контакта шлифовальный круг – обрабатываемая деталь – смазочно-охлаждающая жидкость T будет:

$$\frac{T_n - T}{T_n - T_{жс}} = c \int_0^{\eta_1} \exp \left(- \text{Pr} \int_0^{\eta_1} f_1 d\eta_1 \right) d\eta_1. \quad (8)$$

где значение константы $c(\text{Pr}, \beta_z) = 0,56(\beta_z + 0,2)^{0,1} \text{Pr}^{0,333+0,067\beta_z-0,026\beta_z^2}$,

$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}$ – число Прандтля, которое характеризует теплофизические

свойства смазочно-охлаждающей жидкости: ν – коэффициент кинематической вязкости; a – коэффициент температуропроводности; c_p – удельная изобарная теплоемкость; μ – динамическая вязкость, β_z – угол раствора клина.

Подставляя различные значения Pr и β_z можно определить распределение температуры в пограничном слое, которое представлено графически (рис. 1).

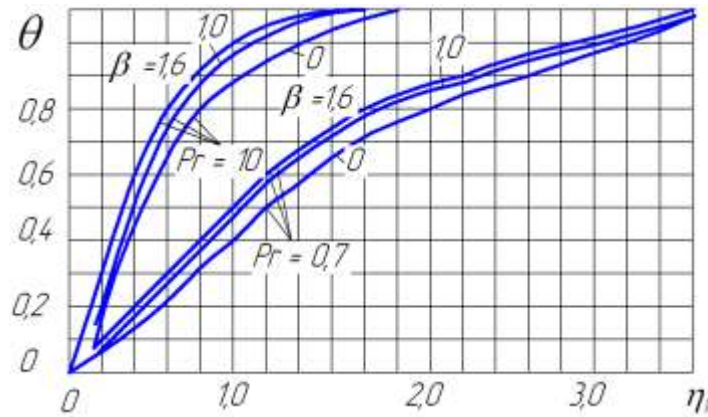


Рис. 1 - Распределение температуры в тепловом пограничном слое клиновидных тел при различных значениях Pr и β_z .

Используя критерий Нуссельта в безразмерной форме

$$Nu = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda} = \frac{c_2}{\sqrt{2 - \beta}} \sqrt{Re} \quad (9)$$

$$\text{или} \quad Nu = 0,56 \frac{(\beta_z + 0,2)^{0,1}}{\sqrt{2 - \beta_z}} Re^{0,5} Pr^{0,333+0,067\beta_z-0,026\beta_z^2} \quad (10)$$

и градиент температуры на поверхности, из уравнения (7, б) находим коэффициент теплообмена

$$\alpha = \frac{\lambda}{\sqrt{2 - \beta_z}} \sqrt{\frac{\nu_x}{\nu \cdot x}} c_2 = \frac{\lambda \cdot 0,56 (\beta_z + 0,2)^{0,1} Pr^{0,333+0,067\beta_z-0,026\beta_z^2}}{\sqrt{2 - \beta_z}} \sqrt{\frac{\nu_x}{\nu \cdot x}}, \quad (11)$$

где x – линейный размер обрабатываемой поверхности.

Уравнение (11) дает динамику изменения коэффициента теплообмена на поверхности клиновидных тел в зависимости от угла клина β_z .

Исследования влияния теплообмена на температурное поле при шлифовании на поверхности клина позволили сделать следующие выводы:

1. Наиболее важным элементом, влияющим на коэффициент теплообмена, является угол клина β_z . С увеличением угла клина β_z коэффициент теплообмена увеличивается.

2. Из условия обеспечения гарантированного теплообмена угол клина должен быть не менее 7° и не более $114,65^\circ$.

3. Теплофизические свойства смазочно-охлаждающей жидкости влияют на коэффициент теплообмена не однозначно. С увеличением коэффициента теплопроводности λ коэффициент теплообмена α прямопропорционально увеличивается. Коэффициент теплообмена резко снижается с увеличением кинематической вязкости жидкости ν и коэффициента температуропроводности a .

4. Распределение температуры в пограничном слое зависит от числа Прандтля Pr и угла клина β_2 . С их увеличением температура в зоне контакта шлифовальный круг – обрабатываемая клиновидная поверхность – смазочно-охлаждающая жидкость увеличивается.

Список литературы:

1. Долганов А.М., Иванова Т.Н., Паклина А.А., Рахмангулова Э.И. Исследование тепловых процессов в области клина при шлифовании пластин по кромке. Научно-технический вестник Поволжья. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2012. – вып. № 1 2012. – С. 157-160.

А. А. Захаров д.т.н., Е. Р. Кожанова

Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина
факультет электронной техники и приборостроения
кафедра электронные приборы и устройства
Россия, г. Саратов
zaharov@sstu.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТДЕЛЬНОГО КОЛЬЦЕВОГО МАГНИТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ- ФУНКЦИИ ГАУССАВТОРОГО ПОРЯДКА

В статье рассматривается построение математической модели продольного распределения магнитного поля отдельного кольцевого магнита с использованием вейвлет – функции Гаусса 2-го порядка.

Ключевые слова: магнитное поле, продольное распределение магнитного поля, математическая модель, вейвлет – функция Гаусса 2-го порядка, аппроксимация.

Одним из важных элементов СВЧ-устройств О-типа, в первую очередь в лампах бегущей волны (ЛБВ), является магнитная периодическая фокусирующая система (МПФС). Основной задачей МПФС является качественная фокусировка электронного потока, которая формируется под действием продольного распределения магнитного поля МПФС. МПФС представляет собой набор постоянных магнитов (рис. 1б-в), разделенных полюсными наконечниками (рис. 1а).

Анализ возможности получения аппроксимирующей функции МПФС является отдельной задачей. В рамках данной работы остановимся на вопросе, связанном с аппроксимацией поля отдельного магнита.

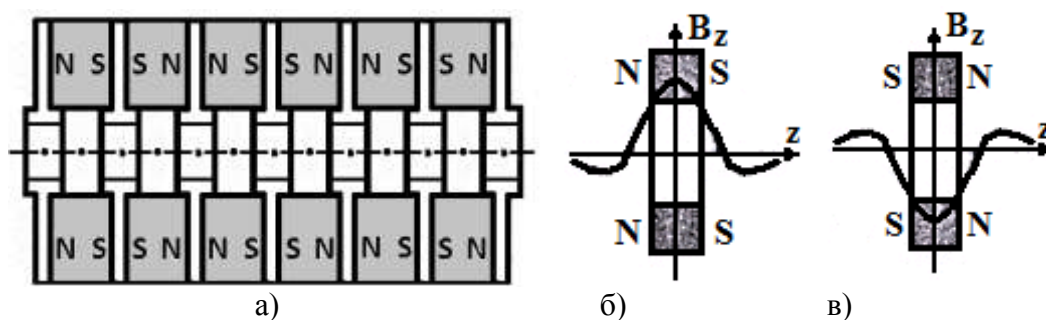


Рис. 1. – Внешний вид МПФС (а) и составляющие ее магниты с различной намагниченностью (б-в).

Продольное распределение магнитного поля отдельного кольцевого магнита (рис. 1в), входящего в состав МПФС [2, 4], описывается:

$$B_z = \frac{M}{2} \left[\frac{2z + L}{\sqrt{D^2 + (2z + L)^2}} - \frac{2z - L}{\sqrt{D^2 + (2z - L)^2}} - \frac{2z + L}{\sqrt{d^2 + (2z + L)^2}} + \frac{2z - L}{\sqrt{d^2 + (2z + L)^2}} \right], \quad (1)$$

где D , d и L - наружный, внутренний диаметр и толщина магнита, M - намагниченность, а $z=0$ совпадает с геометрическим центром магнита

Для анализа формирования амплитуды и вида распределения магнитного поля $B_z(z)$ (1) через его составляющие (слагаемые) была создана авторами программа «Анализ слагаемых продольного магнитного распределения», которая позволяет получить информацию для дальнейшего численного расчета. Графики слагаемых выражения (1) представлены на рис. 2.

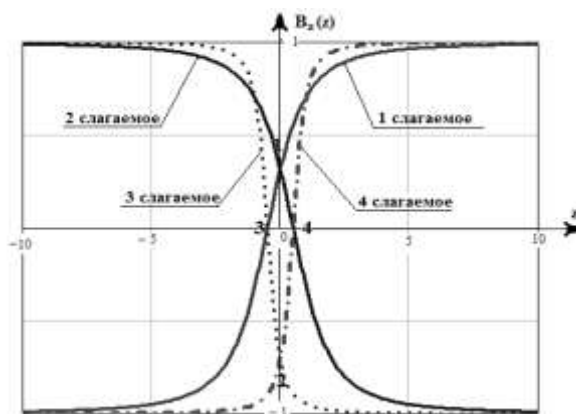


Рис. 2. – Графики слагаемых продольного распределения магнитного поля (1).

Программа позволяет определить следующие данные, которые используются для аппроксимации данного распределения:

1) *расстояние между точками 3 и 4* равно толщине магнита L , а половина данного расстояния используется для численного нахождения точки пересечения с осью Oz .

$$S_{34} = L / 2 + | -L / 2 | = L . \quad (2)$$

2) *расстояние между точками 1 и 2* формирует амплитуду распределения при $z=0$ и равна сумма ординат всех четырех слагаемых [4]:

$$A_0 = 2 \cdot S_{12} = 2 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{D^2 + L^2}} + \frac{-L}{\sqrt{d^2 + L^2}} \right). \quad (3)$$

3) *точки пересечения с осью Oz .*

4) *точки максимума и минимума.*

Сопоставление распределения продольной составляющей магнитного поля и вейвлет-функции 2-го порядка (рис. 2) показывает внешнюю схожесть продольного распределения магнитного поля (1) с ψ – функцией вейвлета Гаусса 2-го порядка. Следовательно, необходимо определить параметры вейвлет-функций, при которых это совпадение будет максимальным для различных параметров отдельных магнитов. Для этого следует сопоставить выбранные точки распределения B_z (рис. 3) и соответствующие точки вейвлет-функции.

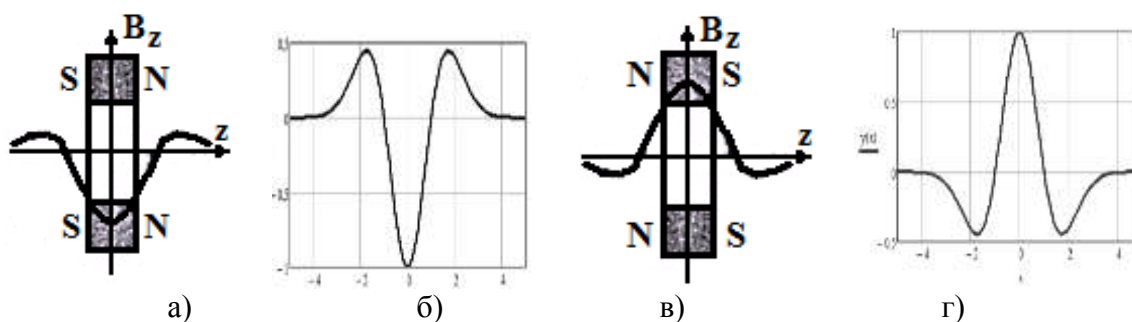


Рис. 3. - Распределения магнитного поля $B_z(z)$ магнитов с продольной намагниченностью противоположного направления (а, в) и близкие им по виду ψ -функции вейвлета Гаусса 2-го порядка (г) и обратная ей функция (в).

Аналитическая запись ψ -функции вейвлета Гаусса 2-го порядка с учетом коэффициента сжатия / растяжения k :

$$y(x) = (1 - (kx)^2) \cdot \exp(-(kx)^2/2) \quad (4)$$

$$y(x) = - (1 - (kx)^2) \cdot \exp(-(kx)^2/2) \quad (5)$$

Для функции (4) (рис. 3г): точка максимума $x_{\max}=0$, $y_{\max}(x)=1$; точки минимума $x_{\min}=\pm\sqrt{3}/k$, $y_{\min}(x)=-0,446$. Для функции (5) (рис. 3б): точка минимума $x_{\max}=0$, $y_{\max}(x)=-1$; точки максимума $x_{\min}=\pm\sqrt{3}/k$, $y_{\min}(x)=-0,446$. Обоснование целесообразности использования выбранной вейвлет-функции доказывается адекватностью основных свойств вейвлетов [1, 3] применительно к исследуемому распределению (1): ограниченность, локализация, автомодельность и нулевое среднее. Отдельного доказательства первых трех признаков не требуется из-за их очевидности, и как показали расчеты выполнение последнего признака справедливо для реальных значений параметров магнита. Исходя из вышеизложенного и анализа графиков продольного распределения магнитного поля и ψ -функции вейвлета Гаусса 2-го порядка (рис. 3), следует выделить три характерных точки для построения математической модели (рис. 4) и по двум из них (точка 1 и 3) оценивать точность аппроксимации распределения выбранной вейвлет-функцией.

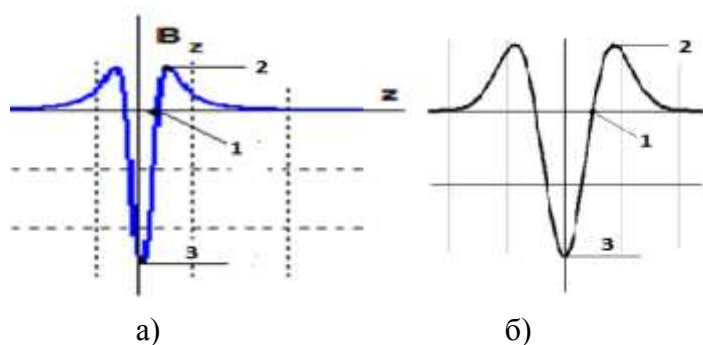


Рис. 4. - Характерные точки для аппроксимации продольного распределения магнитного поля кольцевого магнита (а) и вейвлета (б).

Точка 1. Координата точки - $(z_1, 0)$, характеризующая сжатие/растяжение распределения. Коэффициент масштабирования:

$$KM = 1/z_1 \quad (6)$$

Точка 2. Точка максимума с координатами $(\pm z_2, B_2)$.

3 точка. Точка минимума вычисляется по формуле (3) и соответствуют координатам $(0, B_3)$. Для вычисления масштабирующего коэффициента:

$$MK = |B_3| - B_2 / 2 \quad (7)$$

Исходя из полученных значений (6-7), запишем полученную математическую модель продольного распределения (1):

$$y1(z) = \pm MK \cdot (1 - KM^2 \cdot z^2) \cdot \exp(-KM^2 \cdot z^2 / 2) \cdot (1 + 0,1/d) \quad (8)$$

Построим математическую модель, вычисленную по формуле (8) (рис. 5, пунктирная линия) для продольного распределения магнитного поля отдельного магнита (рис. 5, сплошная линия) с различными геометрическими параметрами и значениями намагниченности.

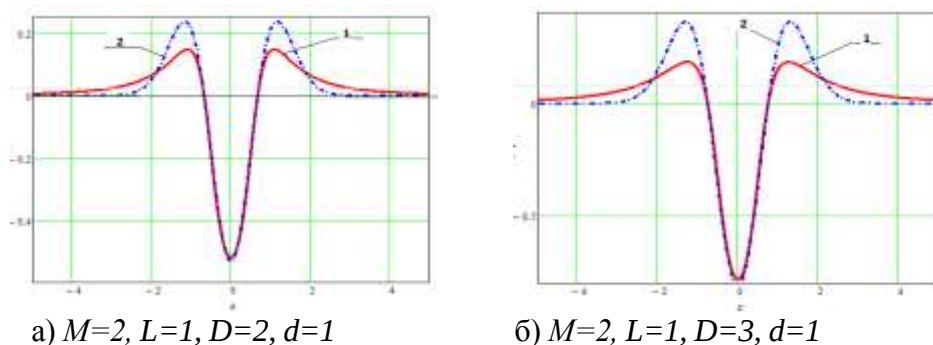


Рис. 5. - Продольное распределение магнитного поля магнита и вычисленная математическая модель по выражению (8): 1-продольное распределение, 2-математическая модель.

Вычисленная ошибка аппроксимации 0,00235 при $M=2, L=1, D=2, d=1$ (рис. 5а) и 0,00386 при $M=2, L=1, D=3, d=1$ (рис. 5 б) позволяет говорить о точности построенной модели.

Построенная математическая модель продольного распределения магнитного поля отдельного кольцевого магнита (8) достаточно точно описывает данное распределение (большая часть полностью совпадает) и позволяет построить математическую модель продольного распределения магнитного поля магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС), учитывая реальный механизм ее формирования, то есть при последовательном сложении вейвлет-функций, распределенных по оси системы с соответствующим сдвигом.

Список литературы:

1. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1999. Т.166. С. 1145-1170.
2. Мельников Ю.А. Постоянные магниты электровакуумные СВЧ приборов. М.: изд-во «Советское радио», 1967. 183 с.
3. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2008. 304 с.
4. Царев В.А., Спиридонов Р.В. Магнитные фокусирующие системы электровакуумных микроволновых приборов О-типа: учебное пособие. Саратов: изд-во «Новый ветер», 2010. 352 с.

**М. В. Зильберман¹ д.х.н., Е. А. Пичугин¹, Н. Б. Ходяшев² д.х.н., М. В. Черепанов¹,
Б. Е. Шенфельд¹ д.т.н.**

¹«Уральский государственный научно-исследовательский институт региональных
экологических проблем» (ФГБУ УралНИИ «Экология»)

Россия, г. Пермь
adm@ecology.perm.ru

²«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
(ГОУ ВПО «ПНИПУ»)

Россия, г. Пермь
vvv@purec.pstu.ac.ru

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОСТАВА БУРОВЫХ ШЛАМОВ НА КЛАСС ОПАСНОСТИ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Разработка нефтяных и газовых месторождений связана с образованием большого количества буровых шламов, представляющих собой отходы бурения и оказывающих значительное негативное воздействие на окружающую среду. Состав буровых шламов, образующихся при выделении измельченной горной породы из буровых растворов, весьма разнороден и зависит от геологических условий, технологического оформления процесса очистки бурового раствора, а также от стадии бурения, которой соответствует отход. В работе представлены результаты изучения влияния химического состава твердой фазы и водной вытяжки образцов буровых шламов на класс опасности для окружающей природной среды.

Ключевые слова: буровой шлам, минерализация, биотестирование, класс опасности.

Большое многообразие вариантов обращения с буровыми шламами [1-10] сводится по сути дела к депонированию отходов или их использованию для производства той или иной продукции, чаще всего, строительных материалов. И в том, и в другом случае возникает вопрос об экологических рисках, связанных с воздействием на окружающую среду отходов бурения или продукции, полученной с использованием этих отходов. Существенное влияние на экологические риски оказывают состав и свойства буровых шламов, которые в значительной степени определяются характеристиками выбуренной горной породы и используемых буровых растворов.

Нефтяные и газовые месторождения состоят из осадочных пород, которые представляют собой механические и химические продукты разрушения метаморфических и изверженных пород, содержащих продукты жизнедеятельности организмов. К этим породам относятся мономинеральные (каменная соль, гипс, ангидрид, известняки, доломиты и др.) и полиминеральные (конгломераты, глины, песчаники и др.) породы.

Горные породы в основном характеризуются неоднородностью минералогического и механического составов, ориентации зерен в массе, пористости, степени уплотнения и трещиноватости [11].

Условия залегания нефти и газа в пласте и физические свойства пластовых жидкостей являются важными исходными данными при разработке и эксплуатации

месторождения. Основные физические свойства пород и жидкостей согласно [12] следующие: гранулометрический состав пород, пористость пласта, проницаемость пород коллектора, удельная поверхность пород пласта, содержание карбонатов, механические свойства пород и сжимаемость пластовых жидкостей, насыщенность пород газом, нефтью и водой и их физические и физико-химические свойства.

Характеристика пород и пластовых флюидов, слагающих разрез, во многом обуславливают выбор породоразрушающего инструмента, бурового раствора и т.д. [12].

В ходе бурения буровые растворы выполняют широкий спектр функций, среди которых, согласно [13], охлаждение и смазывание породоразрушающего инструмента, удержание частиц выбуренной породы во взвешенном состоянии и удаление их из скважины, сохранение проницаемости продуктивных горизонтов, предохранение бурильного инструмента и оборудования от коррозии и абразивного износа и др. В практике бурения в качестве буровых растворов чаще всего используются глинистые водные дисперсные системы [13]. Для оптимизации характеристик буровых растворов применительно к конкретным геологическим условиям в них добавляют определенные реагенты [12], назначение которых состоит в регулировании таких характеристик, как обеспечение стабильности дисперсной фазы, снижение коэффициента трения, пеногашение и т.п.

В зависимости от состава и свойств буровых шламов эти отходы по классу опасности для окружающей природной среды соответствуют, как правило, III, IV или V классу опасности [14].

Целью настоящей работы является определение требований к буровым шламам, используемым для изготовления строительных дорожных смесей, обеспечивающих минимальное воздействие указанной продукции на окружающую среду.

Характеристика буровых шламов, как объекта непосредственного воздействия на окружающую среду при их размещении или опосредованного воздействия в составе строительных дорожных смесей, осуществлялась нами с использованием методов химического анализа и биотестирования. В принципе оба эти метода направлены на определение класса опасности отхода, при этом данные химического анализа используются для определения класса опасности расчетным методом, а результаты биотестирования – для прямого определения этой характеристики.

Химический анализ, в ходе которого определялся брутто-состав отхода, производили путем растворения пробы с последующим определением содержания порообразующих компонентов: оксидов кремния, алюминия, натрия, калия, кальция и магния, а также тяжелых металлов [15]. Содержание нефтепродуктов в пробе определяли по методике [16].

Проба отхода характеризовалась также составом водной вытяжки. Эта характеристика представляется весьма важной, поскольку процедура биотестирования предусматривает воздействие на биотест не самого отхода, а водной вытяжки из него. Водные вытяжки из отходов бурения анализировали на компоненты анионного и катионного состава и величину pH [17, 18].

Рентгенофазовый анализ производился на рентгеновском дифрактометре XRD–7000 фирмы «Shimadzu». Определение фазового состава анализируемых образцов проводился с использованием базы данных «ICDD PDF-2 Release 2008».

Биотестирование образцов производилось с использованием низших ракообразных *Daphnia magna* Straus и зеленых протококковых водорослей *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Bred.

Состав твердой фазы исследованных образцов буровых шламов, отобранных на Самотлорском нефтяном месторождении, приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав твердой фазы исследованных образцов буровых шламов

Наименование показателя состава	Ед. изм.	Обозначения образцов ¹								
		52-1	52-2	59Е-1	59Е-2	95-1	95-2	1098-2	1098-3	1098-4
Потери при прокаливании	%	12.4	11.1	18.4	12.4	19.5	12.4	9.5	11.5	12.1
Оксид кремния	%	54	54.3	48.6	53.7	43.8	53.9	55.4	54.3	53.1
Оксид алюминия	%	9.71	8.94	10.19	11.31	10.06	11.31	12.45	11.28	12.75
Оксид кальция	%	8.45	9.21	6.91	4.85	8.48	6.11	4.65	6.61	5.65
Оксид магния	%	1.35	1.64	1.23	1.36	1.47	1.41	1.55	1.38	1.44
Оксид натрия	%	2.36	2.22	2.56	2.48	2.97	2.48	2.24	2.34	2.36
Оксид калия	%	1.9	1.76	5.34	4.66	4.26	1.62	1.87	1.68	1.73
медь	мг/кг	44.19	47.48	22.9	19.83	24.3	31.9	27.1	44	28.1
никель	мг/кг	24.16	27.53	23.14	24.12	21.6	21.5	25.7	24	25.6
хром	мг/кг	70.57	58.43	52.12	51.7	56.6	66.3	60.6	68.5	71.1
железо	%	3.71	2.8	2.46	2.88	2.61	3.15	3.19	3.28	3.63
марганец	мг/кг	645	494	357	742	353	507	503	680	569
цинк	мг/кг	62.4	161	53.4	50	51.2	56.6	58.3	65.1	48.4
барий	мг/кг	734	784	373	367	305	987	990	890	581
нефтепродукты	мг/кг	3310	2050	8610	5520	8500	7080	3125	4240	2550

Как видно из таблицы 1, основным компонентом образцов буровых шламов является оксид кремния. Согласно данным рентгенофазового анализа, во всех образцах присутствуют кристаллические фазы кварца (SiO_2) и кальцита (CaCO_3).

Для того, чтобы проанализировать взаимосвязь между отдельными показателями состава буровых шламов, нами вычислена корреляционная матрица, в которой представлены коэффициенты корреляции между отдельными показателями состава (таблица 2).

Не останавливаясь подробно на анализе корреляционной матрицы, отметим некоторые наиболее важные с нашей точки зрения моменты.

Во-первых, наблюдается сильно выраженная отрицательная корреляция между потерями при прокаливании и содержанием оксида кремния. Потери при прокаливании характеризуют количество карбонатов в исследуемом образце, и естественно ожидать, что обогащение образца карбонатами сопровождается его обеднением остальными компонентами (силикатами и алюмосиликатами).

Таблица 2 – Корреляционная матрица показателей химического состава твердой фазы буровых шламов

Потери при прокаливании	Нефтепродукты	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	Cu	Ni	Cr	Fe	Mn	Zn	Ba

¹ При обозначении образцов использованы данные протокола отбора проб. При этом указан номер куста (первая группа знаков) и номер пробы (последняя цифра).

Потери при прокаливании	1.000	0.836	-0.959	-0.381	0.371	-0.454	0.889	0.762	-0.452	-0.634	-0.466	-0.634	-0.656	-0.299	-0.766
Нефтепродукты	0.836	1.000	-0.753	-0.170	0.028	-0.559	0.832	0.730	-0.584	-0.869	-0.514	-0.663	-0.522	-0.472	-0.516
SiO ₂	-0.959	-0.753	1.000	0.321	-0.384	0.234	-0.931	-0.674	0.449	0.575	0.432	0.608	0.688	0.262	0.738
Al ₂ O ₃	-0.381	-0.170	0.321	1.000	-0.890	-0.050	-0.204	-0.227	-0.450	0.008	0.299	0.424	0.272	-0.600	0.233
CaO	0.371	0.028	-0.384	-0.890	1.000	0.196	0.228	-0.032	0.587	0.027	0.037	-0.187	-0.352	0.581	-0.146
MgO	-0.454	-0.559	0.234	-0.050	0.196	1.000	-0.304	-0.529	0.345	0.574	0.075	0.042	-0.106	0.661	0.404
Na ₂ O	0.889	0.832	-0.931	-0.204	0.228	-0.304	1.000	0.650	-0.531	-0.774	-0.383	-0.518	-0.498	-0.435	-0.687
K ₂ O	0.762	0.730	-0.674	-0.227	-0.032	-0.529	0.650	1.000	-0.700	-0.402	-0.829	-0.745	-0.319	-0.324	-0.861
Cu	-0.452	-0.584	0.449	-0.450	0.587	0.345	-0.531	-0.700	1.000	0.412	0.562	0.413	0.265	0.659	0.583
Ni	-0.634	-0.869	0.575	0.008	0.027	0.574	-0.774	-0.402	0.412	1.000	0.090	0.245	0.262	0.648	0.264
Cr	-0.466	-0.514	0.432	0.299	0.037	0.075	-0.383	-0.829	0.562	0.090	1.000	0.899	0.351	-0.089	0.586
Fe	-0.634	-0.663	0.608	0.424	-0.187	0.042	-0.518	-0.745	0.413	0.245	0.899	1.000	0.598	-0.182	0.511
Mn	-0.656	-0.522	0.688	0.272	-0.352	-0.106	-0.498	-0.319	0.265	0.262	0.351	0.598	1.000	-0.077	0.235
Zn	-0.299	-0.472	0.262	-0.600	0.581	0.661	-0.435	-0.324	0.659	0.648	-0.089	-0.182	-0.077	1.000	0.266
Ba	-0.766	-0.516	0.738	0.233	-0.146	0.404	-0.687	-0.861	0.583	0.264	0.586	0.511	0.235	0.266	1.000

Во-вторых, имеется ярко выраженная положительная корреляция между потерями при прокаливании и содержанием нефтепродуктов в образце. Это, возможно, объясняется тем, что нефтяные проявления приурочены к известняковым отложениям.

В-третьих, наблюдаются положительные корреляции между содержанием нефтепродуктов и содержанием натрия и калия. Это является вполне ожидаемым и объяснимым, поскольку нефтепроявления приурочены к наиболее глубоким горизонтам, а солесодержание пластовых вод обычно увеличивается с глубиной.

С точки зрения оценки уровня негативного воздействия на окружающую природную среду буровых шламов и продуктов, изготовленных с их применением, весьма существенным является не только состав твердой фазы бурового шлама, но и характеристики водной фазы, находящейся в контакте с этими буровыми шламами или соответствующей продукцией.

Характеристики химического состава водной вытяжки из образцов буровых шламов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Состав водной вытяжки исследованных образцов буровых шламов

Наименование показателя состава	Ед. изм.	52-1	52-2	59Е-1	59Е-2	95-1	95-2	1098-2	1098-3	1098-4
рН	ед. рН	9.32	10.53	7.61	7.94	7.80	9.28	9.10	9.50	9.82
Хлориды	мг/кг	175	577	41988	24908	33240	750	343	338	230
Сульфаты	мг/кг	166	1555	295	120	95	3345	262	400	184
Гидрокарбонаты	мг/кг	592	634	1305	1025	1183	1647	1050	1232	1513
Карбонаты	мг/кг	132	660	н/обн	н/обн	н/обн	240	132	216	396
Кальций	мг/кг	79	194	1038	511	673	136	104	77	147
Магний	мг/кг	18	10	37	22	29	25	24	17	34
Калий	мг/кг	50	145	31540	19070	32010	89	63	50	42
Натрий	мг/кг	792	1384	5273	3066	4405	1310	740	800	780

Как видно из таблицы 3, основные различия состава водной вытяжки отдельных образцов заключаются в их минерализации, определяемой как сумма содержания солей, и величине рН. При этом образцы 59Е-1, 59Е-2 и 95-1 существенно отличаются от всех остальных образцов по содержанию хлоридов, калия, натрия и кальция. Это связано, скорее всего, с различием состава исходного бурового раствора. Согласно [19], для обеспечения стабильности дисперсной фазы в буровой раствор может вводиться хлорид калия, который и является основным компонентом солевого фона для вышеперечисленных образцов.

Во всех образцах обнаружено присутствие ионов, соответствующих различным формам угольной кислоты (карбонатов и гидрокарбонатов). Это результат вполне согласуется с тем фактом, что в исследованных образцах обнаружена кристаллическая фаза кальцита, который при контакте с водой частично растворяется с образованием ионов кальция и карбонат-ионов. При этом карбонат-ионы в результате гидролиза превращаются в гидрокарбонаты.

Отметим также, что образцы 59-1, 59Е-2 и 95-1, наряду с высокой минерализацией, имеют относительно низкие значения рН ($\text{pH} < 8$). По этой причине содержание карбонат-ионов в водных вытяжках этих образцов оказывается ниже предела обнаружения.

Статистические характеристики показателей химического состава водной вытяжки для исследованных образцов бурового шлама приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Статистические характеристики показателей химического состава водной вытяжки

Наименование показателя состава	Ед. изм.	Среднее	Стандартное отклонение	Максимум	Минимум
рН	ед. рН	8.99	1.00	10.53	7.61
Хлориды	мг/кг	11394	17033	41988	175
Сульфаты	мг/кг	714	1085	3345	95
Гидрокарбонаты	мг/кг	1131	355	1647	592
Карбонаты	мг/кг	296	203	660	132
Кальций	мг/кг	329	339	1038	77
Магний	мг/кг	24.0	8.4	36.6	10.2
Калий	мг/кг	9229	14215	32010	42
Натрий	мг/кг	2061	1748	5273	740

Как видно из таблицы 4, содержание ионов, составляющих солевой фон водной вытяжки, меняется в весьма широких пределах, что, как будет показано ниже, оказывает существенное влияние на оценку класса опасности буровых шламов.

Результаты определения класса опасности исследованных образцов буровых шламов, выполненного расчетным методом согласно [20] и экспериментальным методом по методикам [21, 22], представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Класс опасности и показатели состава исследованных образцов буровых шламов

Образец	Класс опасности		Нефтепродукты (мг/кг)	Минерализация (мг/кг)	рН
	Расчетный метод	Экспериментальный метод			
1098-2	V	V	3125	2718	9.10
1098-3	V	V	4240	3130	9.50
1098-4	V	V	2550	3326	9.82
52-1	V	V	3310	2004	9.32
52-2	V	V	2050	5159	10.53
95-2	V	V	7080	7542	9.28
59Е-1	IV	IV	8610	81476	7.61
59Е-2	IV	IV	5520	48722	7.94
95-1	IV	IV	8500	71635	7.80
Максимальное для V класса опасности			7080	7542	10,53
Минимальное для IV класса опасности			5520	48722	7,61

Как видно из таблицы 5, результаты расчетов класса опасности и результаты экспериментального определения для исследованной серии буровых шламов полностью совпадают между собой.

Отметим, что образцы, соответствующие IV классу опасности, характеризуются повышенной, по сравнению с образцами V класса опасности, минерализацией и более низким значением рН водной вытяжки. Содержание нефтепродуктов в обеих группах образцов перекрывается.

Исходя из полученных данных, наиболее вероятной причиной различия класса опасности для окружающей природной среды образцов буровых шламов представляется различие их минерализации. Грубой оценкой положения границы, разделяющей отходы V и IV класса опасности, является интервал минерализации от 7540 до 48720 мг/кг.

При проведении биотестирования с использованием *Daphnia magna* Straus в зависимости от разбавления водной вытяжки все дафнии либо выживали, либо погибали. При проведении биотестирования с использованием *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Bred наблюдалась зависимость числа колоний от свойств исследуемого образца. Этот факт был использован для уточнения положения границы, разделяющей IV и V классы опасности. При этом результат биотестирования представлен в виде отношения числа колоний водорослей в соответствующем образце к этой величине в контрольном эксперименте, то есть в эксперименте, в котором вместо водной вытяжки из образца используется дистиллированная вода. Зависимость данной величины от минерализации (сумма содержания солей) в виде логнормального распределения изображена на рисунке 1.

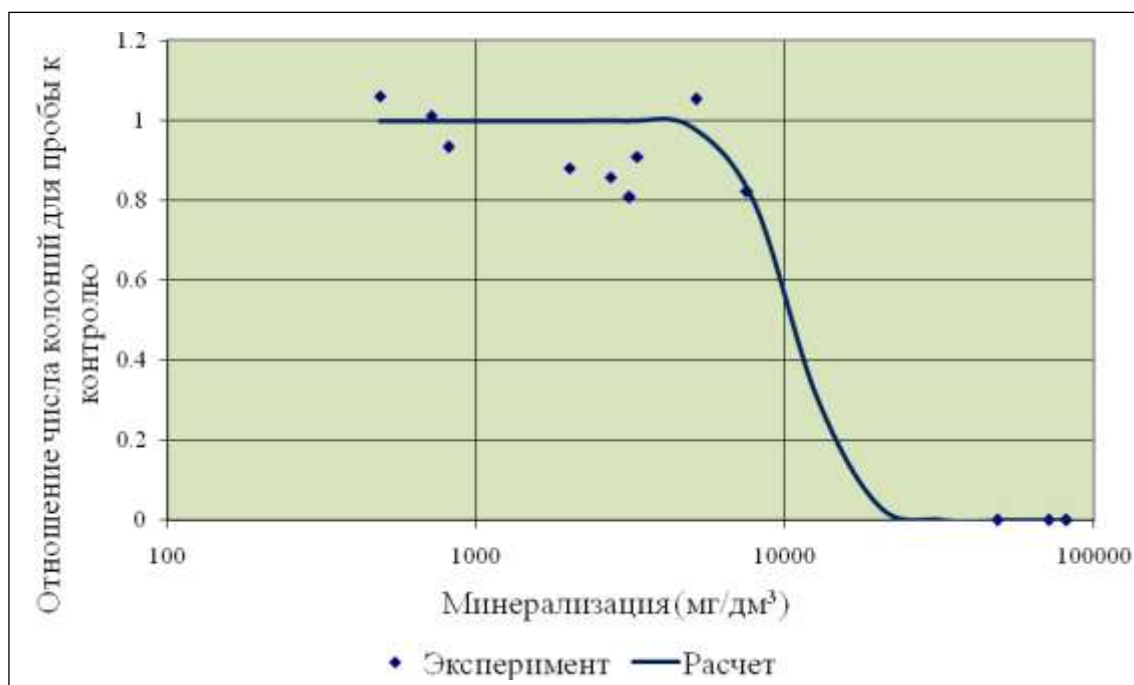


Рис. 1 – Результаты биотестирования в зависимости от минерализации образцов бурового шлама.

Согласно полученным данным, минерализация образца, при котором сокращение числа колоний не превышает 15% от исходного значения, составляет 7915 мг/кг, что достаточно близко к максимальному значению для V класса опасности, приведенному в таблице 5 (7542 мг/кг).

Список литературы:

1. Булатов А.И., Макаренко П.П., Шеметов В.Ю. Охрана окружающей среды в нефтегазовой промышленности. – М.: Недра, 1997. – 483 с.: ил.
2. Дьяченко Г.П. Внедрение технологии переработки буровых шламов. // Экология производства. 2009. №8. С. 64–68.
3. Король В.В., Позднышев Г.Н., Манырин В.Н. Утилизация отходов бурения скважин // Экология и промышленность России. 2005. №1. С.40–42.
4. Способ обезвреживания отработанных буровых шламов: Пат. 2379137 Рос. Федерация. № 2008125905/12: заявл. 25.06.2008: опубл. 20.01.2010. URL: <http://www.fips.ru/cdfi/Fips2009.dll/CurrDoc?SessionKey=8LHKUNCRE68GXXU75IMX&GotoDoc=1&Query=5> (дата обращения: 19.01.2012).
5. Способ обезвреживания бурового шлама с получением из него строительного материала: Пат. 2389564 Рос. Федерация. № 2009122101/03: заявл. 10.06.2009: опубл. 20.05.2010. URL: <http://www.fips.ru/cdfi/Fips2009.dll/CurrDoc?SessionKey=8LHKUNCRE68GXXU75IMX&GotoDoc=1&Query=6> (дата обращения: 19.01.2012).
6. Способ утилизации бурового шлама: Пат. 2347629 Рос. Федерация. № 2007127968/03: заявл. 20.07.2007: опубл. 27.02.2009. URL: <http://www.fips.ru/cdfi/Fips2009.dll/CurrDoc?SessionKey=8LHKUNCRE68GXXU75IMX&GotoDoc=1&Query=2> (дата обращения: 19.01.2012).
7. Способ утилизации буровых шламов: Пат. 2323293 Рос. Федерация. № 2006135005/03: заявл. 03.10.2006: опубл. 27.04.2008. URL: <http://www.fips.ru/cdfi/Fips2009.dll/CurrDoc?SessionKey=8LHKUNCRE68GXXU75IMX&GotoDoc=1&Query=3> (дата обращения: 19.01.2012).
8. Способ переработки бурового шлама: Пат. 2298567 Рос. Федерация. № 2005124786/04: заявл. 03.08.2005: опубл. 10.05.2007. URL: <http://www.fips.ru/cdfi/Fips2009.dll/CurrDoc?SessionKey=8LHKUNCRE68GXXU75IMX&GotoDoc=1&Query=4> (дата обращения: 19.01.2012).
9. Рядинский В.Ю., Денек Ю.В. Способы утилизации буровых отходов // Горные ведомости. – 2004. – №4. – С.82–90.
10. Ягафарова Г.Г., Барахнина В.Б. Утилизация экологически опасных буровых отходов // Нефтегазовое дело. 2006. №2. С.48–61.
11. Булатов А.И., Круглицкий Н.Н., Мариампольский Н.А., Рябченко В.И. Промысловые жидкости и тампонажные растворы (Физико-химия и основы применения). – Киев.: Техніка, 1974. – 232 с.
12. Басарыгин Ю.М., Булатов А.И., Проселков Ю.М. Бурение нефтяных и газовых скважин: Учеб. пособие для вузов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 632 с.
13. Коршак А.А., Шаммаров А.М. Основы нефтегазового дела. Учебник для ВУЗов. – Уфа.: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2001. – 544 с.: ил.
14. Прокопенко П.А., Тенишева В.Е. Определение токсичности и класса опасности буровых растворов и отходов бурения экспериментальным методом // Материалы XI региональной научно-технической конференции «Вузовская наука – Северо-Кавказскому региону». Том первый. Естественные и точные науки. Технические и прикладные науки. Ставрополь: СевКавГТУ, 2007. – 278 с.
15. ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методами спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.

16. ПНД Ф 16.1:2.2.22-98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органогенных, органо-минеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектрометрии. URL: http://www.opengost.ru/iso/13_gosty_iso/13080_gost_iso/1308001_gost_iso/4511-pnd-f-16.12.2.22-98-metodika-vypolneniya-izmereniy-massovoy-doli-nefteproduktov-v-mineralnyh-organogennyh-organomineralnyh-pochvah.html (дата обращения: 15.02.2012).
17. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки [Электронный ресурс]. М.: Издательство стандартов, 1985 – Доступ из справ.-правовой системы «Техэксперт».
18. ГОСТ 26428-85 Почвы. Методы определения кальция и магния в водной вытяжке [Электронный ресурс]. М.: Издательство стандартов, 1985 – Доступ из справ.-правовой системы «Техэксперт».
19. Иогансен К.В. Спутник буровика: Справочник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990 – 303 с.: ил.
20. «Об утверждении критериев отнесения опасных отходов к классу опасности для окружающей природной среды» [Электронный ресурс]: Приказ МПР РФ от 15.06.2001 № 511 – Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
21. ФР.1.39.2007.03222. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодovitости дафний. – М.: Акварос, 2007. URL: http://www.opengost.ru/iso/13_gosty_iso/13060_gost_iso/1306070_gost_iso/4342-fr-1.39.2007.03222-biologicheskie-metody-kontrolya.-metodika-opredeleniya-toksichnosti-vody-po-smertnosti-i-izmeneniyu-plodovitosti-dafniy.html (дата обращения: 15.02.2012).
22. ФР.1.39.2007.03223. Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей. – М.: Акварос, 2007. URL: http://www.opengost.ru/iso/13_gosty_iso/13060_gost_iso/1306070_gost_iso/4343-fr-1.39.2007.03223-biologicheskie-metody-kontrolya.-metodika-opredeleniya-toksichnosti-vod-po-izmeneniyu-urovnya-fluorescencii-hlorofilla-i-chislennosti-kletok-vodorosley.html (дата обращения: 15.02.2012).

С. М. Зраенко к.т.н.

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина
институт радиоэлектроники и информационных технологий-РТФ
кафедра теоретических основ радиотехники
Россия, г. Екатеринбург
z_sm@mail.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Проект № 11-07-12017)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСФОКУСИРОВКИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Предложены эмпирические параметры оценки степени расфокусировки изображения цели в радиолокаторе с синтезированной апертурой. Проведены исследования по определению точности и диапазона оценки квадратичной фазовой ошибки синтезирования на моделях распределенной цели.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, распределенная цель, расфокусировка изображения, эмпирические параметры.

Синтез оптимального алгоритма оценивания доплеровских параметров сигнала отраженного от распределенной цели в радиолокаторе с синтезированной апертурой (РСА), как показано в [1] приводит к чрезвычайно многоканальной практически нереализуемой структуре. В этой связи представляют интерес алгоритмы, основанные на выделении информации о сигнале по формируемому из него искаженному изображению. При этом неизвестная радиальная составляющая скорости взаимного перемещения РСА – цель приводит к азимутальному смещению ее радиолокационного изображения (РЛИ), а тангенциальная – к его расфокусировке (размытию).

В статье приводятся результаты исследования предложенных эмпирических алгоритмов определения степени расфокусировки изображения распределенной цели формируемого по данным РСА без деления синтезированной апертуры на две подапертуры снижающего отношение сигнал/шум для целей в изображении как, например, в алгоритме, основанном на оценке средней доплеровской частоты [2]. При этом используется тот факт, что изображение эталонной точечной цели

$\hat{\sigma}(x, r) = \left| \frac{\sin(x)}{x} \right|$ известно, поэтому при заданных параметрах РСА расфокусировку ее

изображения вызванную тангенциальным движением относительно радиолокатора можно определить по уменьшению уровня главного лепестка, его расширению,

«заплыванию» нулей функции $\hat{\sigma}(x, r)$ и росту уровня ее боковых лепестков. В то же время, отсутствие в общем случае информации о радиолокационном портрете распределенной цели не позволяет заключить о степени расфокусировки по ее изображению. Так, говоря об изображениях, приведенных на рисунке 1 можно трактовать их либо как расфокусированные изображения одной и той же цели, либо как изображения трех разных целей. Отметим, что фазовая ошибка на краю апертуры $\Delta\varphi_{\max} = \pi/2$, как принято считать, является граничной при разделении нефокусированного и

фокусированного режимов синтезирования, поскольку, не приводит к существенным искажениям изображения, что подтверждается рисунком 1 (б).

Вследствие того, что степень размытия изображения распределенной цели по одному ее изображению оценить невозможно, необходимо выполнить процедуру сжатия траекторного сигнала отраженного от цели с несколькими значениями параметра фокусирования и сравнить полученные результаты. При этом для оценки степени расфокусировки предлагается использовать три эмпирических параметра вычисляемых по расфокусированному изображению:

- коэффициент яркости (максимальное значение изображения)

$$Q_{\text{я}} = \max_i \hat{\sigma}_i, \quad i = \overline{1, N}; \quad (1)$$

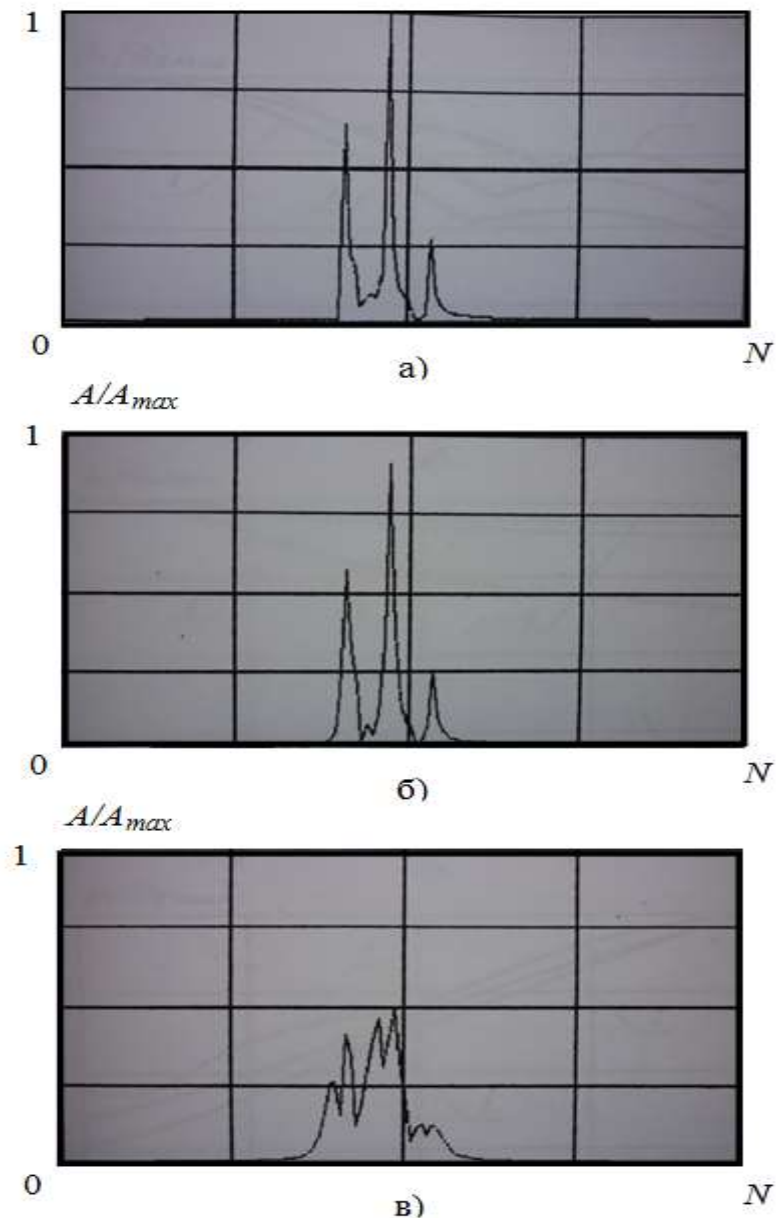


Рис. 1 – РЛИ распределенной цели:
а) $\Delta\varphi_{\max} = 0$; б) $\Delta\varphi_{\max} = \pi/2$; в) $\Delta\varphi_{\max} = 2\pi$.

- коэффициент контраста (отношение среднего квадратичного отклонения яркости изображения к его математическому ожиданию)

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\sigma}_i$$

$$Q_K = \frac{\left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\hat{\sigma}_i - m \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{m}; \quad (2)$$

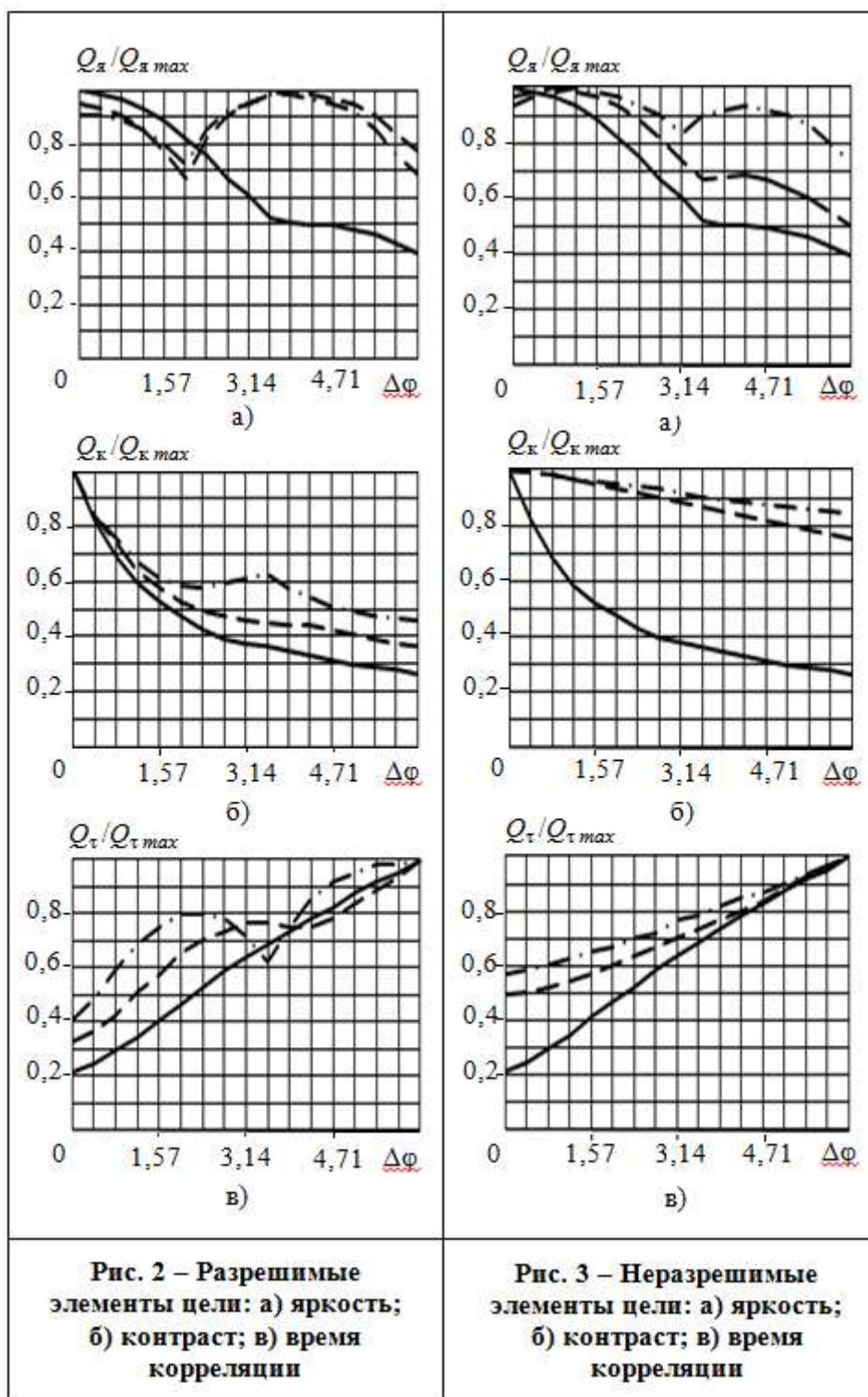
- коэффициент корреляции (время корреляции изображения)

$$Q_\tau = \frac{1}{N - N'} \sum_{n=1}^{N-N'} \left\{ \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} \left(\hat{\sigma}_i - m \right) \left(\hat{\sigma}_{i+n-1} - m \right) \right\} / \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\hat{\sigma}_i - m \right)^2 \right] \}. \quad (3)$$

Указанные параметры основаны на искажениях изображения точечной цели вызванных ее расфокусировкой. Для проведения анализа их работоспособности по распределенной цели проведено математическое моделирование, по результатам которого построены зависимости данных параметров в функции от расфокусировки (максимальной ошибки фазы на краю синтезированной апертуры).

Отметим, что взаимное расположение элементов цели (блестящих точек) существенно влияет как на сфокусированное, так и на расфокусированное ее изображение, приводя к существенному изменению выбранных параметров – коэффициентов яркости, контраста и корреляции. В связи с этим для исследования влияние расфокусировки на параметры изображения выбраны наихудшие с точки зрения однозначности их изменения расположения и яркости элементов отражения цели. Это, как было определено по результатам исследования, блестящие точки с одинаковой эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР) равномерно распределенные через 2 и 0,5 элемента разрешения соответственно.

Полученным результатам для целей, состоящих из 1, 2 и 5 таких разрешимых и неразрешимых элементов соответствуют зависимости, обозначенные сплошной линией, пунктиром и штрих пунктиром на рисунках 2 и 3.



Проведенные исследования показывают, что даже в отсутствие шума:

- критерий, основанный на абсолютном максимуме интенсивности РЛИ, работоспособен только по одной точечной цели, либо по нескольким существенно разнесенным; разрешающая способность по $\Delta\varphi_{\max}$ (по уровню 0,707) для него приблизительно $\pm 3\pi/4$, а рабочий диапазон оценки чуть больше $\pm\pi$;
- наилучшим по одной точечной цели является критерий, основанный на коэффициенте контраста, как впрочем и для случая, когда цель состоит не более чем из

пяти разрешаемых блестящих точек; при этом разрешающая способность по $\Delta\varphi_{\max} = \pm\pi/6$, а рабочий диапазон оценки $\Delta\varphi_{\max} \approx \pm 2\pi/3$;

– если цель состоит из неразрешаемых точек (не более 5), то наилучшим является критерий, основанный на вычислении времени корреляции РЛИ; при этом разрешающая способность по $\Delta\varphi_{\max} \approx \pm\pi/2$, а рабочий диапазон достигает $\pm 2\pi$; аналогичный результат был получен и для коэффициента контраста, но при меньшей крутизне зависимости.

Таким образом, показана возможность оценивания степени расфокусировки изображений формируемых в радиолокаторе с синтезированной апертурой для существенно неоднородных целей по их РЛИ, сформированных по всей апертуре без деления ее на подапертуры.

Список литературы:

1. Зраенко С.М. Оценка доплеровских параметров траекторного сигнала в радиолокаторе с синтезированной апертурой // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань, 2012. – №1. – С. 174-178.

2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: «Радиотехника», 2005. – 368 с.

А. М. Игнатова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
механико-технологический факультет
кафедра сварочного производства и технологии конструкционных материалов
Россия, г. Пермь
ignatovaanna2007@rambler.ru

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАЛЯХ

В работе представлены результаты изучения морфологии неметаллических включений в сварных соединениях, интерпретация результатов направлена на подтверждение теории о поведении неметаллических включений М. Флемингса.

Ключевые слова: сварка, неметаллические включения, синтетические минеральные сплавы.

Общей проблемой качества для всех разновидностей сталей является наличие в них неметаллических включений (НВ). Состав и морфология включений в сталях различны и зависят от способа ее производства и обработки. Несмотря на то что, все существующие технологические усовершенствования по производству стали и изделий из нее направлены на максимальное снижение концентрации НВ, их доля остается весьма значительной, только кремнеземистых включений содержится около 10^8 в 1 см^3 [1]. Общей целью многих технологических и фундаментальных исследований в области повышения качества стали является, обеспечение минимального количества и размера включений, а так же контроль их распределения в металле.

НВ представляют собой химические соединения металлов с неметаллами, находящиеся в стали и сплавах в виде отдельных фаз [3]. *Однако, мы предлагаем конкретизировать данное определение тем, что химические соединения, которыми являются НВ, относятся к группе материалов синтетических минеральных сплавов.*

Синтетические минеральные сплавы (симиалы) это материалы, состоящие из комплексных химических соединений оксидов металлов и некоторых неметаллов, например Si. Они подобны природным минералам по химическому составу, однако отличаются от них по некоторым структурным параметрам.

Настоящая работа представляет собой исследование, направленное на изучение и поиск визуальных примеров разных по типу и морфологии НВ. Цель работы представить фотографические микроскопические изображения НВ в сталях и сварных соединениях, происхождение и морфология которых интерпретируются согласно теоретическим моделям, выдвинутыми М. Флемингсом.

Объектом исследования являются образцы прокатной трубной стали марки 10Г2С, класса прочности К60 и сварных соединений из этой стали выполненные методом многослойной ручной дуговой сварки и полуавтоматической сваркой. Для сварки использовались электроды ЛБ-52У (производство Японии) и НР-208 (производство США).

Для поиска в составе образцов НВ использовалось два вида электронных микроскопов. Для обнаружения более крупных включений применяли электронный сканирующий микроскоп марки JSM63090LV (Япония), а для обнаружения микронных и наноразмерных включений использовался растровый электронный микроскоп JEOL JSM-6701F (Япония) с

холодной полевой эмиссией катода и высоким разрешением, позволяющим наблюдать даже те объекты в структуре, размер которых находится в диапазоне до 1 нм. *

В результате проведенного исследования, все обнаруженные включения были разделены на группы в зависимости от внешнего строения. При классификации не учитывалась размерная группа включений, поскольку, за основу классификации был взят признак формы. Выявлено 6 типов включений, для удобства описания каждый отдельный тип носит название буквы в алфавитном порядке, все они представлены на рис. 1

Для каждой зоны образца, а именно для зоны основного металла, зоны сварного шва и ЗТВ, было характерно наличие определенных включений, которые в наименьшей степени встречались в других зонах. На рис.2 представлена схема отражающая характер распределения включений различного типа по зонам образцов.

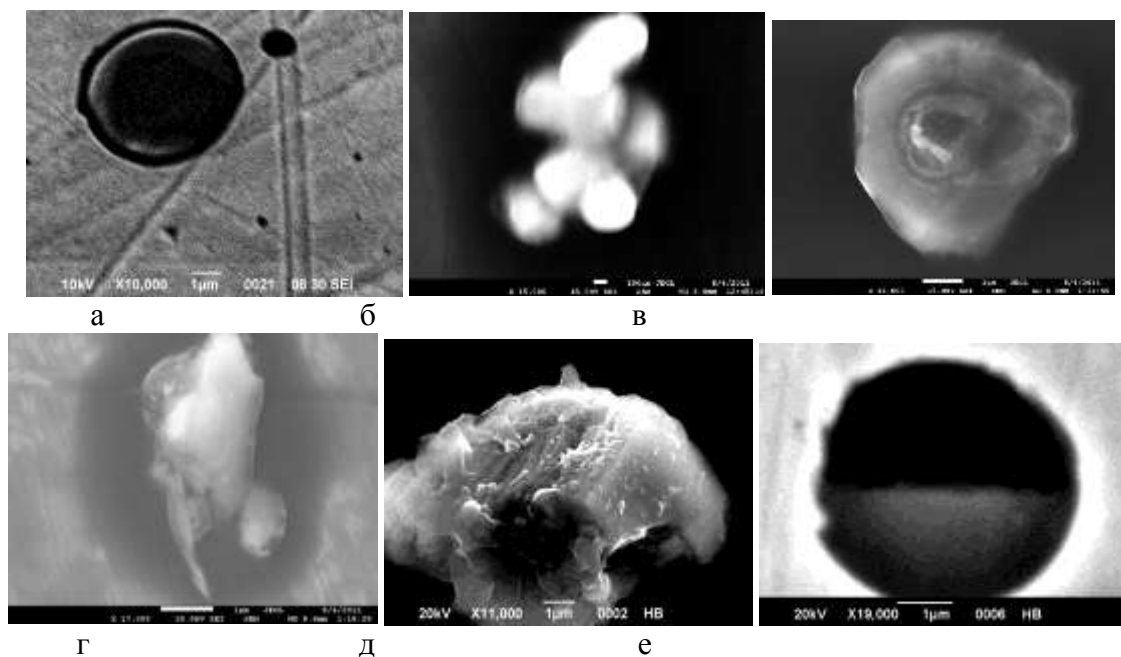


Рис. 1. Неметаллические включения:

а - типа А, x10 000; б - типа Б x45 000; в – типа В x14 000; г - типа Г x17 000; д – типа Д x11 000; е – типа Е- x19 000

А,Б,Е	А,Б,Г,Е	А,Б,В,Д
Основной металл	ЗТВ	Зона сварного шва

Рис. 2. Распределение типов НВ в зонах образцов.

Включения типа А, вполне могут рассматриваться как первородные, поскольку имеют округлую форму что свидетельствует о быстром застывание из жидкого капельного состояния. Вероятнее всего данный тип включений присутствует в металле до его сварки и прокатки, возникает на этапе раскисления расплава стали. В основном включения типа А

* Данные исследования проведены в исследовательских лабораториях Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ-ПГУ) при участии его ведущих сотрудников Осовецкого Б.М. (д. г.-м.н., профессор) и Казымова К.П. (доцент).

встречаются достаточно крупных размеров от 3 до 12 мкм, что согласно опять же теории М. Флемингса объясняется тем, что более мелкие частицы коагулируют между собой. Поскольку в сварных соединениях процесс затвердевания происходит крайне быстро, удалось зафиксировать описанный момент столкновения частиц в реальности (рис.3), на изображении четко видны стремящиеся к столкновению сферические частица размер которых не превышает 1 мкм.

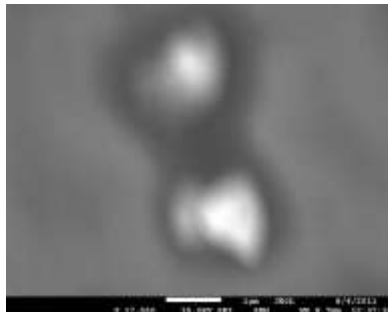


Рис. 3. Зафиксированный в металле шва момент слияния двух мелких включений в более крупное.

Включения типа Б, представляют собой некоторое объединение сферических частиц, напоминающее гроздь винограда, такие частицы представляют собой включения оксида алюминия. Окись алюминия может присутствовать в стали в следствие двух причин, это частицы которые образовались в процессе внепечной обработки стали при раскисления алюминием, а так же в процессе сварки, когда составляющие обмазки электрода и шлаковой защитной корки попадают в металл или взаимодействуют с кислородом.

Включения типа В состоят из двух фаз, которые не смешиваются между собой ни в жидком, ни в твердом состоянии, то есть представляют собой пример ликвации в синтетических минеральных сплавах [2]. Данное включение представляет собой многослойную шпинель, в которой чередуются слои Al_2O_3 -MgO, Al_2O_3 -FeO и Al_2O_3 -FeO-MgO-SiO₂.

Включения типа Г, как правило, остроугольные неправильной формы, причина формирования таких включений может быть различна. Если речь идет о крупных включениях размер которых более 10-15 мкм, то скорее всего это раздробившиеся в процессе прокатки или термических процессом крупные включения. Прежде всего это могут быть ограненные игольчатые включения $FeAl_3$ и пленки Al_2O_3 , залегающие в виде тонких плоских включений. Последний тип, вероятно, образуется путем погружения в расплав поверхностного окисного слоя. Данные включения образовались в результате выталкивания включений утолщающимися дендритами основного металла.

Включения типа Д в отличие от всех предыдущих включений относятся ко вторичным включениям. Данный тип включений представляет собой сульфиды, образованные по эвтектической реакции или монотектической реакции. Некоторые из них могут представлять собой сульфиды марганца, которые представляют собой образуют ограненные включения вырожденной эвтектики.

Включения типа Е наглядно подтверждает точку зрения, что *каждое отдельное включение затвердевает как самостоятельная изолированная «отливка»*. Включения данного типа сохраняют свою сферическую форму, причем благодаря большому уменьшению объема окислов при кристаллизации образуется усадочная раковина. Данные включения могут также содержать примеси различных оксидов, в силу чего усадочная раковина будет меньше, а состав более анизотропным.

Таким образом, проведенное исследование позволило обнаружить реальные визуальные примеры различных по строению неметаллических включений в сталях и стальных сварных соединениях. Эти фотографии иллюстрируют и визуализируют теоретические модели образования неметаллических включений высказанные М. Флемингом. Благодаря сопоставлению полученных данных с общей базой исследовательских данных о неметаллических включениях удалось выделить 6 типов включений отличающихся по форме. Анализ формы позволил предположить не только состав этих включений, но и историю их формирования. Единым для всех включений является то что, каждое отдельное неметаллическое включение затвердевает как самостоятельная изолированная «отливка» из синтетических минеральных сплавов, а окружающий основной металл вокруг представляет собой металлическую матрицу для этих процессов. Можно сказать что процесс формирования внутренней структуры включений и процесс затвердевания металла протекают параллельно и по различному принципу, именно поэтому включения представляют интерес с точки зрения отдельных исследований, основанных на приравнивание неметаллических включений к синтетическим минеральным сплавам.

Список литературы:

1. K. Beskow, J. Jia, C. H. P. Lupis, and Du Sichen Chemical characteristics of inclusions formed at various stages during the ladle treatment of steel // Ironmaking and Steelmaking. - 2002 Vol. 29 No. 6. – p. 427-435
2. Игнатова А.М. Природа ликвационных явлений в синтетических расплавах каменного литья// Успехи современного естествознания. - №8, 2010. – с. 22-23.
3. Флемингс М. Процессы затвердевания. - М.: Мир, 1977. – 420 с.

И. Н. Ищенко

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
факультет информационных технологий и систем управления (ИТС)
кафедра систем приводов
Россия, г. Москва
aniini@yandex.ru

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ

В статье описывается метод повышения производительности гидроабразивного резания, основанный на внешнем воздействии на гидроабразивную струю, проводятся предварительные исследования применимости такого метода.

Ключевые слова: гидроабразивное резание, повышение производительности, соударение струй.

Постоянно растущие требования к методам обработки материалов резанием приводят к необходимости поиска вариантов повышения производительности и качества резания, а также снижения его стоимости. Одним из методов, который имеет неоспоримые преимущества при раскройной обработке листовых и не только, металлов, керамики, стекла, мрамора и т.д., является резание высоконапорными струями воды сверхвысокого давления с применением абразивного порошка для интенсификации процессов съема материала. Данный метод, называемый также гидроабразивным резанием (ГА), позволяет избежать нагрева обрабатываемой кромки материала, производить точную размерную обработку труднообрабатываемых материалов, таких, например, как стекло. Во многих случаях применение другого метода обработки невозможно или значительно затратней, чем гидроабразивное резание. В связи с этим совершенствование технологий гидроабразивного резания является актуальной научно технической задачей.

Исходя из геометрической модели гидроабразивного резания, предложенной М. Hashish [1], следует, что съем материала осуществляется единичными абразивными частицами, находящимися на режущей поверхности струи. Из данной теории следует, что при гидроабразивном резании часть абразивных частиц попросту не используется (утрачивается вместе с энергией струи на выходе из обрабатываемого материала), а стоимость абразивного порошка составляет значительную часть стоимости самого процесса резания (по некоторым данным до 40%). Теорию использования единичных частиц абразива подтверждает обширная работа, проведенная автором Vu Ngoc Pi [2], где он исследовал размеры абразивных зерен после многократного применения в процессе гидроабразивного резания с целью найти возможные пути снижения стоимости гидроабразивного резания. Так, автором проведены серии опытов, по которым можно судить о состоянии абразива после его применения для резания материалов.

Основываясь на геометрической модели гидроабразивного резания и результатах работы Vu Ngoc Pi, можно сделать вывод о возможном влиянии изменения угла атаки струи, в том числе нестационарном на производительность и качественные показатели гидроабразивного резания. В частности, можно предположить, что сообщив

дополнительную энергию абразивной частице и направив тем самым её в сторону обрабатываемого материала, можно увеличить количество взаимодействующих с материалом абразивных частиц.

Известно, что особенно ярко при критических скоростях прорезаемости материала на поверхности реза образуются дефекты обработки, такие, например, как полосчатость, волнистость, шероховатость, вызванные прежде всего реактивным колебанием струи и особенностями ГА резания. Guo [3] выполнил обширный анализ поверхностей реза, на основании результатов которого также можно сделать вывод о возможном применении динамического изменения траектории и угла контакта струи и материала (рис.1).

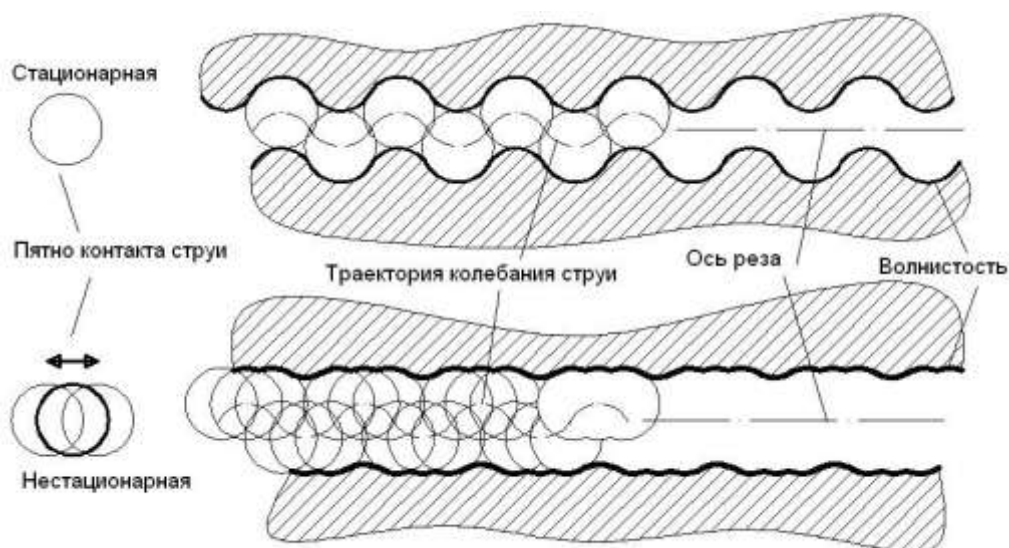


Рис.1 Модель формирования поверхности реза при стационарной и нестационарной струе.

Целью исследования является определение возможности повышения производительности и качественных показателей гидроабразивного резания в случае применения внешнего воздействия на гидроабразивную струю в процессе резания, приводящего, в частности, к изменению траектории гидроабразивной струи, угла атаки, параметров нестационарности и др. путем соударения гидроабразивной и управляющей струй. Основным результатом должен быть получен вследствие увеличения объема используемого абразивного материала, находящегося в гидроабразивной струе. Метод соударения струй выбран потому, что он позволяет избавиться от быстро изнашиваемых и контактирующих с абразивной струей элементов, так как является бесконтактным, и имеет значительный потенциал для использования в гидроабразивном резании.

Для проведения исследований была разработана экспериментальная установка рис.2

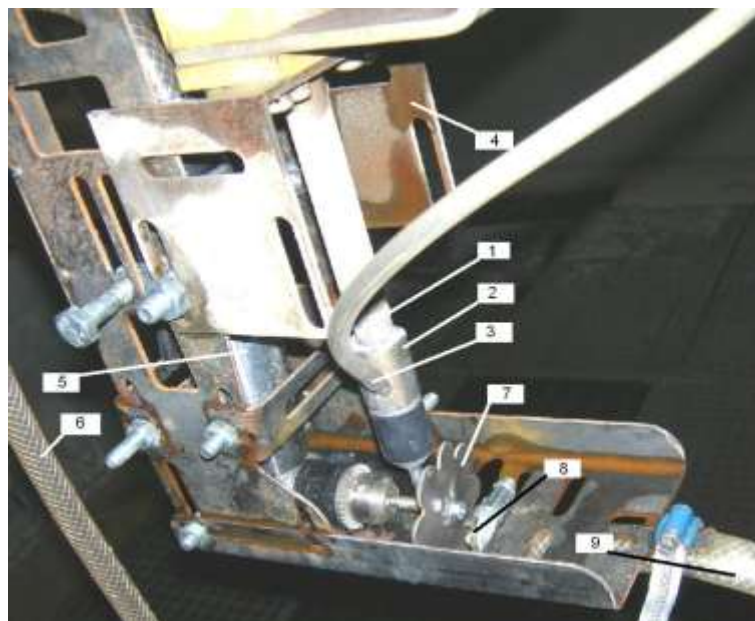


Рис.2 Общий вид экспериментальной установки.

Установка представляет собой стандартное струеформирующее устройство 1 со смесительной камерой 2 и трубкой подачи абразива 3, размещенной непосредственно на корпусе 4 экспериментальной установки. В нем также размещены пневмомотор 5 со шлангом подачи сжатого воздуха 6, пневмомотор приводит в движение диск 7 с прорезями. Движение диска с разной частотой позволяет создавать разные законы движения управляющей воздушной струи создаваемой пневматическим воздушным соплом 8. К соплу по шлангу 9 подводится воздух сжатый до рабочего давления.

Данная установка была адаптирована для размещения на робототехническом комплексе гидроабразивной резки AWJetRobotics 2020, которая включает в себя насос сверхвысокого давления UNDE HPS 6045, позволяющий создавать рабочий поток жидкости при давлениях, достигающих 600 МПа, и робот манипулятор FANUC M-710iC/50. Такая компоновка экспериментальной установки позволила воздействовать на гидроабразивную струю во время движения струеформирующего инструмента с различных направлений, и в широком диапазоне частот (рис.3).

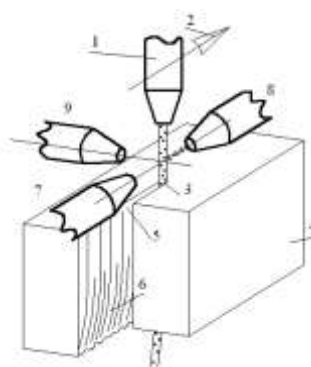


Рис.3 Схема возможных вариантов внешнего воздействия на гидроабразивную струю.

Так, при движении струеформирующего инструмента 1 в направлении подачи 2 гидроабразивная струя 3 воздействует на обрабатываемый материал 4, в результате образуется шов 5 со свойствами такой обработки дефектами 6. Данная установка позволяет во время движения гидроабразивной струи осуществлять на неё динамическое воздействие в попутном 7, встречном 8 и перпендикулярном 9 направлении к движению подачи.

Проведя предварительные эксперименты при резании материала «сталь 30» толщиной 10 мм при скорости подачи струеформирующего инструмента, равной 0,5 мм/с, со встречным воздействием пневматической струей при частоте 100 Гц было установлено визуальное улучшение качества получаемого шва рис 4.

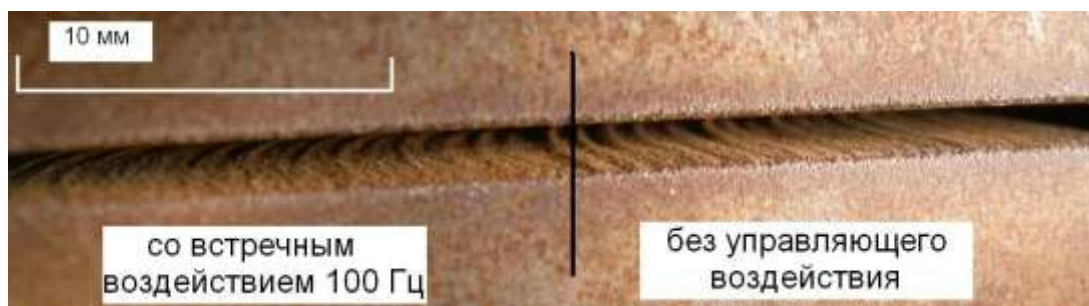


Рис 4. Микрофотосъемка поверхности шва.

Выводы:

- Разработана и опробована экспериментальная установка, позволяющая во время движения струеформирующего инструмента воздействовать на гидроабразивную струю во встречном, попутном или перпендикулярном направлении;
- Получены предварительные результаты исследования, позволяющие говорить о положительном влиянии созданной нестационарной гидроабразивной струи на качество получаемого шва реза;
- Проведено обоснование повышения качественных показателей при создании нестационарности в гидроабразивной струе.

Список литературы:

1. Hashish, M., An Improved Model of Erosion by Solid Particle Impact, Proceedings of the 7th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, U.K., Paper 66, 1987, pp.66-1 66-9.
2. Vu Ngoc Pi, Performance Enhancement of Abrasive Waterjet Cutting, Hanoi University of Technology, Vietnam, ISBN: 978-90-9023096-2.
3. Guo N, S, schneidprozess und schnittqualität beim Wasserabrasivstrahlschneiden. Ph.D. Thesis, University of Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr 328. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994.

**А. В. Козлова¹, В. Я. Модорский¹ д.т.н., В. Ю. Петров¹ д.т.н.,
А. Н. Поник² д.т.н.**

¹«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
аэрокосмический факультет
кафедра механики композиционных материалов и конструкций
Россия, г. Пермь
modorsky@pstu.ru, president@pstu.ru

²«Научно-исследовательский институт полимерных материалов»
Россия, г. Пермь
modorsky@pstu.ru

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАСТРОЕК ГАЗОХОДА ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОТВОДА И ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЯЧИХ ГАЗОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Разработана инженерная методика определения настроек газохода переменного сечения для отвода и охлаждения горячих газов энергетических установок различного назначения. Определены области допустимой работы газохода.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, численный эксперимент, газоход переменного сечения, форсунки, испарение, инженерная методика, допустимые режимы.

При работе наземных энергетических установок (ЭУ) возникает проблема отвода и охлаждения высокоскоростных и высокотемпературных потоков истекающих газов. Для этого используют газоходы переменного сечения, оснащенные системой регулирования подачи воды в проточный канал. При этом необходимо обеспечить эффективную работу газохода в широком диапазоне изменения рабочих параметров.

В ходе анализа существующих исследований по данной тематике выявлено, что необходимо создание инженерной методики определения настроек газожидкостного эжектора по оптимальному распределению воды по поясам и секциям газохода. Методика должна давать возможность определять диапазон ЭУ с которыми можно проводить работы с учетом постоянных настроек газожидкостного эжектора. Исследования являются достаточно актуальными и связаны с созданием комплекса методик расчета и прогнозирования устойчивой и бесперебойной работы газоходов.

Результаты получены на основании проведения численных экспериментов, основанных на методе конечных объемов для решения задач газо- и гидродинамики [2]. Объект исследования – газоход переменного сечения. По периметру газохода расположены пояса из форсунок для подачи воды в проточную часть. Вода снижает скорость потока и охлаждает газопарожидкостную смесь до требуемых значений.

Математическая модель газожидкостной эжекции в трехмерной динамической постановке включает в себя основные законы сохранения массы, импульса и энергии для несущей (горячий газ) и несомой (капли воды) фаз, замыкается уравнениями состояния идеального сжимаемого газа и турбулентности, а также начальными и граничными условиями [1].

В ходе поискового эксперимента варьировались следующие граничные условия:

- а) массовая скорость горячих газов $m_{г.г}$;
- б) соотношение массового расхода воды и горячего газа $K = M_B / M_{г.г}$ изменялось в пределах $3.25 \leq K \leq 10$;
- в) на выходной границе установлено условие свободного истечения;
- г) для несущей фазы на поверхностях симметрии – условие проскальзывания, а на стенке – условие логарифмического закона изменения скорости;
- д) для несомой фазы принималось условие упругого отскока.

В ходе анализа полученных результатов выявлена многопараметрическая область [1], которая позволяет в ходе подготовки к физическому эксперименту определить параметры настроек газохода и исключить недопустимые режимы его работы. Достижение требуемого режима работы установки обеспечивается соответствующими расходными характеристиками по подаче воды в канал газохода.

Анализ результатов численных экспериментов позволил, в соответствии с выбранными критериями эффективной работы установки, построить номограмму для определения настроек газохода переменного сечения по впрыску воды в проточную часть канала. Такими критериями является температура потока на выходе из газохода $T_{г.г}'$. В расчетах принималось $[T_{г.г}'] = 0.133$ ($T_{г.г}'$ – относительное значение; абсолютное значение определяется как $T_{г.г} = T_{г.г}' \cdot T_{max}$, где T_{max} – максимальное значение температуры горячих газов). При температуре $T_{г.г}' < [T_{г.г}']$ происходит конденсация парогазового потока, в котором присутствуют вредные компоненты и появляется возможность их улова; происходит уменьшение объема парогазового потока, что значительно снижает силовые нагрузки на конструкцию газохода.

После того, как с помощью многопараметрической области допустимой работы газохода [1], получено требуемое соотношение массовых расходов воды и горячего газа K , необходимо выполнить настройки газохода по расходу воды для каждого пояса $i_{п}$ и каждой секции $i_{с}$ газохода. На рис. 1 представлено распределение относительной площади отверстий форсунок s' по поясам и по секциям газохода в соответствии с его конструкцией ($s' = s_{ф_{n_c}} / s_{ф_{\Sigma}}$, где $s_{ф_{n_c}}$ – площадь отверстий форсунок в i -й секции, $s_{ф_{\Sigma}}$ – общая площадь отверстий форсунок газохода).

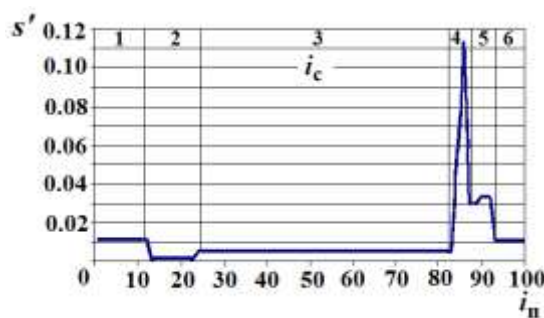


Рис.1– Распределение площади отверстий форсунок по газоходу.

Для выбранного по номограмме [2] $K \geq K_{min}$ расход воды через i -й пояс $M_{B_{i_{п}}}$ газохода определяется с помощью следующего выражения:

$$M_{B_{i_n}} = \frac{M_{B_{\Sigma}}}{s\phi_{\Sigma}} \cdot s\phi_{i_n}, \quad (1)$$

где $M_{B_{\Sigma}}$ – общий массовый секундный расход воды. Определяется из номограммы по формуле

$$M_{B_{\Sigma}} = K \cdot M_{г.г}, \quad (2)$$

где $s\phi_{i_n}$ – площадь отверстий форсунок в i -м поясе газохода.

Необходимо осуществить переход от массовой скорости горячего газа $m_{г.г}$ к массовому секундному расходу горячего газа $M_{г.г}$: согласно выражения (2), для энергетических установок с $m_{г.г}=78\text{кг/с}\cdot\text{м}^2$ необходимо определить значения минимального суммарного расхода воды.

На рис.2 показано распределение расхода воды по поясам и по секциям газохода (при $3.25 \leq K \leq 10$), которое позволяет применить одинаковые настройки газохода по впрыску воды по поясам и секциям при проведении серии работ с энергетическими установками, имеющими различные массовые скорости подачи горячего газа $m_{г.г}$. При этом значение температуры потока на выходе из газохода не будет превышать допустимое. Для этого можно использовать следующую методику:

1. По рис. 2 необходимо выбрать кривую, соответствующую настройке газохода по суммарному расходу воды $M_{B_{\Sigma}}$.

2. По рис. 3, в соответствии с суммарным расходом воды $M_{B_{\Sigma}}$, выбирается массовая скорость горячего газа энергетической установки $m_{г.г}$, из списка возможных вариантов. Например, при общем расходе воды $M_{B_{\Sigma}} = 1325\text{кг/с}$ можно проводить работу с энергетическими установками массовая скорость горячего газа которых изменяется в диапазоне от 104 до $178\text{кг/с}\cdot\text{м}^2$. Данному диапазону массовых скоростей горячего газа ЭУ соответствует линия AB .

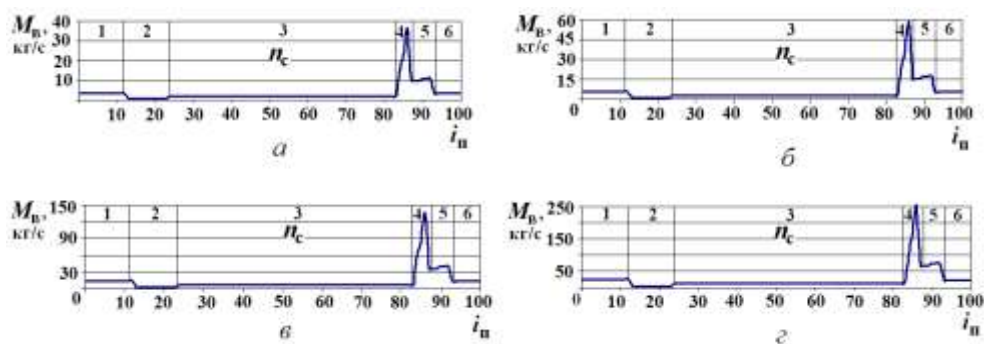


Рис.2– Распределение расхода воды по газоходу для $3.25 < K < 10$:

$a - M_{B_{\Sigma}} = 325\text{кг/с}$; $б - M_{B_{\Sigma}} = 500\text{кг/с}$; $в - M_{B_{\Sigma}} = 1200\text{кг/с}$; $г - M_{B_{\Sigma}} = 2300\text{кг/с}$

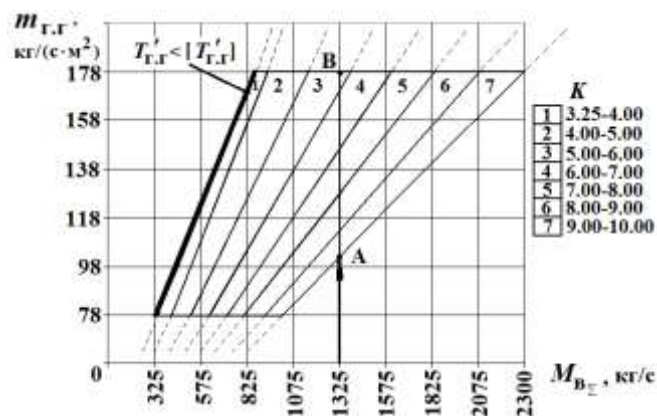


Рис.3– Зависимость общего расхода воды от массовой скорости горячего газа при изменении $3.25 < K < 10$

3. По рис.3 по соответствующему выбранному значению массовой скорости горячего газа $m_{г.г}$ определяется соотношение массовых расходов воды и газа K . При этом выполняется условие $T'_{г.г} < [T'_{г.г}]$.

4. Для контроля, по многопараметрической области [1], для выбранных массовой скорости горячего газа $m_{г.г}$ и соотношения массовых расходов воды и горячего газа K , определяется значение температуры потока на выходе из газохода $T'_{г.г}$.

Достоверность разработанных моделей расчета нестационарных газогидродинамических процессов в канале переменного сечения газохода подтверждена удовлетворительным совпадением результатов вычислительных экспериментов с результатами аналитических решений и физических экспериментов.

Список литературы:

1. Козлова А.В. Моделирование процессов охлаждения в канале переменного сечения газохода / А.В. Козлова, В.Я. Модорский, А.Н. Поник // Изв.высш.учеб. заведений. Авиационная техника. – 2010.– №4.– С. 23-26.
2. FlowVision. Руководство пользователя [Электронный ресурс] / ООО «ТЕСИС». – М., 2011. – URL: <http://www.flowvision.ru/> (дата обращения 01.11.2011).

Г. А. Козлова¹ к.х.н., Н. Б. Ходяшев¹ д.т.н., Б. Е. Шенфельд² д.т.н.

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет
химико-технологический факультет
кафедра химии и биотехнологии
Россия, г. Пермь
vvv@purec.pstu.ac.ru

²Уральский государственный научно-исследовательский институт региональных
экологических проблем
Россия, г. Пермь
adm@ekology.perm.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТРАБОТАННЫХ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ТРАВИЛЬНЫХ РАСТВОРОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД И ПОЛУЧЕНИЯ ПИГМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В работе рассмотрено использование отдельных типов железосодержащих травильных растворов гальванических производств для очистки сточных вод, содержащих ионы Cr(VI, III) , Zn^{2+} , Cu^{2+} , а также получения железоокисных пигментных материалов.

Ключевые слова: железосодержащие травильные растворы, очистка сточных вод, железоокисные пигменты.

В гальваническом производстве при подготовке поверхностей стальных изделий для нанесения покрытий осуществляется их обработка растворами неорганических кислот. При этом используют такие кислоты как HCl , H_2SO_4 , HNO_3 , а иногда – и смеси кислот. В ходе осуществления процесса травления в растворах появляются ионы Fe^{2+} , Fe^{3+} и с течением времени эксплуатации концентрация указанных ионов растет. В итоге это приводит к снижению окислительной способности травильных растворов, необходимости их замены или регенерации. В настоящее время, во многих случаях, отработанные травильные растворы не регенерируют, а направляют на нейтрализацию в составе кислотного стока [1].

С позиций технологического и экологического подходов отработанные травильные растворы представляют собой, с одной стороны, ценное химическое сырье, а с другой – исходный компонент, который целесообразно использовать для очистки сточных вод. В этом плане травильные растворы, содержащие такие кислоты как HCl , H_2SO_4 с высокой концентрацией ионов Fe^{2+} , могут быть использованы для получения желтых железоокисных пигментов [2]. Известно применение такого рода отработанных электролитов для очистки сточных вод от ионов хрома (VI) [3]. Однако область применения травильных растворов, содержащих ионы Fe^{2+} , для очистки сточных вод может быть расширена. Их целесообразно использовать для очистки стоков не только от ионов хрома (VI), но и таких ионов как Cr^{3+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} и других. Последнее обусловлено возможностью участия ионов Fe^{3+} , образующихся в ходе окислительно-восстановительного взаимодействия, в процессах гидролиза и последующего соосаждения с ионами металлов ряда d- и p-элементов [4]. Разработка указанного процесса явилась одной из задач настоящей работы.

В ряде технологических процессов для травления стальных изделий используют растворы HNO_3 , которые накапливают в своем составе ионы Fe^{3+} . Такие растворы целесообразно использовать, с одной стороны, также для очистки сточных вод от примеси катионов металлов, а с другой – для получения пигментных материалов. Однако переработка такого типа железосодержащих растворов на пигментные материалы относится к числу малоизученных процессов, что в свою очередь, составило другую задачу настоящего исследования.

Для решения задачи очистки сточных вод в качестве объектов исследования приняты: отработанный раствор травления конструкционных сталей ОАО «Пермский моторный завод» состава, г/л: H_2SO_4 – 105, Fe^{2+} – 25,2; сточная вода после осаждения свинцового крона состава, мг/л: Cr(VI) – 500, Cr^{3+} – 9600, Fe^{3+} – 97, Cu^{2+} – 230, Zn^{2+} – 19,5 [5]; отработанный электролит разупрочнения сопловых лопаток ОАО «Пермский моторный завод» состава 520 г/л NaOH . Для решения другой задачи – получения пигментных материалов объектом исследования принят отработанный электролит АО «Телта» (г. Пермь) состава, г/л: H_2SO_4 – 20, HNO_3 – 20, NaCl – 10, Fe^{3+} – 33,4. Для осуществления нейтрализации и последующего гидролиза использован 2 М раствор NaOH .

В лабораторных условиях, а также на укрупненной опытной установке проведена очистка сточных вод после осаждения свинцового крона. Для взаимодействия использован 2-х кратный избыток травильного раствора по отношению к содержанию ионов Cr(VI) в сточной воде. По окончании процесса восстановления ионов Cr(VI) ионами Fe^{2+} в кислой среде к раствору добавлен отработанный щелочной электролит до установления значения $\text{pH} = 8,5 \div 9,0$. Указанный диапазон значений водородного показателя среды взят, с одной стороны, из публикации [6], а с другой – подтвержден расчетами, выполненными на основе справочных значений [7]. Именно в этой области значений pH достигается минимальное суммарное содержание в растворах различных гидролизированных форм рассматриваемых ионных примесей. Осадок в виде смеси гидроксидов отделен от жидкой фазы. Атомно-абсорбционным методом определено содержание ионов металлов в осветленном растворе. По результатам параллельных испытаний установлена следующая остаточная концентрация ионов в очищенной сточной воде, мг/л: Cu^{2+} – $0,3 \pm 0,1$, Fe^{3+} – $0,4 \pm 0,2$, Zn^{2+} – $0,3 \pm 0,2$, Cr(III,VI) – $< 0,05$. Такой уровень очистки сточной воды от указанных ионных примесей соответствовал требованиям, предъявляемым к сточным водам, отводимым в городскую канализационную сеть.

Проведена нейтрализация травильного раствора состава, г/л: H_2SO_4 – 20, HNO_3 – 20, NaCl – 10, Fe^{3+} – 33,4 в лабораторных условиях 2 М раствором NaOH . Получен коагулят гидроксида железа (III) с сопутствующими примесями. Осадок отделен от жидкой фазы, промыт водой от растворимых солей, высушен при температуре 110°C до постоянного веса и подвергнут термической обработке при температуре 450°C . Таким путем получен пигментный материал железоокисного типа. Его характеристики представлены в таблице.

**Таблица – Физико-химические показатели опытного образца
железоокисного пигмента**

№ п/п	Наименование показателей	Норма для пигмента
1.	Цвет	Красно-коричневого цвета (соответствует утвержденному образцу)
2.	Массовая доля оксида железа (III), %, не менее	70,0
3.	Массовая доля воды и летучих веществ, %, не более	1,0
4.	рН водной вытяжки	7-9
5.	Укрывистость, г/м ² , не более	45
6.	Маслоемкость, г/100 г пигмента, не более	50

Сопоставление приведенных в таблице показателей с характеристиками известных пигментов на основе оксидов железа показывает, что он близок к пигменту железоокисному красному. На разработанную марку пигмента составлена лабораторная методика и технические условия. Пигмент аттестован на Пермском лакокрасочном заводе и получено заключение о возможности его использования в лакокрасочном производстве.

Таким образом, отработанные железосодержащие травильные растворы гальванического производства могут быть рекомендованы для очистки отдельных видов сточных вод, включающих ионы Cr(VI, III), Zn²⁺, Cu²⁺, и получения пигментных материалов железоокисного типа.

Список литературы:

1. Гибкие автоматизированные гальванические линии: Справочник под общей ред. В.Л. Зубченко. – М.: Машиностроение, 1989. – С.409–413.
2. Беленький Е.Ф., Рискин И.В. Химия и технология пигментов. Л.: Химия, 1974. – С.372.
3. Шутько А.П., Коротченко В.С., Супрунчук В.И. Очистка хромсодержащих сточных вод отработанными травильными растворами //Химическая технология. – 1989. - № 6. – С. 89-91.
4. Чалый В.П. Гидроокиси металлов – Киев: Наукова думка, 1972. – 158 с.
5. Ходяшев Н.Б., Вольхин В.В., Козлова Г.А. Очистка хромсодержащих жидких отходов гальванического производства //Очистка воды и стоков: Межвуз. сб. науч. тр. – Томск: Изд-во НИИ высоких напряжений, 1994. – С. 87–91.
6. Халдеев Г.В., Кичигин В.И., Зубарева Г.И. Очистка и переработка сточных вод гальванического производства: Учеб. пособие по спецкурсу – Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2005. – С. 8-9.
7. Stumm M., Morgan I.I. Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters – J. Wiley & Sons. Inc., 1996 – P. 272-275, 366.

Л. М. Котляр д.ф.-м.н., Г. Ю. Шакирова

Камская государственная инженерно-экономическая академия
автомеханический факультет
кафедра электротехники и электроники
Россия, Набережные Челны
guzya81@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОДОМ

Приведенный анализ и экспериментальные исследования электрического разряда между стальным электродом и жидким катодом позволили получить вольтамперные характеристики, зависимости плотности тока от тока разряда, распределение потенциала и напряженности электрического поля. Применяв критерии подобия свободных дуг, получены эмпирические уравнения для расчета плазменных электротермических установок.

Ключевые слова: электрический разряд, вольтамперная характеристика, диффузия заряженных частиц, положительный столб, плазма, критериальные уравнения.

В настоящее время появился интерес к нетрадиционным источникам плазмы, в котором одним из электродов является электролит [2]. Такие разряды могут пользоваться в плазменной технологии для нанесения высококачественных покрытий, очистки и оксидирования поверхностей твердых тел, нагрев металлов и сплавов [4].

Несмотря на большие возможности использования разряда между твердым и жидким электродами, мало изучены физические процессы, протекающие в нем, а так же взаимодействие электрического разряда с поверхностями материалов.

Основной целью работы является установление роли электронов в механизме поддержания электрического разряда между металлическим и электролитическим электродами.

В связи с этим проведены экспериментальные исследования электрического разряда между стальным анодом и жидким катодом и получены вольтамперные характеристики (ВАХ) (рис.1,2); зависимостей плотности тока на жидком и металлическом электродах (рис.3,4); распределения потенциала и напряженности электрического разряда (рис.5), при давлении $P = 1333$ Па и $P = 10^5$ Па.

Экспериментальные исследования электрического разряда проведены в широком диапазоне параметров межэлектродного расстояния $l = 2-40$ мм, давлении $P = 1333 - 10^5$ Па, тока разряда $I = 0,05-10$ А, диаметр стального электрода $\varnothing = 3-10$ мм.

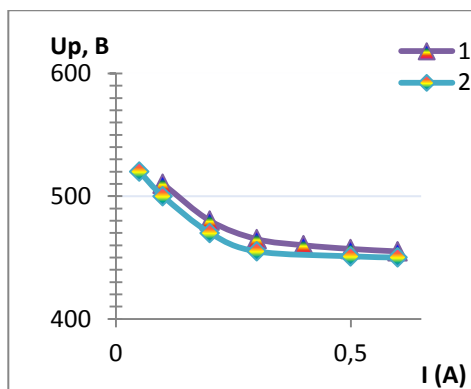


Рис.1. ВАХ разряда при $P = 1333$ Па, $l = 10$ мм, ϕ_a 4мм; 1 катод – H₂O, 2 катод – CuSO₄- 20%.

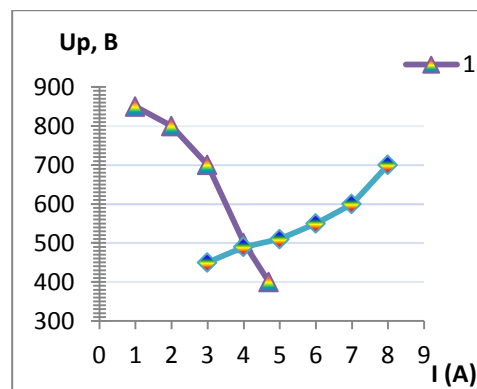


Рис.2. ВАХ разряда при $P = 10^5$ Па, $l = 10$ мм, ϕ_a 4мм; 1 катод – H₂O, 2 катод – CuSO₄- 20%.

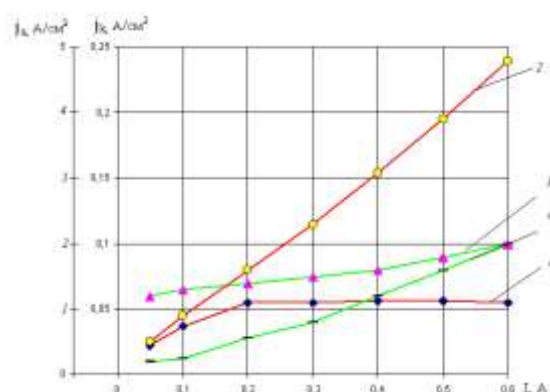


Рис.3. Зависимость плотности тока на жидком катоде и стальном аноде от тока при $P = 1333$ Па, $l = 10$ мм; 1,2 – H₂O; 3,4 – CuSO₄- 20%; 1,3 – j_k , 2,4 – j_a .

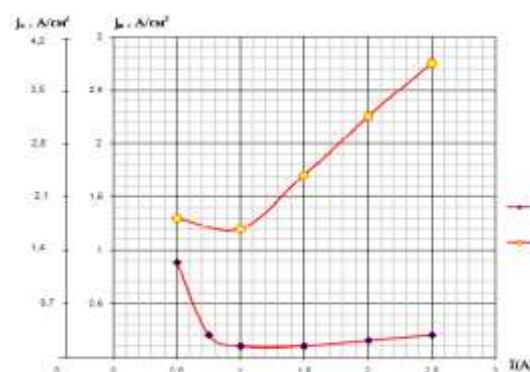


Рис.4. Зависимость плотности тока на жидком катоде технической воды, и стальном аноде от тока разряда, при $P = 10^5$ Па, $l = 10$ мм; 1 – j_k ; 2 – j_a .

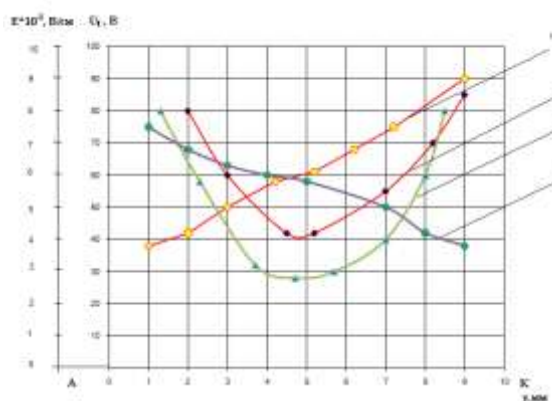


Рис.5. Распределение потенциала и напряженность электрического поля при $P = 1333$ Па, $l = 10$ мм, $I = 0.1$ А; 1, 2 – техническая вода; 3,4 – CuSO₄- 20%; 1, 3 – U_g ; 2, 4 – E .

Анализ экспериментальных исследований, говорит о том, что горение разряда с электролитными катодом приводит к образованию химически активных частиц между

раствором и зоной плазмы, в инициировании которых основную роль играет бомбардировка раствора идентичными ионами. Свойства разряда и эффективность химической активации растворов в сильной степени зависит от кинетики процессов переноса. Свойства разрядной плазмы описываются уравнением газовой динамики, которые представляют собой законы сохранения массы, импульса и энергии, а так же системой уравнения Максвелла для классической электродинамики. Основным механизмом ионизации нейтральных частиц является ионизация прямым электронным ударом, то в гидродинамическом приближении уравнения неразрывности заряженных частиц имеет вид: [1]

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \text{div } \vec{\Gamma}_e = \alpha n_e - \beta_{ep} n_e n_p - \alpha_a n_e + \alpha_d n_e + q_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} + \text{div } \vec{\Gamma}_p = \alpha n_e - \beta_{ep} n_e n_p - \beta_{np} n_n n_p + q_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_n}{\partial t} + \text{div } \vec{\Gamma}_n = \alpha_a n_e - \alpha_d n_n - \beta_{np} n_n n_p \quad (3)$$

$\vec{\Gamma}_e, \vec{\Gamma}_p, \vec{\Gamma}_n$ - плотности потоков электронов, положительных и отрицательных токов,

q_i - мощность внешних источников ионизации. Коэффициенты элементарных процессов общеприняты.

Разряд с жидким электролитным катодом является многоканальным, а свойства разряда практически не меняются при изменении межэлектродного расстояния в широких пределах и не изменяется напряженность электрического поля.

Диффузия заряженных частиц в разрядах повышенного давления является амбиполярной. При больших плотностях частиц, что имеет место в разрядах атмосферного давления, можно пренебрегать диффузией заряженных частиц. Состав и перенос свойства плазмы электролитов мало изучены. Отсутствие данных о коэффициентах ионизации нейтральных частиц, рекомбинации ионов, а так же данных теплопроводности плазмы и подвижности электронов не позволяют выполнить точные численные расчеты параметров положительного столба разряда с жидким электролитным катодом.

По полученным характеристикам рассмотрены критериальные уравнение, необходимые для обобщения характеристик электрического разряда между электролитическим катодом и металлическим анодом при отсутствии вынужденной конвекции (рис.6,7). Известные критериальные обобщения ВАХ относятся к дугам, стабилизированным в канале с потоками газа [3].

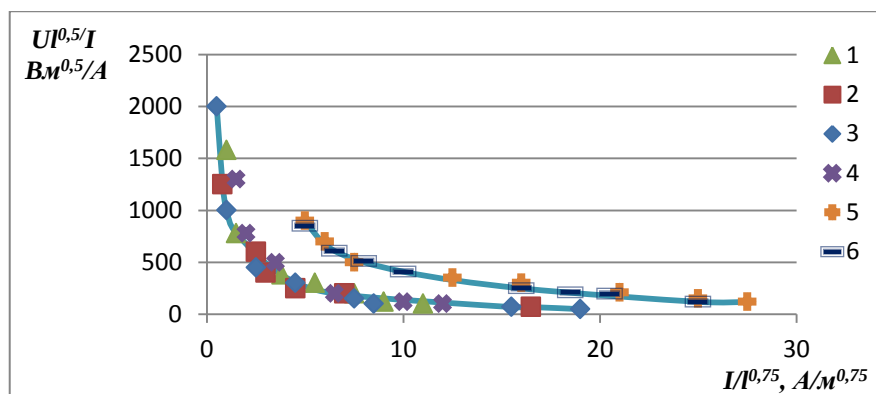


Рис.6. Обобщенная ВАХ разряда 1-4 при $P=1333\text{Па}$; 5-6 при $P=10^5\text{ Па}$; 1 - $l=0,02\text{м}$; 2 - $l=0,04\text{м}$; катод техническая вода; 3 - $l=0,03\text{м}$; 4 - $l=0,01\text{м}$; катод CuSO_4 20%; 5 - $l=0,005\text{м}$; катод дистиллированная вода; 6 - $l=0,005\text{м}$ катод техническая вода.

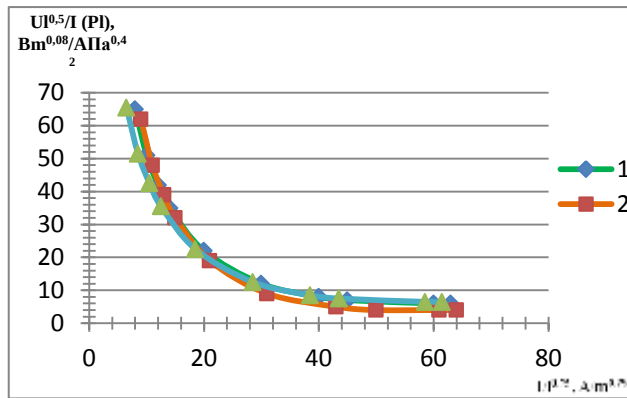


Рис.7. Обобщенная ВАХ с жидким катодом из технической воды
 1 - $l = 0,002\text{м}$, $P = 10^5\text{Па}$; 2 - $l = 0,0027$, $P = 7998\text{Па}$; 3 - $l = 0,015\text{ м}$, $P = 2666\text{Па}$.

Будем считать, что у сравниваемых разрядов аноды являются геометрически подобными и изготовленными из одного и того же материала. В этих условиях безразмерные интегральные характеристики разряда Ψ в первом приближении являются функциями определяющих критериев подобия и записываются в виде:

$$\Psi = f_1 \left(\frac{l^2}{l^{1.5} g^{0.5} X_R T_R}, \frac{l P Q_{el}}{K T_R} \right) \quad (4)$$

Здесь X_R - теплопроводность исходного газа при температуре T_R , g - ускорение свободного падения, Q_{el} - сечения столкновения электрона с молекулой, l - ток разряда, P - давление, l - межэлектродное расстояние, K - постоянная Больцмана.

Локальные безразмерные характеристики разряда зависят и от безмерных координат: $\bar{r} = \frac{r}{l}$, $\bar{y} = \frac{y}{l}$, где r и y - расстояние до данной точки соответственно от оси разряда и поверхности жидкого катода. Поэтому распределения безразмерных параметров разряда Ψ_1 описывается критериальными уравнениями:

$$\Psi_1 = \left(\frac{l^2}{l^{1.5} g^{0.5} X_R T_R}, \frac{l P Q_{ea}}{K T_R}, \frac{r}{l}, \frac{y}{l} \right) \quad (5)$$

Критерий подобия $\frac{l^2}{l^{1.5} g^{0.5} X_R T_R}$ достаточно подробно рассмотрен и был использован [1] для обобщения ВАХ открытых дуг и – для обобщенных ВАХ [2] разряда с жидким катодом.

Критерий подобия $\frac{l P Q_{ea}}{K T_R}$ представляет собой обратное значение числа Кнудсена для электронов. Это следует из того что средняя длина свободного пробега электрона определяется как $\lambda_e = \frac{1}{n_a Q_{ae}} = \frac{K T_R}{P Q_{ea}}$

В работе [3] значение P было постоянным, а величина l изменялась незначительно. Поэтому влияние числа Кнудсена на обобщение характеристики разряда осталось невыявленным. В экспериментах данной работы число Кнудсена изменилось на несколько порядков, что должно позволить установить его роль в обобщенных характеристиках.

Безразмерное напряжение можно определить как

$$\bar{U} = \frac{U_p l^{0.5} g^{0.5}}{I} \quad (6)$$

В первом приближении величины X_R , g , T_R , Q_{la} можно считать постоянными. Отбросив их в (1) и (3), для напряжения разряда получим упрощенную структуру уравнения

$$\frac{U_p l^{0.5}}{I} = f_2\left(\frac{I^2}{l^{1.5}}, pl\right) \quad (7)$$

На рисунке 6 показана обобщенная ВАХ разряда при $P=1333$ Па для различных l . Экспериментальные точки кривых 1 и 2 получены для катода из технической воды, точки 3 и 4 – для катода из 20% раствора CuSO_4 . Точка 5 – для дистиллированной воды, а точка 6 – для технической воды при $P=10^5$ Па. Как видно, обобщенные характеристики для двух электролитов практически совпадают и в указанном диапазоне изменение межэлектродного расстояния экспериментальные точки ложатся на одну линию, определяемую уравнением:

$$\frac{U_p l^{0.5}}{I} = a_1 \left(\frac{I}{l^{0.75}}\right)^{-1.1}, \quad a_1 = 1480 U_p I^{0.1} l^{-0.325} \quad (8)$$

Однако, при изменении давления в широком диапазоне расслоением графиков зависимости $\frac{U_p l^{0.5}}{I}$ от $\frac{I}{l^{0.75}}$ нельзя пренебрегать. Указанная зависимость для давления 10^5 Па и $l = 5$ мм приведена на рисунке 6. Обобщенная ВАХ разряда определяется уравнением:

$$\frac{U_p l^{0.5}}{I} = a_2 \left(\frac{I}{l^{0.75}}\right)^{-1.14}, \quad a_2 = 6600 U_p I^{0.14} l^{-0.345} \quad (9)$$

Здесь в качестве катодов использованы дистиллированная вода (точки 1) и техническая вода (точки 2). Сравнивая графики на рисунке 6 видно, что они количественно сильно отличаются друг от друга.

На рисунке 6 представлена обобщенная ВАХ разряда с учетом их зависимости от параметров pl . Она в диапазоне параметров $I = 0,1 - 0,6$ А, $P = 1333 - 10^5$ Па, $l = 2 - 40$ мм описывается формулой

$$\frac{U_p l^{0.5}}{I} = a_3 \left(\frac{I}{l^{0.75}}\right)^{-1.1} (pl)^{0.42}, \quad a_3 = 430 B A^{0.1} \text{Па}^{-0.42} \text{м}^{-0.745} \quad (10)$$

Максимальное среднеквадратичное отклонение экспериментальных значений U_p от расчетных составляет 10%. В указанном выше диапазоне параметров минимальное значение напряженности электрического поля обобщается формулой

$$\frac{E_{\min} l^{1.5}}{I} = b_1 \left(\frac{I}{l^{0.75}}\right)^{-0.77} (pl)^{0.02}, \quad b_1 = 24 A^{0.1} B \text{Па}^{-0.57} \text{м}^{-0.6475} \quad (11)$$

Для расчета расстояния от анода до сечения, где достигается минимальное значение напряженности электрического поля, получена формула

$$\frac{Y_m}{l} = b_2 \left(\frac{I}{l^{0.75}}\right)^{1.9} (pl)^{0.02}, \quad b_2 = 0.053 A^{-1.9} \text{Па}^{-0.02} \text{м}^{1.405} \quad (12)$$

Распределение напряженности электрического поля в положительном столбе описывается формулами:

$$\begin{aligned} \frac{(E - E_{\min}) l^{1.5}}{I} &= C_1 \left(\frac{I}{l^{0.75}}\right)^{-1.85} (pl)^{0.18} \left(\frac{Y - Y_m}{l}\right)^2, \quad Y < Y_m \\ C_1 &= 325 A^{0.85} B \text{Па}^{-0.18} \text{м}^{-1.0675} \\ \frac{(E - E_{\min}) l^{1.5}}{I} &= C_2 \left(\frac{I}{l^{0.75}}\right)^{2.54} (pl)^{0.44} \left(\frac{Y - Y_m}{l}\right)^2, \quad Y > Y_m \\ C_2 &= 1.7 A^{-3.54} B \text{Па}^{-0.44} \text{м}^{1.965} \end{aligned} \quad (13)$$

В сечении $Y = Y_m$ значение E определяется формулой (11). В окрестности сечения Y_m величину E следует находить с помощью интерполяционной кривой, проходящей через точку $(Y_m, E_{\min})$. При этом интерполяционную кривую нужно проводить так, что бы она имела минимум в точке $(Y_m, E_{\min})$. Формулы (8), (9), и (10) позволяют рассчитать напряженность электрического поля с погрешностью не более 15% в диапазоне параметров $I = 0,1 - 0,6$ А, $P = 1333 - 10^5$ Па, $l = (2 - 40) 10^{-3}$ м.

Полученные экспериментальные исследования и эмпирические уравнения можно рекомендовать для использования в расчетах технологических плазменных электротермических установок с жидким катодом и металлическим анодом.

Список литературы:

1. *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Москва, 1963г. –708с.
2. *Гайсин ФМ, Сон Э.Е.* Электрические процессы в разрядах с твердыми и жидкими электродами. Свердловск, 1989г.
3. *Даутов Г.Ю, Жуков М.Ф.* Некоторые обобщения исследований электрических дуг/ Прикладная механика и техническая физика. 1965г. №2 97-105с.
4. *Ясногородский И.З.* Нагрев металлов и сплавов в электролите. Москва, 1949

Д. В. Куделин, Т. Н. Несиоловская д.т.н.

Ярославский государственный технический университет
химико-технологический факультет
кафедра «Химия и технология переработки полимеров»
Россия, г. Ярославль
nesiolovskayatn@ystu.ru

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТОНКОСТЕННЫХ РЕЗИНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Сформулирован подход к проектированию тонкостенных резиновых изделий, включающий решение трех взаимосвязанных задач: разработку методов лабораторных испытаний, адекватно воспроизводящих напряженно-деформированное состояние изделий; описание кинетики развития дефектности материала; моделирование процессов, вызывающих максимальное повреждение материала.

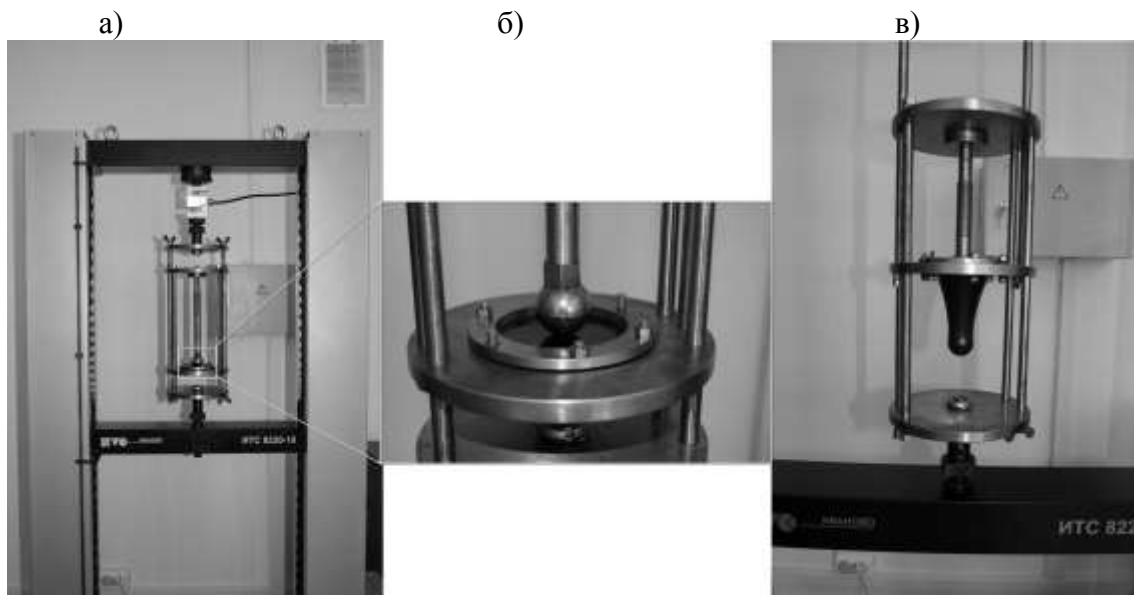
Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, кинетика накопления дефектов, разрушение.

Тонкостенные резиновые изделия (например, мембраны) применяются в различных отраслях промышленности, что обуславливает широкий спектр используемых эластомеров. Проектирование таких РТИ в подавляющем большинстве основывается на деформационно-прочностных характеристиках материалов, полученных в условиях простого одноосного растяжения, которое не воспроизводит реальных условий нагружения, т.к. в условиях эксплуатации мембраны работают в сложнонапряженном состоянии [2]. Современной тенденцией проектирования является анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) резиновых изделий с использованием метода конечных элементов [3]. Адекватность конечно-элементного подхода зависит от достоверности методов испытания образцов, используемых для идентификации НДС изделий.

В этой связи целью настоящей работы явилось создание комплексного подхода, требующего решить три взаимосвязанные задачи:

- разработать методы лабораторных испытаний, адекватно воспроизводящих напряженно-деформированного состояние мембран;
- понять причины и развитие накопления дефектности материала;
- выяснить возможности управления процессами, вызывающими максимальное повреждение материала.

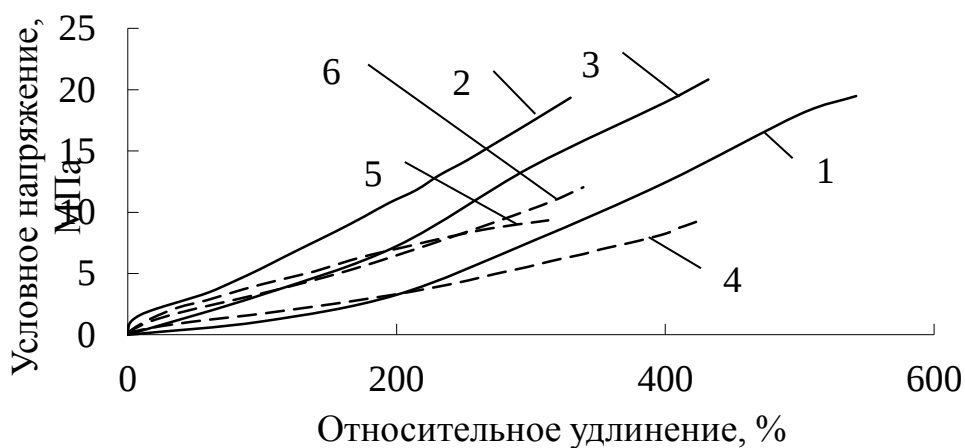
Анализ работы мембран показал, что реальные деформации в них, развивающиеся в процессе растяжения, имеют сложный характер, изменяющийся от центра к периферии образца. Сложнодеформированное состояние работающей мембраны было предложено воспроизводить за счет продавливания резиновых диафрагм сферическим индентором (рисунок 1).



а) – приставка, смонтированная на разрывной машине;
 б) – диафрагма, установленная в зажимном устройстве приставки;
 в) – диафрагма в процессе испытания.

Рис. 1– Процесс деформирования диафрагмы.

Испытания широкого спектра резин показали, что уровень их деформационно-прочностных свойств в сложнапряженном состоянии ниже, чем при одноосном растяжении (рисунок 2). При этом факторы, влияющие на усиление резин за счет ее ориентационного упрочнения при одноосном растяжении, в сложном НДС проявляют гораздо меньшее влияние. Значительно большую роль играют константы упругости резины при малых деформациях



1, 2, 3 – одноосное растяжение; 4, 5, 6 –сложно-деформированное состояние. Тип резины: 1,4 – на основе СКИ-3; 2, 5 – на основе СКМС-30АРК; 3, 6 – на основе БНКС-28

Рис. 2– Зависимости напряжение – деформация от типа резины.

Процесс накопления дефектов при деформации рассматривался в аспекте кинетической концепции прочности [1], в соответствии с которой считают, что исходные свойства материала изменяются в процессе деформирования еще до наступления визуально наблюдаемого разрушения. В связи с тем, что задачу о напряженно-деформированном состоянии композита в строгой постановке решить невозможно, описание вязкоупругих свойств резин проводилось в терминах релаксации сетки межмолекулярных связей различной энергии, а разрушение сетки моделировалось в виде уравнения деструкции цепей под нагрузкой.

В равновесном состоянии концентрация цепей сетки, несущих нагрузку, является величиной постоянной. Для системы, выведенной из состояния равновесия, зависимость неравновесного напряжения от деформации в эластомерной матрице можно рассматривать как

$$\sigma_m(\lambda) = \nu \cdot \frac{d\Psi}{d\lambda} \quad (1)$$

где ν - зависящая от времени концентрация цепей сетки, несущих нагрузку;

Ψ - свободная энергия деформированной цепи.

Концентрация активных цепей сетки может быть выражена через концентрацию узлов различной энергии:

$$\nu = \sum n_i + \sum n_j \quad (2)$$

где $\sum n_i$ - все виды тетрафункциональных узлов;

$\sum n_j$ - все виды "поверхностных" узлов.

Разрушению каждого типа связей соответствует определенный релаксационный процесс и в случае, когда связи стремятся к равновесному состоянию, кинетическое уравнение в общем виде можно записать как

$$\frac{dn_{i,j}}{dt} = -k_{oi,oj} \cdot \exp\left\{-\frac{E_{i,j}}{R \cdot T}\right\} \cdot (n_{i,j} - n_{ie,je}) \quad (3)$$

Таким образом, при заданном режиме деформирования $\lambda(t)$ можно в любой момент времени рассчитать зависимость напряжения от деформации в матрице $\sigma_m(\lambda)$.

Характер разрушения диафрагм индифферентен по отношению к типу эластомера и представляет отверстие в зоне контакта индентора с диафрагмой (рисунок 3).



Рис. 3– Характер разрушения диафрагм.

Для описания процесса разрушения резин необходимо было записать уравнение кинетики деструкции цепей в наиболее напряженной области. Предложенная модель имеет 2 параметра идентификации:

- P_1 , характеризующий неоднородность распределения напряжений в матрице вблизи поверхности активного наполнителя;
- P_2 , характеризующий интенсивность влияния напряжения на константу скорости деструкции эластомерных цепей.

Решение задачи идентификации параметров выявило хорошую согласованность с теоретическими оценками. Параметр P_1 монотонно убывает с ростом содержания техуглерода, поскольку расстояние между частицами уменьшается и распределение напряжений становится более однородным, а параметр P_2 возрастает, свидетельствуя о том, что чувствительность сетки к действию напряжения возрастает.

Превалирующим влиянием того или иного параметра непротиворечиво объясняются отличия в прочности композитов на основе различных матриц. Так, для композитов на основе низкопрочных матриц (СКМС-30АРК) превалирует влияние параметра P_1 , что в совокупности с адсорбцией микроблоков аморфного эластомера на техуглероде приводит к повышению прочности.

Для композитов на основе высокопрочных матриц, где техуглерод в силу различных причин не дает возможности реализовать свойства матрицы, доминирует влияние параметра P_2 .

Увеличение интенсивности влияния напряжения на константу скорости деструкции эластомерных цепей с ростом содержания техуглерода свидетельствует о том, что процесс разрушения в композите начинается в наиболее напряженной области вблизи поверхности индентора и эта область менее прочная по сравнению с матрицей.

Управление процессами, вызывающими максимальное повреждение материала, должны быть направлены на снижение чувствительности сетки. Прогнозирование долговечности тонкостенных резиновых изделий предложено проводить с использованием конечно-элементного подхода. Перед проведением расчетов была проведена разбивка на сетку конечных элементов с увеличением густоты в зоне контакта индентора и мембраны (рисунок 4).

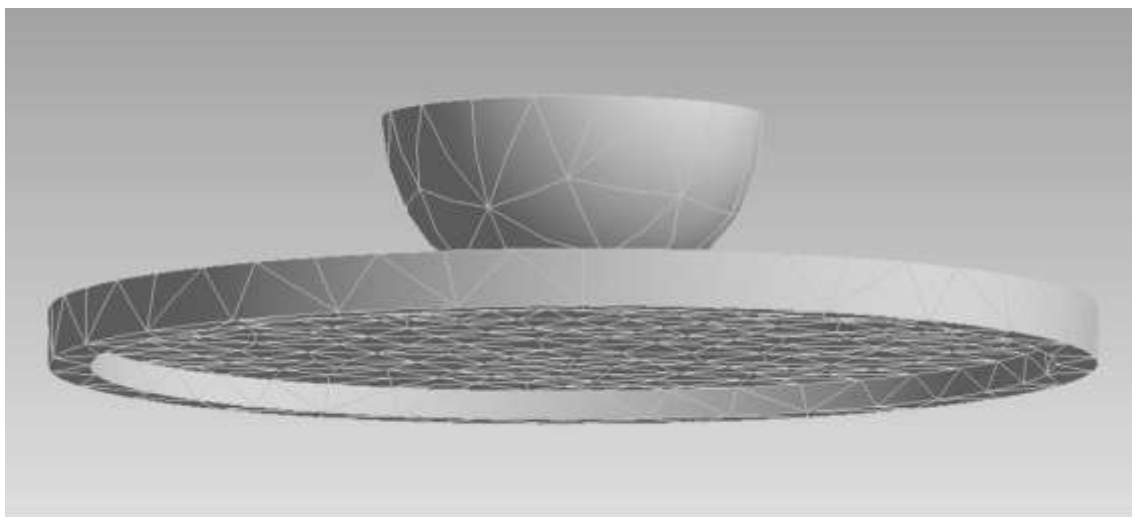


Рис. 4– Разбиение мембраны на сетку конечных элементов.

Таким образом, сочетание экспериментального и теоретического подходов позволяет адекватно воспроизводить напряженно-деформированное состояние

мембран, понять причины и кинетику накопления дефектности материала, выяснить возможности управления процессами, вызывающими максимальное повреждение материала.

Список литературы:

1. Зуев Ю.С. Разрушение эластомеров в условиях, характерных для эксплуатации. – М.: Химия, 1980. – 288 с.
2. Манин В.Н. Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации. – Л.: Химия, 1980. – 248 с.
3. Рикардс Р.Б. Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин. – Рига: Зинатне, 1988. – 284 с.

**Л. Е. Мальцев, д.ф.-м.н., Т. В. Мальцева, д.ф.-м.н., А. В. Минаева,
А. В. Набоков к.т.н.**

Тюменский государственный архитектурно-строительный университет
строительный институт
кафедра строительных конструкций
Россия, г. Тюмень
stroin@tgasu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ АРМИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ПЕСЧАНОГО ЦИЛИНДРА

В статье на основе решения осесимметричной задачи Ламе предложена методика расчета радиальных перемещений в элементе из геосинтетического материала, армирующего песчаную сваю.

Ключевые слова: песчаная свая, армирующий элемент, геосинтетический материал, радиальные и тангенциальные напряжения, радиальные перемещения, осесимметричная задача Ламе.

Одним из способов повышения эффективности фундаментостроения является применение новых проектных и конструктивных решений свайных фундаментов с учетом природно-климатических и грунтовых условий района строительства.

В работах [1,2] предложена конструкция фундамента в виде песчаного массива цилиндрической формы, армированного по контуру геосинтетическим водопроницаемым элементом. В силу малых размеров ячейки песок за пределы армирующего элемента не выходит. Рассматриваемая конструкция прошла ряд лабораторных и натурных экспериментов. Кроме того, была решена в декартовой системе координат задача по определению напряженно-деформированного состояния песчаного армированного цилиндра, как задача плоской деформации [1,3].

В статье определяются радиальные перемещения армирующего элемента песчаного цилиндра с помощью решения плоской осесимметричной задачи Ламе. Песчаный армированный цилиндр рассматривается в пространстве, но при этом напряжения и деформации определяются для плоского сечения цилиндра с учетом осевого напряжения σ_z , которое задается в виде квадратичной функции:

$$\sigma_z = 11,36 - 0,025z + 9,85 * 10^{-6}z^2 \quad (1)$$

Параметры функции найдены по экспериментальным данным с применением метода наименьших квадратов (рис.1).

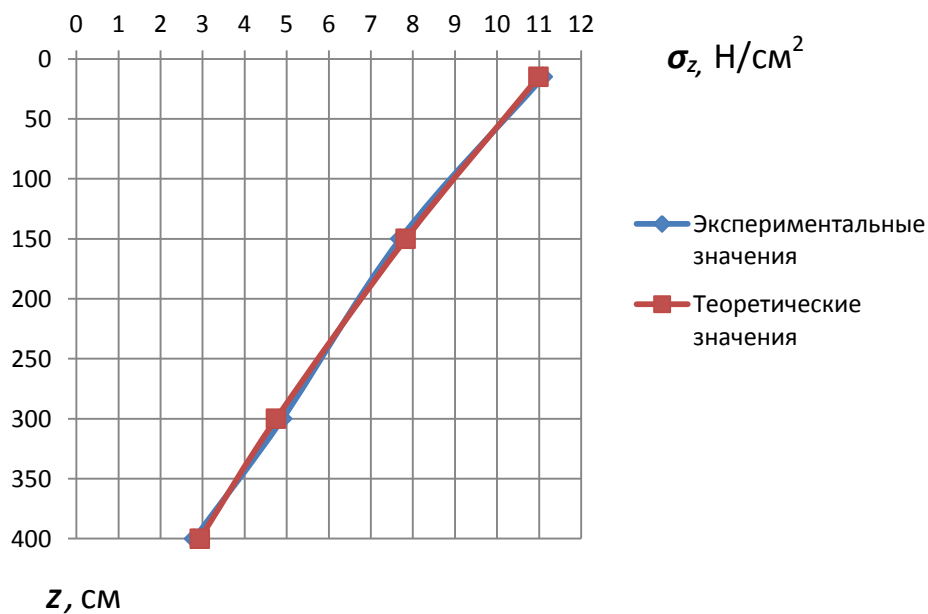
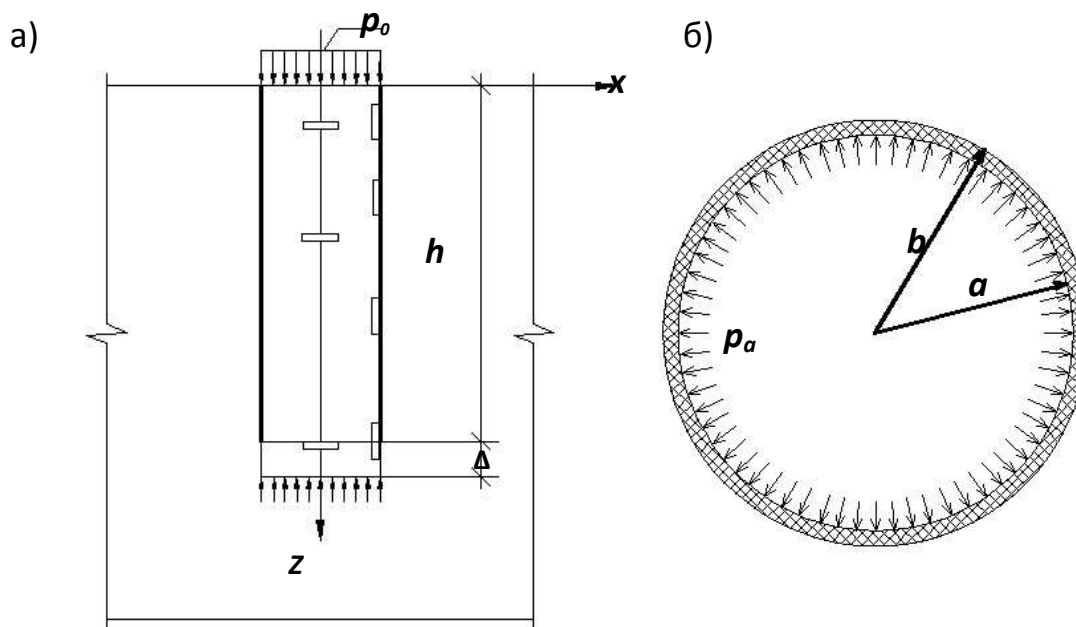


Рис. 1. Графики распределения нормальных вертикальных напряжений по высоте песчаного армированного массива.

Максимальное расхождение теоретического напряжения с экспериментальным значением составляет 4,9%.

Армирующий элемент (геосетка), рассматривается как тонкостенный цилиндр, нагруженный внутренним давлением от песка p_a (рис.2б), a – внутренний радиус цилиндра, b – внешний радиус цилиндра, p_0 – вертикальная нагрузка на песчаный цилиндр, Δ – вертикальное перемещение пяты цилиндра.



**Рис. 2. Расчетная схема песчаного армированного цилиндра:
а) продольный разрез; б) поперечный разрез.**

Приведем систему уравнений задачи [4].

Относительные удлинения в цилиндре в радиальном и окружном направлениях ε_r и ε_t выражаются через радиальные перемещения u :

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad (2)$$

$$\varepsilon_t = \frac{u}{r} \quad (3)$$

Уравнение равновесия, записанное через радиальные и тангенциальные напряжения:

$$\frac{d}{dr}(\sigma_r r) - \sigma_t = 0 \quad (4)$$

Обобщенный закон Гука:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_t + \sigma_z)]; \quad \varepsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t - \nu(\sigma_r + \sigma_z)] \quad (5)$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Решая систему уравнений (2) – (5), получим формулы определения напряжений и радиальных перемещений [4]:

$$\sigma_r = A - \frac{B}{r^2}; \quad \sigma_t = A + \frac{B}{r^2};$$

$$u = \frac{1}{E} [A(1 - \nu)]r + B(1 + \nu) \frac{1}{r} - \nu \sigma_z r.$$

Определим значения произвольных постоянных A и B из граничных условий: $\sigma_r(r = a) = -p_a$; $\sigma_r(r = b) = 0$, тогда

$$\sigma_r = \frac{p_a a^2}{b^2 - a^2} - \frac{a^2 b^2}{r^2} \frac{p_a}{b^2 - a^2}; \quad \sigma_t = \frac{p_a a^2}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2}{r^2} \frac{p_a}{b^2 - a^2}; \quad (6)$$

$$u = \frac{1 - \nu}{E} \frac{p_a a^2}{b^2 - a^2} r + \frac{1 + \nu}{E} \frac{a^2 b^2}{r} \frac{p_a}{b^2 - a^2} - \frac{\nu}{E} \sigma_z r. \quad (7)$$

Наличие осевого напряжения σ_z сказывается только на радиальном перемещении u .

Подставив функцию осевого напряжения σ_z (1) в выражение (7), получим формулу для определения радиального перемещения в стенке цилиндра (геосетке), зависящего только от координаты Z :

$$u = \frac{1 - \nu}{E} \frac{p_a a^2}{b^2 - a^2} r + \frac{1 + \nu}{E} \frac{a^2 b^2}{r^2} \frac{p_a}{b^2 - a^2} - \frac{\nu}{E} r (11,36 - 0,025 z_i + 9,85 * 10^{-6} z_i^2) \quad (8)$$

Расчет радиальных перемещений геосетки был выполнен по данным натурного эксперимента [1].

Длина песчаного армированного цилиндра $L=3$ м, а диаметр $d=0,8$ м.

Экспериментальные значения внутреннего давления p_a приведены на рисунке 3.

Схема расположения мессдоз для измерения общих напряжений в теле песчаного армированного цилиндра представлена на рисунке 2а).

Коэффициент Пуассона ν геосинтетического материала, который представляет собой сетку с ячейкой $0,02 \times 0,02$ м, принимаем равным $0,05$.

Значение модуля упругости геосетки $E = 1,7 \cdot 10^6$ Н/см², было получено путем экспериментальных исследований механических характеристик геосинтетического материала, проведенных в лаборатории строительных конструкций ТюмГАСУ.

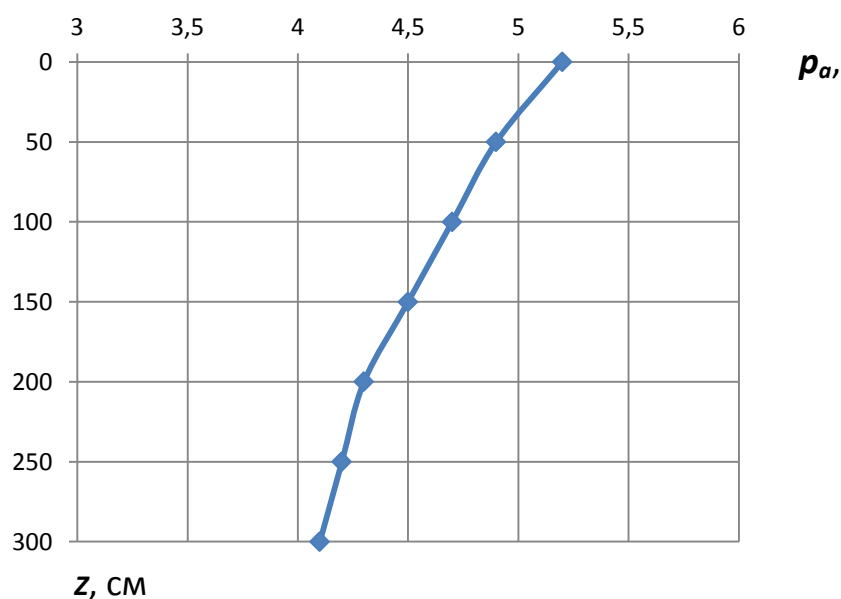


Рис.3. Графики распределения внутреннего давления по высоте песчаного армированного цилиндра.

График радиальных перемещений внешней поверхности элемента из геосинтетического материала по глубине песчаного цилиндра приведен на рисунке 4.

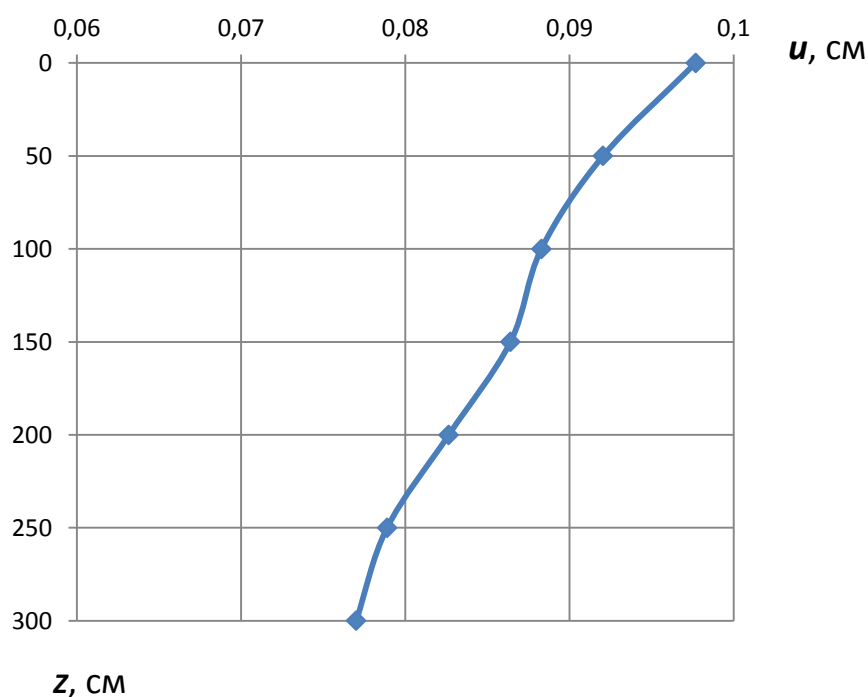


Рис. 4. График распределения радиальных перемещений элемента ($r = b$) геосетки по глубине песчаного цилиндра.

Предложенная методика позволяет рассчитать радиальные перемещения на наружной поверхности элемента из геосинтетического материала, армирующего песчаный цилиндр. Эти перемещения в верхнем сечении сваи составляют 0,24 % от наружного диаметра армирующего элемента, а в нижнем сечении – 0,19 %, т.к. эти

значения являются достаточно малыми, то можно считать, что геосетка подобрана достаточно конструктивно.

Список литературы:

1. Бай В.Ф., Краев А.Н., Набоков А.В., Новиков Ю.А. Исследование напряженно-деформированного состояния основания с внедренной песчаной армированной сваей в натурных условиях//Научно-технический вестник Поволжья №2/ Казань: 2011. – С. 30-33.
2. Пат. 2361979, МПК⁵¹ Е 02 D 27/08. Способ повышения несущей способности и устойчивости фундаментов на слабых водонасыщенных грунтах – 2009. – Бюл. №20.
3. Мальцева Т.В., Воронцов В.В., Крижанивская Т.В., Минаева А.В. Математическое моделирование деформированного состояния слабого водонасыщенного основания//Научно-технический вестник Поволжья/ Казань: 2011. – С. 69-73.
4. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. - 592 с.

Нгуен Ба Нгок, А. Ф. Тузовский

Томский политехнический университет
Институт кибернетики, кафедра оптимизации систем управления
Россия, г. Томск
nguyen_bn@hotmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ ХРАНЕНИЯ СЛОВАРЯ ТРИПЛЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛОВЫХ ИДЕНТИФИКАТОРОВ

Словарь триплетов является важным компонентом поисковых систем по метаописаниям. В статье представлен метод замена каждого уникального элемента триплетов на числовой идентификатор с помощью словаря строк URI. Также описан алгоритм сжатия словаря URI путем удаления общих фрагментов.

Ключевые слова: сжатие без потери, словарь триплетов, семантические метаописания, поисковая система.

Введение

Знаниями о документах традиционно управляли с помощью метаданных, которые учитывают область данных, связанных с документом, например его автор, и обычно часть его содержания, например ключевые слова. Семантический веб предлагает аннотирование содержания документов с использованием семантической информации от онтологий домена. В результате этого получают документы с разметками для машинной интерпретации, с которыми работают агенты и сервисы семантического веба [1].

С использованием технологий семантического веба, в работе [2] предлагается метод создания семантических метаописаний документов, которые представляют собой набор простых высказываний вида «субъект–предикат–объект». Такие простые высказывания называются *RDF*–триплетами (или просто триплетами). С помощью предложенной технологии возможно значительное улучшение в управлении документами, и в частности – решении проблемы информационного поиска.

На основе таких метаописаний продвигается новая концепция семантического поиска – поисковая система по семантическим метаописаниям (далее ПССМ), в которой документы и запросы состоят из множеств триплетов. В данной статье рассматривается одна из проблем создания таких систем информационного поиска – проблема оптимизации хранения словаря триплетов.

Основными структурами данных в поисковых системах являются словарь и инвертированный индекс [3]. На рис. 1 представлена схема словаря и инвертированного индекса ПССМ.

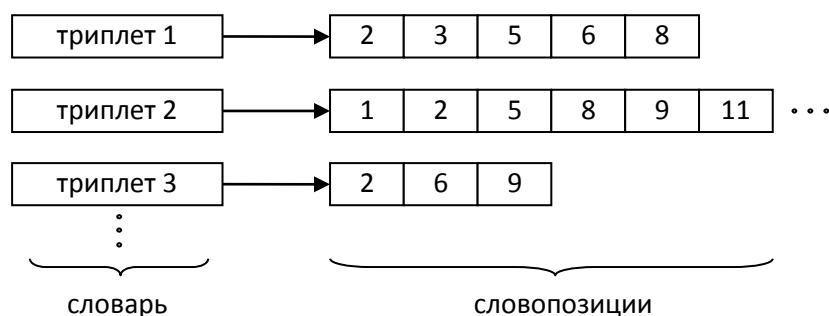


Рис. 1. Инвертированный индекс

Обычно каждая ячейка словаря содержит один уникальный триплет и ссылку на список файлов метаописания (словопозиции), которые содержат данный триплет. Такая структура данных обеспечивает быстрое определение множеств документов, содержащих триплеты запроса.

Одним из основных факторов, влияющих на время отклика информационно-поисковой системы, является количество перемещений головки диска, необходимое для обработки запроса. Если части словаря размещены на диске, то для обработки запросов потребуется намного больше перемещений, что приводит к понижению производительности системы. Следовательно, требуется его размещение в оперативной памяти, или, по крайней мере, большей его части для обеспечения высокой производительности системы [3].

В системах поиска по ключевым словам лексиконы крупных коллекций документов обычно помещаются в памяти стандартных настольных компьютеров. Однако в поисковых системах по семантическим метаописаниям размер триплетов обычно в разы превышает размер терминов естественного языка. В связи с этим, разработка метода сжатия, обеспечивающего сохранения большого количества триплетов в оперативной памяти и их быстрого поиска является актуальной задачей.

Было известно, что каждый триплет состоит из трех компонентов (*s p o*), где *s* – субъект (*subject*); *p* – предикат (*predicate*); *o* – объект (*object*). Пример триплета показан в табл. 1.

Таблица 1. Триплет в формате *N-triple*.

Субъект	Предикат	Объект
< http://dbpedia.org/resource/Hezekiah_Niles >	< http://purl.org/dc/terms/subject >	< http://dbpedia.org/resource/Cate_gory:Newspaper_editors >

При этом *s* и *p* – это строки *URI*, а *o* – либо строка *URI*, либо литеральное значение. В данной статье рассматривается ситуация, когда все компоненты триплета являются строками *URI*. Проблема организации коллекции литеральных значений рассматривается в [3].

Использование триплетов в полном виде (как в примере) в системах ПССМ непрактично, а при больших объемах семантических баз знаний практически невозможно в связи с необходимостью больших объемов памяти для их хранения и процессорного времени для обработки. В данной статье предлагается метод представления триплетов в виде комбинации числовых идентификаторов.

Метод представления триплетов с использованием идентификаторов

Основная идея предлагаемого метода заключается в замене каждой уникальной строки *URI* коллекции триплетов на уникальный идентификатор, что приводит к уменьшению объемов оперативной памяти и повышению скорости работы с ними.

Преимуществом предлагаемого метода является то, что требуется меньше место для хранения каждого триплета (12 байт – в случае использования 4 байт для кодирования идентификаторов) по сравнению с хранением его в явном виде (128 байтов для триплета, представленного в табл. 1). Кроме того, время нахождения триплета также значительно сокращается, потому что сравнение числовых значений выполняется значительно быстрее, чем сравнение строковых значений.

Основной сложностью представления триплетов с использованием идентификаторов является организация словаря *URI*. Далее приведено описание организации словаря *URI* с использованием метода сжатия.

Алгоритм сжатия словаря *URI*

Методы сжатия словаря терминов в системах поиска по ключевым словам, например «словарь как строка» и «блочное сохранение», которые были описаны в [3], также применимы для словаря *URI*. Однако эти методы не учитывают особенности строки *URI* для достижения высокого коэффициента сжатия.

На основе метода «словарь как строка» в данной статье предлагается примитивный метод сжатия словаря *URI* – метод исключения общих фрагментов строки *URI* на основе сортировки, который является методом сжатия без потери, т. е., имеется возможность восстановления исходных данных [3].

Сжатие словаря *URI* выполняется в два этапа: сначала выполняется сортировка строки *URI* по алфавиту, затем удаление общих фрагментов. Сортировка коллекции строки *URI* выполняется идентично сортировке коллекции строковых значений, для решения которой имеются стандартные алгоритмы, поэтому не обсуждается в данной статье.

Алгоритм удаления общих фрагментов *URI* – может быть следующим образом описан на псевдокоде:

```
1: d[1] = 0; // d[i] – длина общего фрагмента;
2: p[1] = 1; // p[i] – указатель на строку, которая определяет общий фрагмент;
3: цикл i = 2 ... n
4:   d[i] = common(uri[i], uri[i - 1]); // определение длины общего фрагмента
5:   если d[i] > 0 то
6:     s[i] = delete(s[i], d[i]); // удаление общего фрагмента из s[i]
7:     цикл j = (i - 1) ... 1
8:       если d[i] > d[j] то
9:         p[i] = j; // для восстановления s[i] используется s[j]
10:      стоп;
11:   если d[i] = d[j] то
12:     p[i] = p[j]; // используется s[p[j]]
13:   стоп;
14: иначе
15:   p[i] = i;
```

На строке 4, выполняется сравнение *URI* на *i*-й позиции с предыдущей *URI* в списке для определения длины общего начального фрагмента двух строк.

Если длина общего фрагмента больше 0, то на строке 6 выполняется удаление общего фрагмента длиной *d[i]* и в строках 7 – 13 определяется индекс строки, которая

содержит данный общий фрагмент ($p[i]$). В противном случае (строка 15) i -я строка URI $s[i]$ останется без изменения.

Для декодирования строки $s[i]$ используется следующая рекурсивная функция:

```

1: декодирование ( $i$ )
2:     если  $d[i] = 0$  то
3:         возврат  $s[i]$ ;
4:     иначе
5:         tmp = декодирование( $p[i]$ );
6:         cmn = start(tmp,  $d[i]$ );
7:         возврат concat(cmn,  $s[i]$ ).
```

Если длина общего фрагмента i -й строки равна нулю, то возвращается сама строка $s[i]$ (строка 3). В противном случае, функция вызывается рекурсивно для декодирования строки $s[p[i]]$, затем восстанавливается удаленный фрагмент длиной $d[i]$ строки $s[i]$ через строки $s[p[i]]$ (строка 6, 7).

Структура словаря URI

Для сохранения множества URI после сжатия используется структура данных, которая представляется на рис. 2.

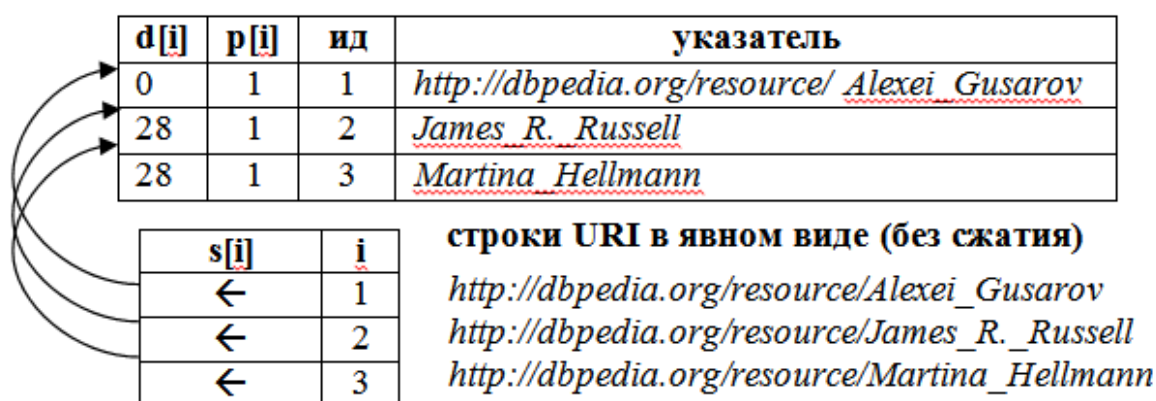


Рис. 2. Словарь URI с использованием метода сжатия.

Каждый i -й элемент словаря состоит из:

1. $d[i]$ – длина общего фрагмента, 1 байт;
2. $p[i]$ – индекс URI , которая имеет общий фрагмент длиной $d[i]$, 4 байта;
3. **ид** – идентификатор строки URI , 4 байта;
4. **указатель** на упрощенную строку URI , 4 байта.
5. Выделенный участок оперативной памяти (переменной длины) – для хранения строки URI (после удаления общего фрагмента длиной $d[i]$).

По сравнению с методом организация словаря «словарь как строка», в соответствии с которым каждый элемент словаря состоит из:

1. **ид** – 4 байт;
2. **указатель** – 4 байт;
3. Выделенный участок оперативной памяти (– переменной длины) – для хранения строки URI в явном виде.

В предлагаемом методе для сохранения дополнительных данных используется больше памяти – 5 байт (**d[i]** и **p[i]**). Однако для сохранения строки *URI* потребуется меньше памяти (**d[i]** байт). Следовательно, коэффициент сжатия по предлагаемому методу больше, чем по методу «словарь как строка» только в случае, если $d^*[i] > 5$, где $d^*[i]$ – среднее значение переменной **d[i]** (например, если строки *URI* начинаются от *http://...*, *data://...* и т.д.)

Эксперимент

Были выполнены два эксперимента: 1) определение требуемого объема памяти для хранения коллекции триплетов; 2) определение времени для поиска триплета в коллекции. Эксперименты были выполнены на персональном компьютере (ПС) со следующей конфигурацией: процессор – *Intel Core 2 Duo* – 1,80 GHz; оперативная память – 2 GB.

В качестве тестовых данных используются множества триплетов от *DBpedia* версии 3.7, которые являются структурными данными извлеченными из *Wikipedia*. Используемые множества данных перечисляются в табл. 2 (дата обращения 09/02/2012).

В эксперименте использовались следующие коллекции:

1. *Articles related geo countries* (AGC) – связь между сущностями и географическими именами;
2. *Redirect* (RDT) – перенаправления между страницами;
3. *Articles Categories* (ACT) – категории сущностей.

Таблица 3. Тестовые множества триплетов.

Коллекция	Кол. триплетов (млн)	Размер (Мб)	Ссылка
AGC	0,9	118	http://downloads.dbpedia.org/3.7-i18n/en/article_related_geo_countries_en.nt.bz2
RDT	5,1	750	http://downloads.dbpedia.org/3.7/en/redirects_en.nt.bz2
ACT	13,6	1920	http://downloads.dbpedia.org/3.7/en/article_categories_en.nt.bz2

Объем оперативной памяти

Целью данного эксперимента являются определения параметров предлагаемого метода сжатия словари *URI* и требуемый объем оперативной памяти для хранения коллекций триплетов. Результаты эксперимента представлены в табл. 3 и 4.

Коэффициент сжатия определяется как отношения размера словаря после сжатия и без сжатия; среднее время декодирования строки *URI* определяется как время декодирования всех строк *URI* словаря, деленное на количество *URI* словарей.

Сравнительные оценки размера коллекции триплетов представлены в табл. 4. При этом размер коллекции триплетов по предлагаемому методу определяется как сумма размера списка триплетов с использованием идентификаторов и размера словаря строк *URI*, а по явному представлению – количество символов коллекции.

Таблица 4. Параметры метода сжатия словаря *URI*.

Коллекция	<i>AGC</i>	<i>RDT</i>	<i>ACG</i>
Кол. уникальных <i>URI</i> (млн)	0,8	7,1	4,2
Размер после сжатия (Мб)	17,2	140,0	88,5
Размер без сжатия (Мб)	38,0	340,0	206,0
Коэффициент сжатия	1:2,5	1:2,5	1:2,5
Среднее время декодирования (мкс)	1,7	1,6	1,6

Таблица 5. Размер коллекции триплетов.

Коллекция	Предлагаемый метод (Мб)	Явное представление (Мб)	Отношение
<i>AGC</i>	28,0	118	1:4
<i>RDT</i>	201,2	750	1:4
<i>ACG</i>	251,7	1920	1:8

Время поиска триплета

Целью данного эксперимента является сравнение предлагаемого метода с методом представления триплетов в явном виде по времени поиска триплета в коллекции.

В качестве тестовых данных используются множество триплетов *AGC*. Для измерения времени поиска триплета тестовое множество триплетов разделяются на 10 равных фрагментов. Затем фиксируется время для нахождения всех триплетов каждого фрагмента. Среднее время поиска одного триплета фрагмента определяется как отношение времени для нахождения всех триплетов к количеству триплетов. Результаты эксперимента представлены на рис. 3.

Горизонтальная ось представляет собой номер фрагмента, а вертикальная ось – среднее время поиска триплетов. Две серии данных соответствуют результатам, полученным в двух случаях: представление триплетов в полном виде и с использованием идентификаторов.

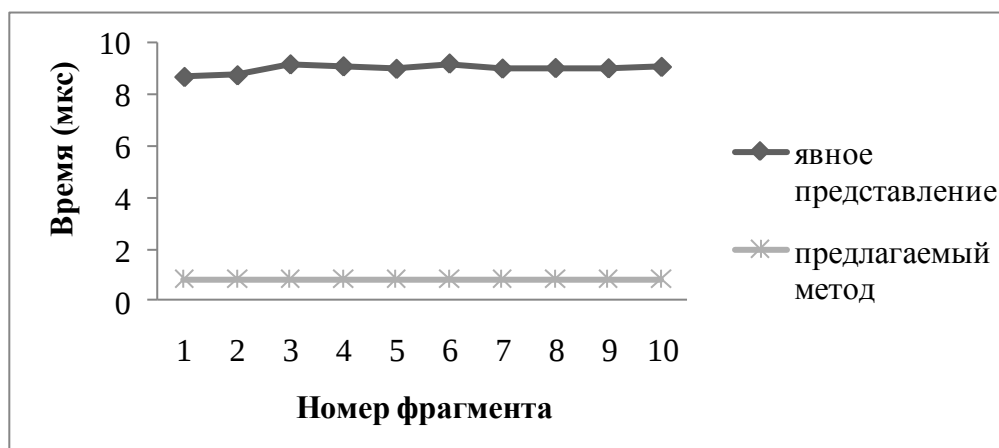


Рис. 3. Время обращения к индексу.

По полученным результатам видно, что время поиска триплета в предлагаемой структуре данных значительно меньше, чем время поиска триплета, если триплеты

представляются в полном виде. Среднее время поиска одного триплета, если триплеты сохраняются в полном виде, равно 9 мкс, а для предлагаемого метода – 0,8 мкс.

Выводы

Таким образом, по сравнению с представлением триплетов в явном виде с использованием предлагаемого метода требуемый объем оперативной памяти для хранения коллекции триплетов уменьшается в 5 раз, а скорость обращения к индексу увеличивается более чем 10 раз. К недостаткам предлагаемого метода можно отнести дополнительные вычислительные затраты, необходимые для декодирования строки *URI* и построения словаря *URI* при индексировании.

Список литературы:

1. Allemang D., Hendler J. Semantic Web for ther Working Ontologist Modeling in RDF, RDFS and OWL. – М.: Morgan Kaufmann, 2008. – 350 p.
2. Губин М.Ю., Разин В.В., Тузовский А.Ф. Методы создания семантических метаописаний документов с применением семантических сетей, фреймовых моделей и частотных характеристик // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – Т. 22. – № 2. – С. 227 – 229.
3. Кристофер Д.М., Рагхаван П., Шютце Х. Введение в информационный поиск. – М.: Вильямс, 2011. – 520 с.

Нгуен Ба Нгок, А. Ф. Тузовский

Томский политехнический университет
Институт кибернетики
кафедра оптимизации систем управления
Россия, г. Томск
nguyen_bn@hotmail.com

МЕТОД СЕМАНТИЧЕСКОГО ПОИСКА В КОЛЛЕКЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДОКУМЕНТОВ

В существующих подходах семантического поиска на основе онтологии, как правило, используются оценки близости между экземплярами и понятиями. В данной статье представлен метод вычисления оценки семантической близости между триплетами. На основе данной оценки семантической близости представлена теоретическая модель семантического поиска с использованием представления документов и запросов как наборов триплетов.

Ключевые слова: онтология, семантическая близость, семантический поиск, семантические метаописания, модель нечеткого множества.

Введение

Задача информационного поиска является классической задачей в области информационных технологий, и играет важную роль в управлении документами. Классические документы обычно включают в основном только тексты на естественных языках, что затрудняет автоматическую обработку их семантики. С появлением подхода к созданию семантических web-сетей появилась новая концепция интеллектуальных документов. В отличие от традиционных документов, в состав интеллектуальных документов включается и явное описание их семантики (метаописания).

Отмечается, что такие метаописания являются ценными источниками информации для выполнения поиска и с их применением возможно значительное улучшение функциональности поисковых систем. Однако в существующих подходах семантического поиска (обзор представлен в [5]) не рассмотрена проблема применения таких метаописаний для выполнения запросов. В связи с этим, в данной работе представлено описание метода семантического поиска, который применяется исключительно в коллекции интеллектуальных документов.

В случае обычных документов в работе [4] представлен метод создания семантических метаописаний. При этом метаописания извлекаются из текста вручную или автоматически. С использованием этого метода имеется возможность применения предлагаемого метода поиска для обычных документов.

В данной статье рассматривается только проблема семантического поиска в коллекции интеллектуальных документов. Поэтому далее термин документ без уточнения используется для обозначения интеллектуальных документов.

Постановка задачи

Задана онтология предметной области O , которая представляет собой набор понятий C_i , связанных между собой отношениями R_i . Также в онтологию предметной

области входят **экземпляры понятий** E_i . Понятия, отношения и экземпляры могут иметь одну или несколько текстовых меток T_i . **Текстовая метка** T_i элемента онтологии – слово либо словосочетание естественного языка (русского или другого), соответствующее некоторому элементу онтологии [4].

На основе онтологии предметной области формируются метаописания интеллектуальных документов, которые представляют собой набор простых высказываний вида «субъект–предикат–объект». Такие простые высказывания называются *RDF*-триплетами t_i , представляющими собой кортежи вида $\langle s_i, p_i, o_i \rangle$, где s_i и o_i включены в объединение C_i и E_i , а p_i включен в R_i .

Метаописания каждого документа d_i из имеющейся коллекции интеллектуальных документов $D = \{d_i\}$ обозначаются как множество триплетов следующим образом:

$$m(d_i) = \{t_1, t_2, \dots, t_{n(i)}\}.$$

Кроме того каждый запрос q из множества запросов Q также состоит из множества триплетов:

$$q = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}.$$

Допустим для универсального множества триплетов T определена весовая функция w , которая определяет значимость некоторого триплета t при описании документов d_i и запроса q :

$$0 \leq w(t, d_i) \leq 1, \text{ где } t \in T, d_i \in D,$$

$$0 \leq w(t, q) \leq 1, \text{ где } t \in T, q \in Q.$$

Решаемая задача заключается в том, что для каждого запроса q требуется определить подмножество R множества документов D , которое состоит из релевантных документов для заданного запроса q – результирующее множество. Документ d_i будет считаться релевантным заданному запросу q , если оценка семантической близости между ними превышает некоторую пороговую величину. При этом для вычисления близости между документом и запросом используются его семантические метаописания, т. е.:

$$\text{sim}_{\text{sem}}(d_i, q_i) = \text{sim}_{\text{sem}}(m(d_i), q_i).$$

Модель информационного поиска на основе нечеткого множества

В [3] представлены различные модели информационного поиска, например булева модель, модель векторного пространства, и т.д. Однако самой подходящей моделью для описания рассматриваемого подхода семантического поиска является модель нечеткого множества [2, 3].

По данной модели индекс I отношений между триплетами и документами может быть выражен с помощью нечеткого множества следующим образом:

$$I = \{\mu_I(d, t) / (d, t) \mid d \in D; t \in T\}, \text{ где } \mu_I(d, t) = w(t, d).$$

На основе индекса I имеется следующее представление документа $d \in D$ как нечеткое множество триплетов:

$$I_d = \{\mu_{I(d)}(t) / t \mid t \in T\}, \text{ где } \mu_{I(d)}(t) = \mu_I(d, t).$$

Запрос q также может быть представлен как нечеткое множество триплетов:

$$I_q = \{\mu_{I(q)}(t) / t \mid t \in T\}, \text{ где } \mu_{I(q)}(t) = w(t, q).$$

Релевантность между документом и запросом также может быть выражена в нечетком множестве следующим образом:

$$R = \{\mu_R(d, q) / (d, q) \mid d \in D; q \in Q\},$$

где $\mu_R : D \times Q \rightarrow [0,1]$ – характеристическая функция, которая выражает близости между документами и запросами. Предлагаемый метод вычисления оценки близости представляется далее.

На основе отношений релевантности R множество результатов для заданного запроса q определяется следующим образом:

$$R_q = \{\mu_{R(q)}(d) / d \mid d \in D\}, \text{ где } \mu_{R(q)}(d) = \mu_R(d, q).$$

Для фильтрации документов с низкими значениями оценки близости используется пороговое значение $\alpha \in [0,1]$ следующим образом:

$$R_{q(\alpha)} = \{\mu_{R(q)}(d) / d \mid d \in D; \mu_{R(q)}(d) > \alpha\}.$$

Оценки семантической близости

По предлагаемой схеме вычисления семантической близости используется единственный алгоритм для вычисления трех видов оценки онтологической близости: 1) между понятиями и экземплярами; 2) между понятиями; 3) и между экземплярами. Поэтому для упрощения описания предлагаемого метода вводится понятие *атом*: атомом называется элемент x , который включен в объединение C_i и E_i . Следовательно объекты и субъекты триплетов s_i и o_i являются атомами.

В предлагаемой схеме вычисления оценки семантической близости различают четыре вида семантической близости по структуре, которая представлена на рис. 1.

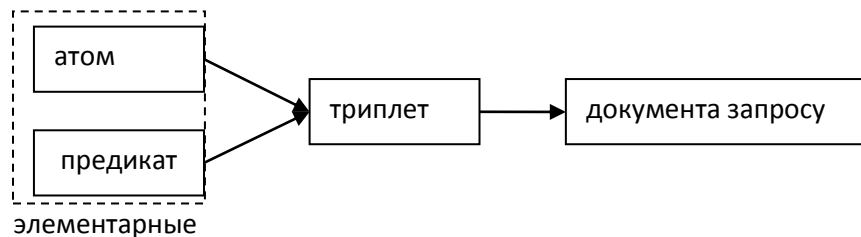


Рис. 1. Виды оценки семантической близости.

В данной статье значения семантической близости между предикатами и между атомами называются элементарными оценками семантической близости, так как эти оценки являются параметрами для вычисления следующего типа семантической близости – семантической близости между триплетами.

В последнем семантическая близость документа запросу определяется как комбинация оценок семантической близости между составляющими триплетами. При этом предлагаются два способа комбинирования этих оценок: 1) суммирования; 2) и максимального парасочетания.

Для вычисления элементарных оценок семантической близости, сначала выполняется преобразование онтологии O в граф G .

Представление онтологии в виде графа

На основе онтологии предметной области O строится граф $G = \langle V, E \rangle$, где V – множество вершин графа, а E – множество ребер, по следующим правилам:

1. Для каждого понятия s из множества понятий C_i и каждого экземпляра e из множества экземпляров E_i добавляются соответствующие вершины во множество вершин V графа;

2. Для каждой семантической связи вида $\langle s, r, o \rangle$, где $s, o \in C_i \cup E_i$, $r \in R_i$ добавляются два ребра $e_\gamma = \langle v_o, v_s, \gamma_r \rangle$ и $e_\sigma = \langle v_s, v_o, \sigma_r \rangle$, где v_s и v_o –

соответствующие вершины графа ; γ_r и σ_r – весовые коэффициенты ребра. При этом γ_r и σ_r определяются опытным путем для каждого отношения r , и выражают оценку семантическую близость между объектом и субъектом, и между субъектом и объектом соответственно.

В контексте информационного поиска оценка семантической близости не обладает симметричным свойством, т. е., $sim_{sem}(o, s) \neq sim_{sem}(s, o)$.

Например, исходя из триплета «компьютер, подкласс, электроника», который переводится условно как компьютер является подклассом электроники. Соответственно понятие компьютер может быть релевантным запросу «электроника», однако электроника не является релевантным результатом для запроса «компьютер». Это утверждение может быть выражено следующим образом:

$$sim_{sem}(\text{электроника, компьютер}) < sim_{sem}(\text{компьютер, электроника}).$$

Элементарные оценки семантические близости

Сначала рассматривается метод вычисления **семантической близости между атомами**. В данной статье семантическая близость между атомами x и y определяется через оценку близости между соответствующими вершинами графа следующим образом:

$$sim_{sem}(x, y) = sim_{graph}(v_x, v_y),$$

где v_x и v_y являются соответствующими вершинами графа G атомов x и y .

При этом оценка близости между вершинами графа определяется на основе пути между ними. Данная оценка близости имеет следующие два свойства: 1) чем больше длина между вершинами (количество ребер пути), тем ниже оценка близости между ними; 2) чем больше весовых коэффициентов ребер графа, входящих в пути между вершинами, тем выше оценка близости между ними.

Допустим, w является путем между вершинами v_1 и v_2 графа G , который представляет собой последовательность уникальных ребер графа $w = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$. Оценка близости между вершинами v_1 и v_2 на основе пути w определяется по следующей формуле:

$$sim_{graph}^w(v_1, v_2) = \prod_{i=1 \dots n} w(e_i),$$

где $w(e_i)$ – весовой коэффициент ребра e_i графа G .

Допустим $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ является множеством всех возможных путей между вершинами v_1 и v_2 , тогда оценка близости между вершинами v_1 и v_2 определяется как максимальное значение близости по всей пути следующим образом:

$$sim_{graph}(v_1, v_2) = \max_{w \in W} (sim_{graph}^w(v_1, v_2)),$$

в случае если $W = \emptyset$ значение близости считается равно нулю:

$$sim_{graph}(v_1, v_2) = 0, \text{ если } W = \emptyset.$$

Другой элементарной оценкой семантической близостью является оценка семантической близости между предикатами. В данной статье представляется следующее примитивное определение семантической близости между предикатами:

$$sim_{sem}(p_1, p_2) = \begin{cases} 1, & \text{если } p_1 = p_2, \\ -1, & \text{если } p_1 \text{ и } p_2 \text{ обратные отношения,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Семантическая близость между триплетами

Основная идея предлагаемого метода вычисления семантической близости между триплетами заключается в том, что семантическая близость между триплетами обусловлена близостью между их компонентами.

Полагается, что если соответствующие компоненты двух триплетов являются близкими по смыслу, то эти триплеты также являются семантически близкими. Кроме того, если p_1 является обратным отношением отношения p_2 , то триплет $t_2 = \langle s_2, p_2, o_2 \rangle$ имеет такое же значение как триплет $t_2^* = \langle o_2, p_1, s_2 \rangle$. Следовательно, имеется следующее определение семантической близости в данном случае:

$$\text{sim}_{sem}(t_1, t_2) = \text{sim}_{sem}(t_1, t_2^*).$$

Исходя из высказанных предположений, в данной статье оценка семантической близости между триплетами

$$t_1 = \langle s_1, p_1, o_1 \rangle \text{ и } t_2 = \langle s_2, p_2, o_2 \rangle$$

определяется следующим образом:

$$\text{sim}_{sem}(t_1, t_2) = \begin{cases} |k| \cdot \frac{\text{sim}_{sem}(s_1, s_2) + \text{sim}_{sem}(o_1, o_2)}{2}, & \text{если } k > 0, \\ |k| \cdot \frac{\text{sim}_{sem}(s_1, o_2) + \text{sim}_{sem}(o_1, s_2)}{2}, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $k = \text{sim}_{sem}(p_1, p_2)$ – оценка близости между предикатами;

Семантическая близость между документом и запросом

Семантическая близость между документом и запросом определяется на основе семантической близости между их триплетами. В самом простом варианте семантическая близость документа запросу определяется по следующей формуле:

$$\text{sim}_{sem}(d, q) = \frac{|m(d) \cap q| \cdot m(d) \cdot q}{|m(d)| \cdot |q|},$$

где $|m(d)|$, $|q|$ и $|m(d) \cap q|$ соответственно являются размером метаописания документа d , размером запроса q и размером их пересечения; $m(d) \cdot q$ определяется как сумма значений семантической близости между триплетами попарно следующим образом:

$$m(d) \cdot q = \sum_{x \in m(d), y \in q} \mu_{I(d)}(x) \cdot w(y, q) \cdot \text{sim}_{sem}(x, y).$$

Более сложным подходом вычисления оценки семантической близости между документом и запросом является подход вычисления близости как максимальное парасочетание во взвешенном двухдольном графе.

Двухдольный граф является особым графом, который обладает следующими двумя свойствами: 1) все вершины двухдольного графа могут быть распределены в двух непересекающихся множествах (называются левое и правое множество вершин); 2) любое ребро графа соединяет только вершину из левого множества с вершиной правого множества.

По рассматриваемому алгоритму вычисления оценки семантической близости сначала строится двухдольный взвешенный графа $BG = \langle V, E \rangle$ по следующим правилам:

1. Множество вершин графа является объединением левого множества вершин и правого множества вершин:

$$V = V_L \cup V_R,$$

где V_L – левое множество вершин, которое состоит из триплетов документа $V_L = m(d)$, и V_R – правое множество вершин, которое состоит из триплетов запроса $V_R = q$;

2. Для каждой пары вершин $v_{t(i)} \in V_L$ и $v_{t(j)} \in V_R$ определяется ребро графа с весовым коэффициентом, который равен оценке семантической близости между соответствующими триплетами:

$$e_{ij} = (< v_{t(i)}, v_{t(j)} >, \text{sim}_{sem}(t_i, t_j)).$$

При этом весовой коэффициент ребра e_{ij} обозначается следующим образом:

$$e_{ij}(v_{t(i)}, v_{t(j)}) = \text{sim}_{sem}(t_i, t_j).$$

После определения двухдольного графа определяется его максимальное парасочетание. При этом парасочетание двухдольного графа является множеством пар вершин графа вида:

$$P = \{(v_{l(i)}, v_{r(i)}) \mid v_{l(i)} \in V_L; v_{r(i)} \in V_R; i = 1 \dots \min(|V_L|, |V_R|)\},$$

в котором каждая вершина встречается только один раз.

Максимальное парасочетание является парасочетанием, которое имеет максимальную сумму весовых коэффициентов ребер:

$$\text{sum}_{BG}(P_{\max}) = \max_{P \in P_i} (\text{sum}_{BG}(P)),$$

где P_i – множество всех возможных парасочетаний; $\text{sum}_{BG}(P)$ – сумма весовых коэффициентов ребер парасочетания P графа BG :

$$\text{sum}_{BG}(P) = \sum_{(v_l, v_r) \in P} e(v_l, v_r).$$

Эффективным алгоритмом для нахождения максимального парасочетания во взвешенном двухдольном графе является алгоритм *Hungarian*[1] (алгоритм был предложен венгерским математиком *Egervary*). В итоге оценка семантической близости между документом d и запросом q определяется как сумма весовых коэффициентов ребер максимального парасочетания следующим образом:

$$\text{sim}_{sem}(d, q) = \text{sum}_{BG}(P_{\max}).$$

Выполнение запроса

В качестве примера рассматривается информационная поисковая система со следующими исходными данными:

универсальное множество T , которое состоит из трех триплетов:

$$T = \{t_1, t_2, t_3\},$$

и следующая коллекция интеллектуальных документов D :

$$D = \{d_1, d_2, d_3\}.$$

Отпускается подробная структура онтология предметной области, допустим имеются следующие метаописания интеллектуальных документов:

$$m(d_1) = \{t_1, t_2\}; m(d_2) = \{t_1, t_3\}; m(d_3) = \{t_2, t_3\}.$$

При этом каждый триплет t_i имеет вид $< s_i, p_i, o_i >$, т. е.:

$$t_1 = < s_1, p_1, o_1 >, t_2 = < s_2, p_2, o_2 >, t_3 = < s_3, p_3, o_3 >.$$

Без учета подробности онтологии и процесса вычисления, допустима следующая функция определения базовых оценок семантической близости:

$$\text{sim}_{\text{sem}}(s_3, s_1) = 0,9; \text{sim}_{\text{sem}}(p_3, p_1) = 1,0; \text{sim}_{\text{sem}}(o_3, o_1) = 0,7;$$

$$\text{sim}_{\text{sem}}(s_3, s_2) = 0,6; \text{sim}_{\text{sem}}(p_3, p_2) = 1,0; \text{sim}_{\text{sem}}(o_3, o_2) = 0,6;$$

$$\text{sim}_{\text{sem}}(s_2, s_1) = 0,3; \text{sim}_{\text{sem}}(p_2, p_1) = 1,0; \text{sim}_{\text{sem}}(o_2, o_1) = 0,3;$$

$$\text{sim}_{\text{sem}}(x, x) = 1,0;$$

$$\text{sim}_{\text{sem}}(x, y) = 0,0 \text{ – в остальных случаях, когда } x \neq y,$$

на основе которых определяется следующая функция семантической близости между триплеттами:

$$\text{sim}_{\text{sem}}(t_3, t_1) = 1 \cdot \frac{0,9 + 0,7}{2} = 0,8; \text{sim}_{\text{sem}}(t_3, t_2) = 1 \cdot \frac{0,6 + 0,6}{2} = 0,6;$$

$$\text{sim}_{\text{sem}}(t_2, t_1) = 1 \cdot \frac{0,3 + 0,3}{2} = 0,3; \text{sim}_{\text{sem}}(t, t) = 1,0;$$

$$\text{sim}_{\text{sem}}(x, y) = 1,0 \text{ – в остальных случаях, когда } x \neq y.$$

Нечеткое множество индекса определяется следующим образом:

$$I = \{1/(d_1, t_1) + 1/(d_1, t_2) + 0/(d_1, t_3) + 1/(d_2, t_1) + 0/(d_2, t_2) + 1/(d_2, t_3) + 0/(d_3, t_1) + 1/(d_3, t_2) + 1/(d_3, t_3)\}.$$

На основе индекса I имеются следующие представления документов:

$$I_{d(1)} = \{1/t_1 + 1/t_2 + 0/t_3\};$$

$$I_{d(2)} = \{1/t_1 + 0/t_2 + 1/t_3\};$$

$$I_{d(3)} = \{0/t_1 + 1/t_2 + 1/t_3\}.$$

Для следующего запроса:

$$q = \{t_1, t_2\},$$

и весовая функция

$$w(t, d) = \begin{cases} 1, & \text{если } t \in d, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

оценки семантической близости между документами и запросом по первому методу вычисляются следующим образом:

$$\text{sim}_{\text{sem}}(d_1, q) = 2 \cdot \frac{1 \cdot 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 \cdot 0,3 + 1 \cdot 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1 \cdot 1}{2 \cdot 2} = 1,2;$$

$$\text{sim}_{\text{sem}}(d_2, q) = 1 \cdot \frac{1 \cdot 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 \cdot 0,8 + 1 \cdot 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1 \cdot 0,6}{2 \cdot 2} = 0,6;$$

$$\text{sim}_{\text{sem}}(d_3, q) = 1 \cdot \frac{1 \cdot 1 \cdot 0,3 + 1 \cdot 1 \cdot 0,8 + 1 \cdot 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 \cdot 0,6}{2 \cdot 2} = 0,7.$$

На основе вычисленных оценок семантической близости, имеется следующее множество результатов:

$$R_q = 1,2/d_1 + 0,7/d_3 + 0,6/d_2,$$

при этом знак «+» обозначает операцию объединения элементов в множество.

По второму методу семантическая близость документа запросу вычисляется как максимальное парасочетание во взвешенном двухдольном графе. Взвешенные

двухдольные графы, построенные для документов в соответствии с запросом q представлены на рис. 2:

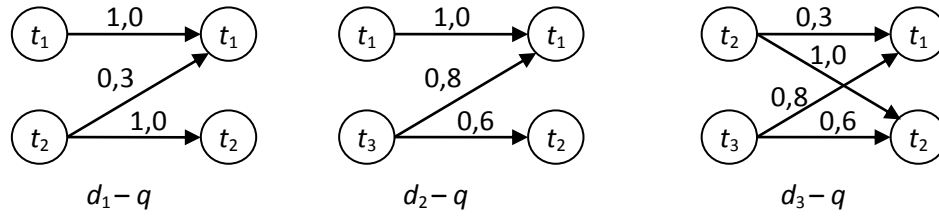


Рис. 2. Взвешенные двухдольные графы.

На основе полученных взвешенных двухдольных графов, имеются следующие оценки семантической близости документов запросу:

$$sim_{sem}(d_1, q) = 1,0 + 1,0 = 2,0;$$

$$sim_{sem}(d_2, q) = 1,0 + 0,6 = 1,6;$$

$$sim_{sem}(d_3, q) = 1,0 + 0,8 = 1,8.$$

Множество результатов в данном случае представляется следующим образом:

$$R_q = 2,0/d_1 + 1,8/d_3 + 1,6/d_2.$$

Все нерелевантные документы могут быть исключены из нечеткого множества результатов путем применения операции α -вырезки. Например, со значением $\alpha = 1,7$ исключается документ d_2 из множества результатов.

Исходя из рассматриваемого примера видно, что по данному алгоритму для определения множества результатов требуется вычисление оценки близости для всех документов. Следовательно, в случае обработки большой коллекции документов требуется достаточно много времени. В этом случае требуется применение метода оптимизации выполнения запросов.

Оптимизация выполнения запроса

Одним из способов оптимизации выполнения запроса является определение подмножества P_q множества документов D , документы из которого могут быть релевантными запросу q . Затем запрос выполняется только в данном множестве P_q .

Данное множество P_q называется контекстным множеством запроса q . В данной статье предлагается определение контекстного множества P_q как объединение списков релевантных документов следующим образом:

$$P_q = \bigcup_{t \in q} I_t,$$

где I_t – список релевантных документов триплета t . На основе индекса I список I_t определяется следующим образом:

$$I_t = \{\mu_{I(t)}(d) / d \mid d \in D\},$$

где

$$\mu_{I(t)}(d) = \mu_I(d, t).$$

С использованием контекстного множества P_q , имеется следующее оптимизированное определение множества результатов запроса q :

$$R_q = \{\mu_q(d) / d \mid d \in P_q\}.$$

При этом ускорение получается за счет того, что размер контекстного множества P_q меньше, чем размер множества документов D .

Выводы

В описанной модели семантического поиска, элементарными единицами для составления запросов поиска и документов являются триплеты. В работе рассмотрены две схемы вычисления семантической близости документа запросу: сумма близости между триплетами и максимальное парасочетание во взвешенном двухдольном графе.

При вычислении семантической близости между документами и запросом, базовые оценки семантической близости могут быть вычислены статическим либо динамическим способом. Статический – означает то, что базовые оценки семантической близости вычисляются заранее до выполнения запроса, а динамический – означает то, что эти оценки близости вычисляются во время выполнения запроса. По сравнению с динамическими способами статический метод обеспечивает повышенную производительность, однако требуется дополнительный объем памяти для хранения заранее вычисленных оценок близости.

Причиной выбора модели информационного поиска на основе нечеткого множества является необходимость определения оценки релевантности и значимости триплетов как многозначные переменные для цели ранжирования результатов.

Список литературы:

1. Bondy J.A., Murty U.S.R. Graph theory. – N. Y.: Springer, 2008. – 651 p.
2. Klir G.J., Yuan B. Fuzzy sets and fuzzy logic : theory and applications. – Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall PTR, 1995. – 574 p.
3. Christopher D. M., Prabhakar R., Hinrich S. Introduction to information retrieval. – N. Y.: Cambridge University Press, 2008. – 482 p.
4. Губин М.Ю., Разин В.В., Тузовский А.Ф. Методы создания семантических метаописаний документов с применением семантических сетей, фреймовых моделей и частотных характеристик // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2010. № 2-2. С. 227-229.
5. Нгуен Б.Н., Тузовский А.Ф. Обзор подходов семантического поиска // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2010. № 2-2. С. 234-237.

Д. В. Неделько к.т.н.

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ
докторант кафедры аэрогидродинамики
Россия, г. Казань
ndv7350@mail.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТОЕМКОСТИ РЕССОР ПОЛОЗКОВОГО ШАССИ ВЕРТОЛЕТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОПРОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

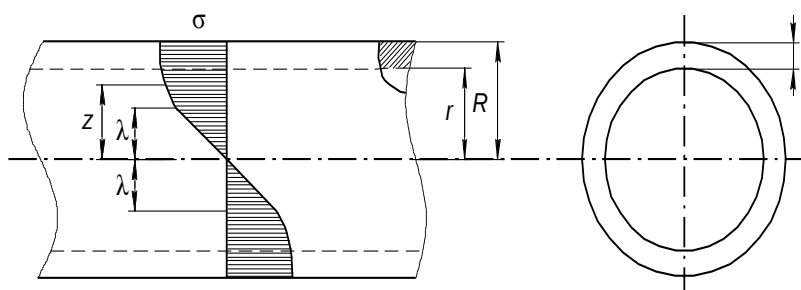
Предложена методика выполнения энергетического анализа условий поглощения заданного уровня работоемкости рессоры ползкового шасси вертолета в соответствии с требованиями норм АП-29. Введено понятие показателя энергопоглощающей способности рессоры ползкового шасси вертолета.

Ключевые слова: вертолет, ползковое шасси, рессора, копровые испытания, работоемкость.

В настоящей работе выполнено расчетное исследование характеристик работоемкости рессор ползкового шасси вертолета при поглощении ими энергии посадочного удара. Рассматривается конструкция ползкового шасси, которой оснащено наибольшее число вертолетов в мире. Шасси этого типа имеет переднюю и заднюю рессору из металлических труб.

Согласно требованию норм проектирования АП-29 [1], при поглощении энергии посадочного удара допускается образование пластических деформаций в рессорах шасси. При этом проверка способности шасси поглощать заданный уровень энергии удара должна быть подтверждена путем проведения копровых испытаний на сброс с заданной высоты по требованиям параграфов 29.723, 29.725, 29.727 АП-29 [1].

В настоящей работе предполагаем, что заданный уровень работоемкости рессоры определен с учетом ее работы в составе конструкции ползкового шасси. Далее рассматриваем условия сброса изолированной рессоры. При моделировании процесса динамического нагружения рессоры необходимо учесть особенности ее упруго-пластического деформирования, когда имеется упругое ядро сечения (2λ) и зона пластичности – рисунок 1а.



а

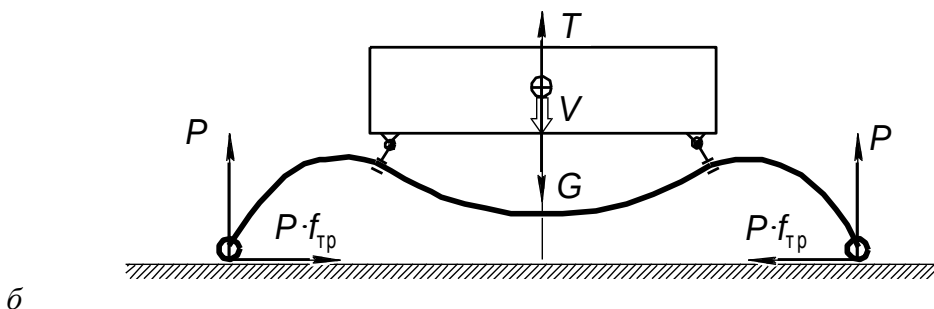


Рис. 1

В качестве объекта исследования выбраны результаты копровых испытаний задней рессоры отечественного легкого многоцелевого вертолета, изготовленной из высокопрочной стали с параметрами трубы $R \times \delta = 40 \times 2,5$ мм. Методика исследования заимствована из работы [2]. В использованной методике рессора моделируется как стержневая конструкция в рамках теории больших перемещений стержней [3], доработанной для учета особенностей упруго-пластического деформирования материала. На рисунке 1б показана расчетная схема задачи, где обозначены: G – вес сбрасываемого груза, V – вертикальная скорость перемещения груза, P – величины реакций в зоне контакта рессоры с твердой опорной поверхностью, $f_{тр}$ – коэффициент трения фрагментов ползков об опорную поверхность, T – подъемная сила, имитирующая разгрузку от несущего винта.

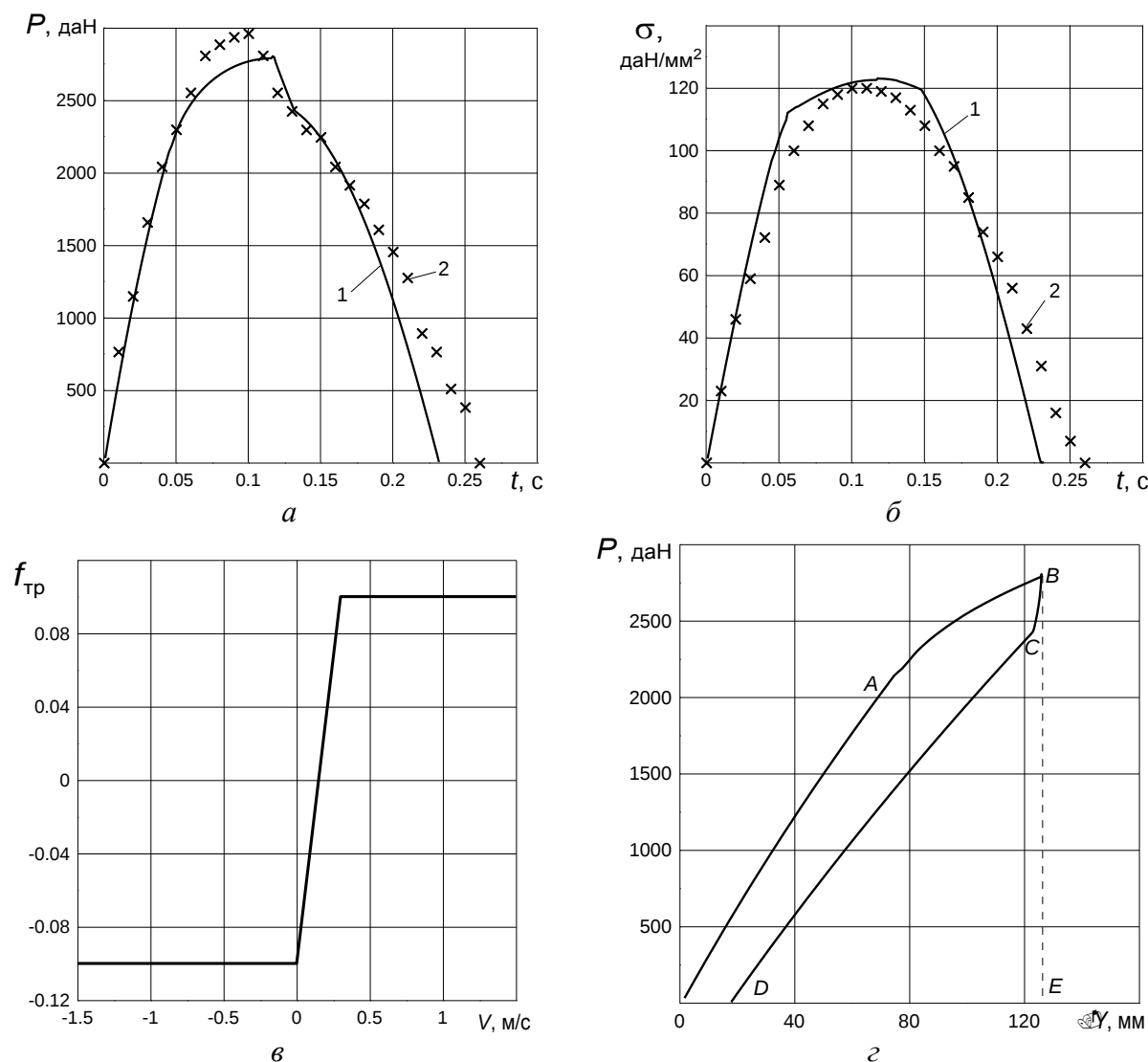
На рисунках 2а и 2б показаны результаты расчетного моделирования результатов копровых испытаний, где σ – наибольшее изгибное напряжение, измеренное в ходе испытаний в районе узла крепления рессоры к грузу. Как видно из представленных на рисунке 2 результатов, процесс динамического нагружения рессоры может быть воспроизведен в примененной расчетной модели с достаточной степенью точности. При этом в расчете использована приближенная схема учета смены направления силы трения, приведенная на рисунке 2в, где величина коэффициента трения $f_{тр} = 0,1$ соответствует данным рассматриваемого эксперимента. На рисунке 2г приведена диаграмма обжатия рессоры шасси [4]. Кривая $0AB$ соответствует прямому ходу рессоры, кривая BCD – ее обратному ходу. Полученный гистерезис прямого и обратного хода объясняется образованием остаточных деформаций при поглощении энергии удара и наличием трения. Очевидно, что разница площадей фигур $0ABE$ и $DCBE$ соответствует уровню поглощенной рессорой работы с учетом рассеяния энергии при образовании пластических деформации и при трении.

На рисунке 3а показано изменение по времени энергетических характеристик процесса динамического нагружения рессоры. Как видно из рисунка 3а, в рассматриваемом случае выполняется закон сохранения энергии вплоть до отскока рессоры на обратном ходе (точка t_0 на рисунке 3а). Потенциальная энергия равна 0, поскольку $T = G$ по условию эксперимента.

Введем в рассмотрение энергетические параметры, характеризующие динамический процесс в момент отскока рессоры: $E_{п}$ – поглощенная энергия, $E_{воз}$ – возвращенная энергия и E_{Σ} – суммарная энергия. Комбинация введенных параметров в совокупности определяет показатель энергопоглощающей способности рессоры ползкового шасси вертолета

$$K_E = 1 - \frac{E_{воз} - E_{п}}{E_{\Sigma}}. \quad (1)$$

Показатель K_E характеризует эффективность рессоры при поглощении заданной энергии за счет пластических свойств материала. При этом должны быть выполнены условия: $T = G$ (случай испытаний на располагаемую работоемкость, п. 29.727 [1]) и сила трения отсутствует ($f_{тр} = 0$).



**Рис 2. – Результаты расчетного моделирования результатов копровых испытаний
1 – расчет; 2 – эксперимент**

На рисунке 3б представлен расчетный анализ доли различных факторов в поглощении энергии для рассматриваемой рессоры. На указанном рисунке обозначено: 4 – расчет без учета пластичности и сил трения; 5 – расчет с учетом сил трения (при $f_{тр} = 0,1$) и без учета пластичности; 6 – расчет без сил трения и с учетом пластичности; 7 – расчет, выполненный с учетом всех факторов. Таким образом, можно сделать вывод о влиянии рассмотренных факторов на рассеяние энергии посадочного удара.

На рисунке 3в представлены результаты расчета для рассмотренной рессоры вертолета, а также для двух гипотетических рессор аналогичной геометрии, но с уменьшенной стенкой трубы δ . Как видно из результатов расчета, уменьшение стенки трубы приводит к увеличению действующих изгибных напряжений, более интенсивному развитию пластических деформаций и «смягчению» ударного импульса (увеличение времени до отскока рессоры $t_{01} < t_{02} < t_{03}$). Соответственно более интенсивному образованию

пластических деформаций увеличивается значение показателя K_E , что показано в соответствующих данных таблицы 1.

Таблица 1

Труба ($R \times \delta$)	40 x 2,5 мм	40 x 2,0 мм	40 x 1,5 мм
$\sigma_{\max} / \sigma_{\text{пл}}$	1,29	1,34	1,44
K_E	0,53	0,73	0,82

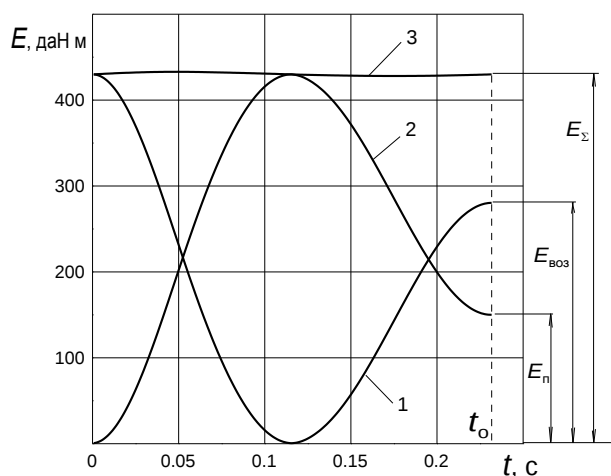
Необходимо отметить, что в данной работе все расчеты выполнены для одного уровня заданной энергии посадочного удара.

На рисунках 4а и 4б представлены результаты исследования влияния сил трения на процесс рассеяния энергии посадочного удара.

На рисунке 4а показано изменение показателя K_E для гипотетической рессоры с параметрами трубы 40 x 1,5 мм. Из рисунка 4а видно, что показатель K_E для пластических характеристик рессоры без трения соответствует эффективности упругой рессоры при уровне трения $f_{\text{тр}} \sim 0,5$. При этом отрезок BD примерно в два раза меньше отрезка CB , что позволяет сделать вывод о большей эффективности сил трения для рассеяния энергии по сравнению с пластическими деформациями (при $f_{\text{тр}} \sim 0,5$).

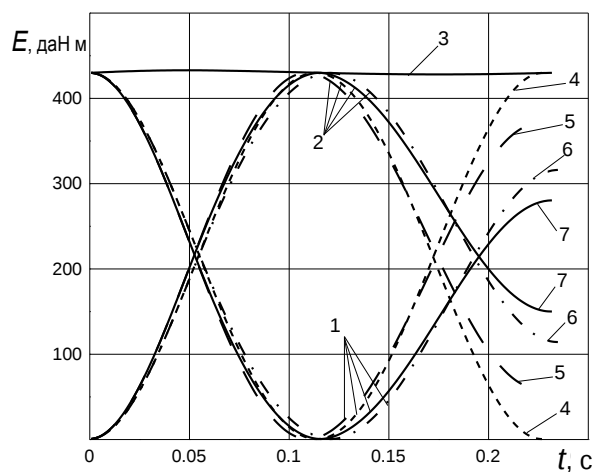
На рисунке 4б показано влияния сил трения и пластических характеристик рессоры на уменьшение скорости отскока рессоры после поглощения заданной работы.

Очевидно, что отскок рессоры неизбежен, поскольку в рассматриваемом случае присутствует постоянно действующая разгрузка $T = G$, причем рассмотрена рессора с достаточно высоким показателем эффективности $K_E = 0,82$ (см. таблицу 1) для доли пластических деформаций.



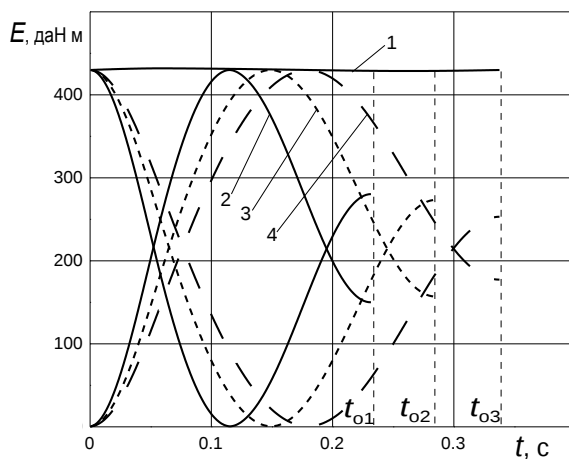
а

1 – кинетическая энергия; 2 – работа сил P ; 3 – суммарная энергия



б

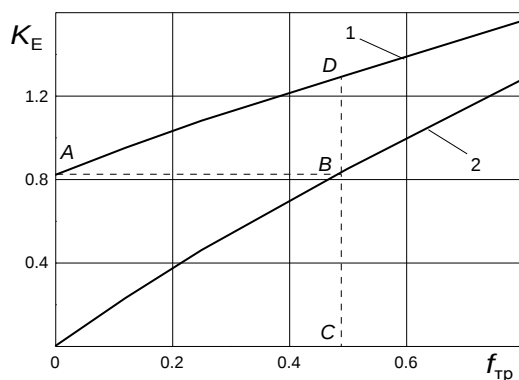
1 – кинетическая энергия; 2 – работа сил P ; 3 – суммарная энергия, 4, 5, 6, 7 – различные варианты расчета, обозначенные в тексте.



в

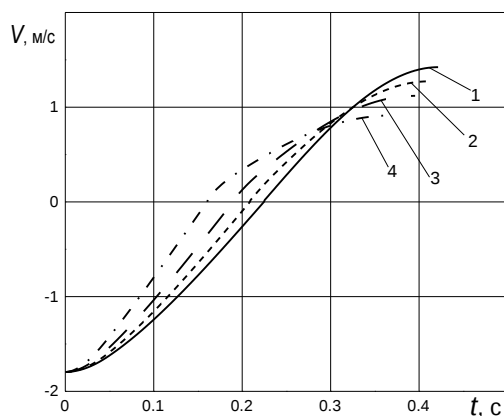
1 – суммарная энергия; 2 – расчет для трубы 40 х 2,5 мм; 3 – расчет для трубы 40 х 2,0 мм; 4 – расчет для трубы 40 х 1,5 мм

Рис 3.



а

1 – расчет с учетом пластичности; 2 – расчет без учета пластичности



б

**1 – расчет с $f_{тр} = 0$; 2 – расчет с $f_{тр} = 0,25$; 3 – расчет с $f_{тр} = 0,5$;
4 – расчет с $f_{тр} = 0,8$**

Рис 4.

По данным рисунков 4а и 4б видно, что уменьшение вертикальной скорости с 1,8 м/с до 0,8 м/с достигнуто при достаточно высоком суммарном показателе $K_E = 1,57$ как с учетом чрезвычайно высокого трения, так и с большой степенью пластических деформаций. Из анализа формулы (1) очевидно, что полное поглощение энергии удара возможно при $K_E = 2$. Теоретически возможен подбор параметров рессоры для реализации параметра $K_E = 2$ только за счет пластических деформаций, однако, как показывают результаты проектирования шасси отечественных вертолетов, практически это затруднено из-за ряда объективных факторов. К числу таких факторов относятся:

- необходимость обеспечения статической прочности рессор шасси;
- обеспечение требуемой их жесткости для предотвращения явления «земного резонанса» вертолета.

При этом разработанная методика энергетического анализа работемкости рессоры позволит определить ее основные параметры на стадии проектирования с учетом основной задачи – наиболее полного поглощения энергии посадочного удара.

Список литературы:

1. Нормы летной годности винтокрылых аппаратов транспортной категории. Авиационные правила. Часть 29. Изд-во ЛИИ им. М.М.Громова. 1995.
2. Михайлов С.А., Коротков Л.В., Неделько Д.В. Моделирование упругопластического деформирования рессор ползкового шасси вертолета // Изв. вузов. Авиационная техника. 2010. № 1. С 8-12.
3. Павлов В.А., Михайлов С.А., Гайнутдинов В.Г. Теория больших и конечных перемещений стержня. // Изв. вузов. Авиационная техника. 1985. №3. С. 55-58.
4. Астахов М.Ф., Караваев А.В., Макаров С.Я., Суздальцев Я.Я. Справочная книга по расчету самолета на прочность. М.: Оборонгиз, 1954. 708 с.

А. В. Новичихин к.т.н.

Сибирский государственный индустриальный университет
кафедра разработки пластовых месторождений
Россия, г. Новокузнецк
novitchihin@pochta.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Государственный контракт № 16.740.11.0410.

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕДУРЫ ПЛАНИРОВАНИЯ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ТОПЛИВНО-СЫРЬЕВОГО РЕГИОНА

Рассматриваются методические особенности разработки процедуры планирования в социально-экономических системах топливно-сырьевого региона. Представлены постановка и решение задачи выхода на траекторию устойчивого развития региона.

Ключевые слова: процедура, планирование, адаптивное управление, социально-экономические системы.

Под топливно-сырьевым регионом понимается административная территория РФ (или их совокупность), социально-экономический потенциал которой формируется преимущественно на базе эффективно развивающихся отраслей топливно-энергетического комплекса с сырьевой направленностью, ориентированных на производство готового энергетического продукта. В современных условиях топливно-сырьевой регион характеризуется большим числом структурных элементов, взаимосвязей между ними и окружающей средой, наличием разного рода неопределенностей (отсутствие полной информации о функционировании, неточность количественных и качественных оценок, стохастичность протекания неуправляемых процессов, влияющих на эффективности системы и др.). Поэтому важное значение имеют решения задач планирования для повышения эффективности функционирования хозяйствующих субъектов. В топливно-сырьевых регионах к хозяйствующим субъектам относятся градообразующие предприятия: металлургические заводы, объекты угольной и газовой промышленности, нефтяного комплекса, энергосистем. Они являются полюсами роста (концепция впервые была предложена Ф. Перу [1]), а также другие обеспечивающие или вспомогательные предприятия, компании, фирмы. В настоящее время принятие управленческих решений в социально-экономических системах (СЭС) сопряжено с условиями сложных и неустойчивых экономических ситуаций. Лицам, принимающим решения, сложно правильно сделать выбор. При этом от их решений зависит стабильность функционирования и развития предприятия и компаний, и соответственно инвестиционная привлекательность отраслей топливно-сырьевого региона и его развитие.

В этой связи для устойчивого функционирования и развития топливно-сырьевого региона необходимо применение методов адаптивного управления, под которым понимается совокупность методов теории управления организационными системами [2], позволяющих компенсировать внешние и внутренние воздействия на СЭС топливно-сырьевого региона посредством изменения параметров управляющих воздействий субъекта управления с целью обеспечения «устойчивости»

функционирования. На функционирование и развитие топливно-сырьевого региона влияют следующие основные факторы: социум, экономика, экология, политика, природно-ресурсный потенциал, полюса роста.

Таким образом, в настоящее время актуальной задачей адаптивного управления в СЭС топливно-сырьевого региона является разработка механизма планирования для обеспечения устойчивого развития в современных условиях.

Сущностью механизма планирования в СЭС топливно-сырьевого региона является разработка стратегий и программ социально-экономического развития, функционирования СЭС региона, распределения топливно-сырьевых ресурсов (например, модель энергопотребления региона [3]). В основе механизма планирования лежит соответствующая процедура. Результатами использования механизма планирования являются кратко-, средне- и долгосрочный прогноз, определение показателей и направлений развития СЭС топливно-сырьевого региона на основе мультиагентных динамических моделей.

Одной из значимых целей социально-экономического развития топливно-сырьевых регионов является повышение уровня жизни населения, а также приоритет идей устойчивого развития, которые учитываются в «Концепции долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2020 года» [4]. В программах социально-экономического развития присутствуют разделы, включающие перечень мероприятий, направленных на комплексное освоение топливно-сырьевой базы для производства готового энергетического продукта (до продукции глубокого передела) на территории региона. При этом особое внимание уделяется созданию специальных стабилизационных фондов, имеющих предназначение поддержки региональных диверсификационных процессов, для снижения зависимости бюджета от конъюнктуры сырьевых рынков. Поэтому задачу выхода на траекторию устойчивого развития можно сформулировать следующим образом:

Определяется начальное состояние топливно-сырьевого региона посредством механизма диагностики [5]: социально-экономические показатели, в том числе уровня жизни населения – $A_k(0)$, при $k \in [1, N]$; состояние природно-ресурсной базы. Для достижения траектории устойчивого развития необходимо:

- разработать набор долгосрочных сценариев (комплексный сценарий) социально-экономического развития топливно-сырьевого региона;

- разработать программу социально-экономического развития на соответствующий период;

- сконструировать стабилизационный фонд и комплекс мероприятий по развитию (в том числе диверсификации) других отраслей производства, для выполнения условия:

$$A(t) \leq A(t+1), \text{ при } t \in [0, T-1]. \quad (1)$$

Формальная схема модели может быть представлена:

$$X(t+1) = f(X(t), Y(t+1), P(t+1), A(t), R, T), \quad (2)$$

где $X(t)$ – социально-экономические показатели функционирования региона на конец года t ; $Y(t+1)$ – вариант (набор сценариев) развития топливно-сырьевого региона на конец года $(t+1)$; $P(t+1)$ – прогноз эндогенных условий функционирования (инфляция, ставки рефинансирования, спрос на национальных и транснациональных рынках и т.п.); R – показатели стратегических рисков реализации варианта развития; T – горизонт прогнозирования.

Социально-экономические показатели функционирования региона определяются на основе мультиагентных динамических моделей, которые можно представить в виде кортежа:

$$X(t) \equiv \langle Ecn(t), Soc(t), Ecl(t), Pot(t), Pol(t), Ind(t) \rangle, \quad (3)$$

где $Ecn(t)$ – модель «Экономика» (валовый региональный продукт, объемы инвестиций, налоговые отчисления и т.п.); $Soc(t)$ – модель «Социум» (показатели качества жизни, миграция населения, новые рабочие места и т.п.); $Ecl(t)$ – модель «Экология» (объемы выбросов, загрязняющих окружающую среду, инвестиции на охрану окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов и т.п.); $Pot(t)$ – модель «Природно-ресурсный потенциал» (показатели обновления геологических и балансовых запасов топливно-энергетических ресурсов); $Pol(t)$ – модель «Политика» (показатели социальной, экономической, экологической и энергетической безопасности); $Ind(t)$ – модель «Промышленность» (объемы производства, потребления продукции топливно-энергетического комплекса, энергетический баланс и т.п.).

Формирование набора эффективных сценариев развития является многокритериальной задачей оптимизации и решается посредством нахождения Парето-оптимальных решений [например, 6]. Целевыми характеристиками социально-экономического развития топливно-сырьевого региона являются: уровень качества жизни – f_1 , успех реализации плана (противоположное «событие» интегральному риску реализации) – f_2 , эффективность вложения средств – f_3 .

Интегральная оценка риска реализации определяется на основе формирования дерева оценок и составления карты рисков [7], при этом учитываются следующие стратегические риски: природно-ресурсный, промышленный, экологический, политический, экономический и социальный.

Таким образом, развитие СЭС топливно-сырьевого региона определяется набором целевых характеристик:

$$F(Y) = \{f_k(Y)\}, \text{ при } k \in [1, K], \quad (4)$$

где k – количество критериев ($K=3$).

Необходимо выбрать из множества допустимых решений f_k такие параметры системы, чтобы целевые характеристики находились в области оптимальных значений:

$$f_k(Y) \rightarrow \max, \text{ при } k \in [1, K]. \quad (5)$$

Следует отметить, что если точки оптимума Y^* , полученные при решении задачи по каждому критерию отдельно не совпадают, то решением задачи может быть только компромиссное решение, удовлетворяющее всем компонентам векторного критерия $F(Y)$.

Таким образом, точка Y^* , удовлетворяющая условиям (4 – 5), оптимальна по Парето, если не существует другой точки Y' , для которой:

$$f_k(Y') \geq f_k(Y^*), \text{ при } k \in [1, K] \quad (6)$$

и хотя бы для одного из критериев выполнялось строгое неравенство.

Таким образом, в настоящей работе предложены методические основы разработки процедуры планирования: постановка и решение задачи выхода на траекторию устойчивого развития; методика ранжирования (формирования набора эффективных) сценариев социально-экономического развития топливно-сырьевого региона. Посредством предложенных основ разработки процедуры планирования в СЭС топливно-сырьевого региона представляется возможным создание эффективного инструментария принятия управленческих решений в современных условиях для разработки и адаптации программ регионального развития, а также использование при совершенствовании механизмов снижения ожидаемого ущерба (экономического, социального и экологического).

Список литературы:

1. Perroux F. Economic space: theory and applications // Quarterly Journal of Economics. 1950. V. 64(1). PP. 89 – 104.
2. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М: МПСИ, 2005. 584 с.
3. Новичихин А.В. Прогнозирование энергопотребления топливдобывающего субъекта РФ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 4. С. 89 – 94.
4. О Концепции долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2020 года: Распоряжение Правительства РФ от 17.11.2008 № 1662-р // Собрание законодательства РФ. 2008. № 47. Ст. 5489.
5. Новичихин А.В. Разработка механизма диагностики социально-экономических систем топливно-сырьевого региона // Естественные и технические науки. 2011. № 6. С. 517–520.
6. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный анализ. 2-е изд., испр. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 176 с.
7. Новичихин А.В. О методике учета рисков при прогнозировании социально-экономического развития топливдобывающих регионов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 2. С. 20–22.

Д. А. Осипович, С. Г. Ярушин д.т.н.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Кафедра «Технология, конструирование и автоматизация
в специальном машиностроении»
Россия, г. Пермь
tka@cpl.pstu.ru

ВЫЯВЛЕНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРА И НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ В ПРОМЫШЛЕННЫХ МАСШТАБАХ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Приведен анализ наиболее изученных способов получения ультра и наноразмерных порошков. Выявлено, что в процессе экспериментальной проверки способов из поля зрения упущены вопросы разработки технологии получения порошков в промышленном масштабе и вопросы экологической безопасности. В результате делается вывод о необходимости продолжения поиска рациональных методов получения порошков.

Ключевые слова: нанодисперсные материалы; промышленная технология; экологическая безопасность.

В последнее время на государственном уровне резко активизировался интерес к внедрению в конструкции изделий машиностроения и в частности в изделия в аэрокосмической техники материалов, содержащих порошковые компоненты с ультра и даже наноразмерами частиц. Побудительными мотивами послужили поступающие из-за рубежа сообщения об использовании с большим экономическим эффектом нанодисперсных материалов для многих областей промышленности, включая космическую и материаловедческую. При этом в публикациях отсутствует конкретная информация, какие порошковые материалы, с какой формой частиц, с каким структурным составом, в каком количестве, по каким методам, на каком технологическом оборудовании изготавливаются.

Анализ выявленной релевантной информации, освещающих вопросы от моментов получения до применения порошковых материалов показал, что в нашей стране, несмотря на большой имеющийся научный потенциал и длительную историю прикладных исследований, еще не сформировалась стратегия развития данного направления. И это при том, что более или менее хорошо изучены собственные свойства многих порошковых материалов с размерами частиц менее 100 мкм. Установлено, что при переходе материала из состояния макроскопических структур в нанодисперсные структурные образования изменяются их фундаментальные и прикладные свойства: повышается твердость, прочность и пластичность, увеличивается предел текучести, снижается порог хладоломкости и пр. Результаты исследований относятся к самым разным материалам: от химически чистых элементов, до оксидов, карбидов или комплексных соединений.

Очевидно, чтобы эффективно использовать для конкретных областей производства материалы, содержащие в своем составе ультра или наноразмерные порошки, во-первых, нужно знать требования к химическому, физическому и структурному составу и процентному содержанию этих порошков в конструкционном

материале. К сожалению, результатов исследований в этих вопросах практически не выявлено. Во-вторых, нужно знать реальные или, по крайней мере, потенциальные потребности в тех или иных порошках по объему производства. Например, годовая потребность в ультрадисперсном оксиде алюминия по разным косвенным источникам колеблется от десятка до сотен тонн. По другим десяткам важных порошков (оксидов, нитридов карбидов) даже такой информации не выявлено. Очевидно, что без знаний этих потребностей невозможно определиться с рациональными и экономически оправданными способами их получения. Отсюда нет и ясности, какие способы получения нанодисперсных материалов, какие технологии для этого надо совершенствовать или же создавать новые, какое для их реализации потребуются оборудование.

На сегодняшний день известно более пятнадцати основных способов получения нанодисперсных структур и более нескольких десятков их вариаций и комбинаций. Кратко рассмотрим некоторые из них с точки зрения выявления потенциально перспективных для промышленного производства нанодисперсных материалов. Предварительно отметим, что сейчас для нужд порошковой металлургии используются способы, основанные на механическом измельчении исходного материала. Технологии, основанные на механическом измельчении, не позволяют получить порошки с наноразмерами частиц, а также с достаточной химической чистотой. Анализ методов получения нанодисперсных материалов начнем с метода *осаждения* ультрадисперсных частиц *при химических реакциях* в жидкостях. Он основан на тех или иных фазовых превращениях (переохлаждение жидкости, пересыщение пара, перегрев твердых солей органических кислот, превышение предела растворимости и т.п.). [1]. Достоинствами этого метода являются возможность достаточно точного регулирования свойств получаемых порошков; возможность достижения высокой степени гомогенности на атомном уровне; возможность выдержать стехиометрию соединений. Недостаток метода – порошки состоят из бесформенных частиц, они не однородны по качеству и размерам (т.е. с различной формой и морфологией). Другим недостатком является большая длительность технологического цикла (к времени, затрачиваемому на предварительную подготовку и химические реакции, добавляется время необходимое для просушки, сепарации по фракциям и др.). Часть материала при сушке может попасть в окружающую среду и воздействовать на персонал.

Группа методов получения ультрадисперсных порошков *испарением с последующим сверхбыстрым охлаждением* исследована и реализована в экспериментальных установках. В этой группе методы отличаются способом испарения исходного материала: электрический взрыв проволок, испарение твердого материала пучком электронов или лазерным лучом, плазмохимический метод и нагрев материала ВЧ или СВЧ токами.

Примером метода электрического взрыва проволок может служить технология, разработанная Томским НИИ ВН [2]. Дисперсность порошка, структура частиц и другие свойства определяются параметрами разрядного контура, материалом и геометрическими размерами проволоки (фольги) и характеристиками газовой среды, в которой производится взрыв. Основными достоинствами метода являются: возможность получения порошков сплавов, возможность получения частиц с практически идеально сферической формой. К недостаткам метода следует отнести повышенную энергоемкость и ограниченную производительность единичной установки.

Примером метода, основанного на испарении твердого материала пучком электронов, может служить технология, разработанная в ИТПМ СО РАН и ИЯФ СО РАН [3]. Процесс заключается в испарении твердого материала концентрированным

пучком электронов, последующим быстрым охлаждением паровоздушной смеси с конденсацией вещества в виде наночастиц и улавливанием полученного порошка. Необходимая для испарения плотность мощности обеспечивается использованием в качестве теплового источника ускорителя серии ЭЛВ мощностью до 100 кВт. Способ обладает рядом достоинств: высокий к.п.д. трансформации электрической энергии в тепловую энергию; возможность изменения размеров образующихся частиц путем регулирования параметров процесса. Производительность установки достигает десятки килограммов в час [3]. К существенным недостаткам метода можно отнести повышенную энергоемкость, воздействие ионизирующего излучения и возможность реализации только на объектах ядерной энергетики.

Плазмохимический метод осуществляется на дуговых плазмотронах – устройствах, где дуга, нагревающая поток обдуваемого ею газа до нескольких тысяч градусов, горит между анодом и катодом. Суть метода заключается в том, что если в низкотемпературную плазму поместить нужный материал, то с ним начинают происходить сначала химические, а затем физические превращения, в частности конденсация за чрезвычайно короткое время – тысячные доли секунды. При этом возникает резкий перепад температур, до 10^5 - 10^7 градусов в секунду. В результате материал очень быстро охлаждается и кристаллизуется. Эксперименты показали, что таким способом можно получить широчайший спектр материалов с размером частиц от 10 до 100 нм. К достоинствам метода относятся возможность получения порошков тугоплавких металлов, в том числе твердых сплавов. Недостатками метода можно назвать повышенную энергоемкость, малые объемы получаемого порошка, трудность уловить в установке весь основной и побочный материал.

Метод, основанный на нагреве материала ВЧ или СВЧ токами, предназначен для получения нанокристаллических порошков оксидов, нитридов, некоторых металлов и порошковых композиций конденсацией из высокотемпературного химически реагирующего газового потока. Химическая реакция, приводящая к образованию конденсированного продукта осуществляется в потоке азота, кислорода или воздуха, нагретых до температуры 2000-3000° К с помощью энергии микроволнового излучения. Изменением режимных параметров технологического процесса можно изменять дисперсность, фазовый и химический состав получаемых порошков. Использование микроволнового разряда позволяет получать высокочистую технологическую плазму, не загрязненную материалами электродов, и обеспечивает высокую управляемость параметрами потока при сравнительно небольшой электрической мощности. Метод позволяет получать композиционные системы и индивидуальные вещества с заданными свойствами, химическим, фазовым составом и дисперсностью. К недостаткам метода можно отнести: высокую энергоемкость; повышенные требования к чистоте исходного материала; малые объемы производства, воздействие СВЧ на окружающую среду.

Еще одним методом получения ультрадисперсных порошков является золь-гель метод. Примером золь-гель процесса синтеза порошков сложных оксидов, является разработка технологии для редких элементов IV-V групп и щелочных или щелочноземельных элементов в ИХТРЭМС им. И.В. Тананаева [4]. Основные достоинства метода заключаются в том, что он позволяет синтезировать порошки, не требующие дальнейшей высокотемпературной обработки; позволяет получать порошки достаточно узкого фракционного спектра. Недостатками метода являются многооперационность и длительность технологического процесса; ограниченность применения метода редкоземельными элементами.

Аналогичный анализ был проведен и для других методов получения нанодисперсных материалов. К сожалению, собранная обширная информация

свидетельствует, что даже по известным способам достаточно изученными являются собственно вопросы формирования (или синтеза) частиц, но не готового продукта (порошков). Фактически из поля зрения были упущены вопросы управления качеством процесса, выделения и селекции готовых частиц по свойствам; обеспечения стабильности свойств готового продукта, проблемы его упаковки и т.д.

Кроме того многие технологии получения нанодисперсных материалов продолжают оставаться крайне дорогостоящими, например из-за низкой производительности, значительной энергоемкости, длительности технологического процесса. Помимо этого оказались не изучены вопросы экологического воздействия как самих установок на персонал и окружающую среду (воздействие электромагнитного, СВЧ и др. видов излучений, шума, тепла и т.д.), так и получаемых порошков на обслуживающий персонал. Среди многочисленных направлений исследований по нанодисперсным материалам, проводимых в России, практически отсутствуют упоминания о возможных рисках и негативных последствиях развития нанотехнологии и применения наноматериалов. Отсутствуют данные о токсикологических свойствах этих материалов, допустимых дозах и концентрациях, а также о методах их измерения, что делает практически невозможной оценку риска работы с ними. В тоже время за рубежом уже изучаются последствия потенциального ущерба, который наноматериалы могут нанести здоровью человека и окружающей среде. Речь идет, прежде всего, о респираторных и легочных заболеваниях, включая рак легких.

В завершении можно сделать два принципиальных вывода.

Первый вывод: не один из описанных способов получения нанодисперсных материалов по совокупности критериев нельзя отнести к промышленным или опытно-промышленным. Следовательно, весьма актуальной остается задача по поиску новых или по существенной модернизации известных способов получения ультра и наноразмерных порошков, с параллельной разработкой для них высокопроизводительных технологических процессов и соответствующего промышленного оборудования.

Второй вывод взаимосвязан с первым: при разработке промышленных технологий необходимо выявлять и оперативно устранять возможные риски экологического воздействия установок на персонал и окружающую среду.

Таким образом, для широкого распространения в промышленности (в первую очередь в машиностроении) конструкционных материалов с ультра и нано компонентами предстоит решить сложную многокритериальную проблему разработки промышленных технологий получения нанодисперсных порошков.

Список литературы:

1. Бардаханов С.П., Корчагин А.И., Куксанов Н.К. и др. Получение нанодисперсных порошков пучком ускоренных электронов в атмосфере воздуха // Сборник научных трудов V Всерос. Конф. Физикохимия Ультрадисперсных Систем, Екатеринбург. 2001. -С. 64-68.
2. Калинин В.Т., Локишин Э.П., Иваненко В.И., Громов О.Г. Исследование и разработка методов получения порошков сложных оксидов редких элементов IV-V групп и щелочных или щелочноземельных элементов заданного гранулометрического состава // Статьи трудов конференции к 75-летию КНЦ «Формирование основ современной стратегии природопользования в Евро-Артическом регионе». Апатиты: КНЦ, 2005. URL: <http://www.kolasc.net.ru/russian/innovation/ksc-75.html>.
3. Способ получения наночастиц платиновых металлов: пат. 2344021 Рос. Федерация: МПК51 В22F9/14/ В.Ф. Борбат, О.Н. Семенова; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского". – № 2007104474/02; заявл. 05.02.2007; опубл. 20.01.2009.
4. Яворовский Н.А. Электрический взрыв проводников метод получения ультрадисперсных порошков. Автореферат дисс. канд. техн. наук. Томск, 1982.

А. В. Садыков к.т.н, Д. А. Садыкова, Д. Б. Вафин д.т.н.

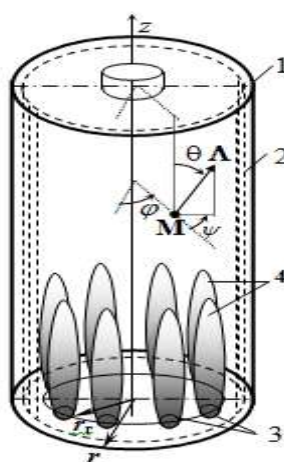
Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ»
Россия, г. Нижнекамск
sadykov@land.ru

ТРЕХМЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТРУБЧАТЫХ ПЕЧЕЙ

Проведены численные исследования пространственного распределения температуры, осредненных значений скоростей турбулентного течения продуктов сгорания газообразного топлива в топочных камерах трубчатых печей цилиндрического типа нефтехимической промышленности. Сложный теплообмен в камере радиации моделируется трехмерными дифференциальными уравнениями сохранения энергии, компонентов количества движения, неразрывности, $k-\varepsilon$ модели турбулентности, одноступенчатой модели горения, интегро-дифференциальным уравнением переноса энергии излучения. Изучено влияние трехмерного изменения параметров потока на распределение плотностей тепловых потоков по трубчатому экрану, и др. параметров.

Ключевые слова: теплообмен, излучение, турбулентность, трубчатые печи.

Тепловые расчеты топок трубчатых печей цилиндрического типа в основном проводятся по интегральным методам или в двумерном приближении. Из-за дискретного расположения горелок и труб течение в топочных камерах имеет пространственный характер. Поэтому представляет интерес изучение эффектов трехмерного изменения различных параметров потока в топочных камерах трубчатых печей на тепловые режимы реакционных труб. Упрощенная схема камеры радиации трубчатой печи цилиндрического типа и система координат представлены на рис.1. Трубчатый экран печи заменяется сплошной непрозрачной для излучения цилиндрической поверхностью с эффективной степенью черноты $\varepsilon_{\text{эф}}$, проходящей по осям труб.



**Рис. 1—упрощенная схема топочной камеры и система координат:
1-футеровка, 2-трубчатый экран, 3-горелки, 4-факел.**

Для нахождения поля температур в объеме топочной камеры решается уравнение сохранения энергии

$$\operatorname{div}(\rho c_p T \mathbf{v}) = \operatorname{div}(\lambda_{\text{эф}} \mathbf{grad} T) + S_T, \quad S_T = Q - \operatorname{div} \mathbf{q}_p, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{эф}} = \lambda + \lambda_T$, λ , λ_T – коэффициенты эффективной, молекулярной и турбулентной теплопроводности соответственно; c_p – удельная теплоемкость; $\mathbf{v}$ – вектор скорости течения; ρ – плотность; T – температура дымовых газов в точке $\mathbf{M}$; Q – объемная плотность тепловыделения в результате сгорания топлива; $\mathbf{q}_p$ – вектор плотности интегрального по спектру лучистого потока тепла.

Для нахождения дивергенции лучистых потоков решается уравнение переноса энергии излучения

$$\Delta \nabla I_\lambda(\mathbf{M}, \Lambda) + k_\lambda(\mathbf{M}) I_\lambda(\mathbf{M}, \Lambda) = \alpha_\lambda(\mathbf{M}) I_{b\lambda}(T) + \frac{\beta_\lambda(\mathbf{M})}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(\mathbf{M}, \Lambda') \gamma_\lambda(\Lambda, \Lambda') \Lambda' d\Omega, \quad (2)$$

где $I_\lambda(\mathbf{M}, \Lambda)$ – спектральная интенсивность излучения в точке $\mathbf{M}$ в направлении Λ ; $I_{b\lambda}(T)$ – спектральная интенсивность излучения черного тела при температуре T ; $k_\lambda(\mathbf{M}) = \alpha_\lambda + \beta_\lambda$ – спектральный коэффициент ослабления; $\alpha_\lambda(\mathbf{M})$, $\beta_\lambda(\mathbf{M})$ – спектральные коэффициенты поглощения и рассеяния; $\gamma_\lambda(\Lambda, \Lambda')$ – индикатриса рассеяния.

На границе области учитывается излучение и отражение стенки

$$I_\lambda(\mathbf{M}, \Lambda) = \varepsilon_\lambda(\mathbf{M}, \Lambda) I_{b\lambda}(T_w) + \frac{1}{\pi} \int_{\Lambda' \cdot \mathbf{n} > 0} I_\lambda(\mathbf{M}, \Lambda') r_w(\mathbf{M}, \Lambda') p_\lambda(\mathbf{M}, \Lambda', \Lambda) \mathbf{n} \Lambda' d\Omega \quad (3)$$

при $\Lambda \mathbf{n} < 0$. Здесь $\varepsilon_\lambda(\mathbf{M}, \Lambda)$, $r_w(\mathbf{M}, \Lambda')$ – спектральные степень черноты и отражательная способность стенки в граничной точке $\mathbf{M}$; $p_\lambda(\mathbf{M}, \Lambda, \Lambda')$ – индикатриса отражения стенки.

Поле скоростей находится путем решения трехмерных уравнений движения и неразрывности. Состояние дымовых газов рассматривается в приближении идеального газа. Для замыкания уравнений движения используется k – ε модель турбулентности. Горение рассматривается в рамках модели простой химической реакции. Скорость химической реакции определяется моделью вихревой диссипации.

Уравнения сохранения можно записать в единой обобщенной форме

$$\operatorname{div}(\rho \Phi \mathbf{v}) = \operatorname{div}(\Gamma_\Phi \mathbf{grad} \Phi) + S_\Phi. \quad (4)$$

Здесь Φ – обобщенная неизвестная, вместо которой могут стоять осредненные по времени компоненты вектора скорости $\mathbf{v}$, кинетическая энергия турбулентности k и др. Различие уравнений обусловлено источниковыми членами S_Φ , коэффициентами диффузии Γ_Φ .

Для получения дискретных аналогов уравнений использован метод контрольного объема в сочетании с методом конечных разностей [1, 2].

Уравнения дополняются граничными условиями. Для уравнения энергии, уравнений движения, уравнений модели турбулентности, уравнений модели горения на входном участке в топку ставится граничное условие 1 рода. На оси симметрии или плоскости симметрии задается условие симметрии. Для уравнений движения на твердой границе ставятся условия «прилипания» и «непроницаемости». На жесткой стенке для уравнений модели горения задается условие отсутствия потока. Для уравнения энергии на поверхности нагрева ставится граничное условие 3-рода. Считается, что температура нагреваемого продукта внутри труб меняется по линейной зависимости. На торцах задается граничное условие с учетом отвода тепла через стенку при известной температуре окружающей среды. С внутренней стороны стены футерованы каолиновой ватой. На выходе из топки для большинства параметров задается условие нулевого градиента. На твердой границе диффузионный поток кинетической энергии турбулентности полагается равным нулю.

Перенос излучения рассматривается в рамках S_2 -приближения метода дискретных ординат (МДО). Интегральный по спектру коэффициент поглощения газообразных продуктов сгорания вычисляется по модели взвешенной суммы серых газов [3].

Алгоритм расчета турбулентного течения дымовых газов основан на процедуре SIMPLE и подробно описан в [1, 2, 4]. Для описания турбулентного течения и теплообмена вблизи твердой границы используется метод пристеночных функций [4]. Решение задачи также как в [1] проводится по итерационной схеме.

Расчеты проведены для трубчатой печи типа ВА-301, которая используется на нефтеперерабатывающих заводах для нагрева сырья. Печь – вертикальнофакельного сжигания газового топлива, с вертикальным расположением труб змеевика в одной камере радиации (рис.1). По периметру камеры радиации на расстоянии 2.074м от оси установлен однорядный трубчатый экран, который состоит из 4 змеевиков. Каждый из этих змеевиков располагается в четвертой части камеры радиации. Нагреваемый продукт подается четырьмя потоками в эти змеевики. В поду печи симметрично расположены 8 горелок диффузионного горения. Симметричное расположение горелок и наличие осевой симметрии позволяют разбить объем топki на 4 одинаковые части, в каждой из которых расположены 2 горелки и один змеевик. Поэтому достаточно провести расчет для одной такой части.

Эффективная степень черноты поверхности нагрева, определенная по методике, описанной в [2], равна $\varepsilon_{\text{эф}} = 0.65$. В качестве газообразного топлива используется природный газ, а в качестве окислителя – воздух.

Для исследования трехмерных эффектов проведены 4 варианта расчетов, результаты которых приведены ниже. В первом варианте количество горелок совпадает с проектным значением (8 горелок), во втором варианте – 12 горелок. В третьем варианте используется одна горелка в центре, площадь сечения амбразуры которой равна суммарной площади выходных сечений амбразур 8 проектных горелок. В четвертом варианте горелок 8, но они расположены ближе к поверхности нагрева на 0.3м по сравнению с первым вариантом. При этом массовый расход горючей смеси на печь остается одинаковым (4.797 кг/с).

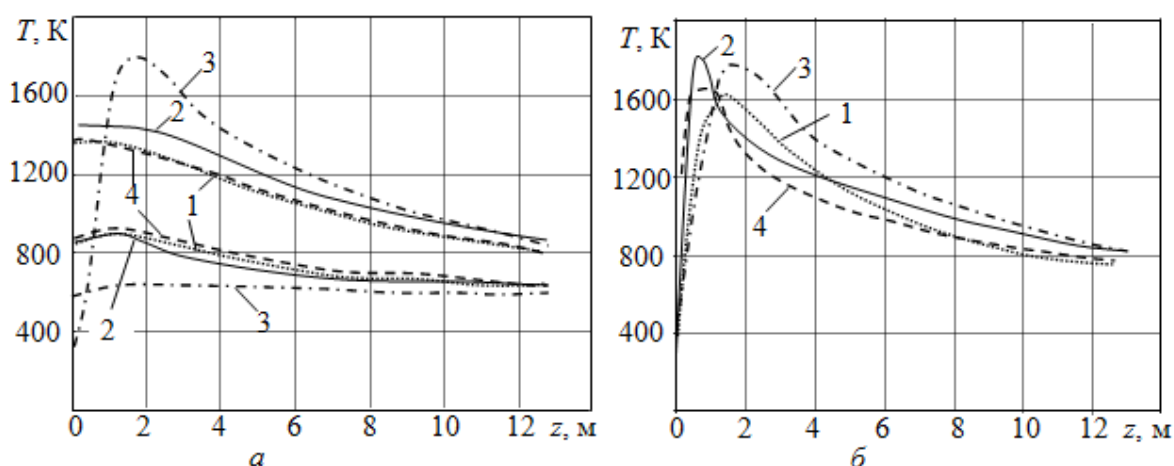


Рис. 2- Распределения температуры газов по высоте топki: а) температура продуктов сгорания на оси симметрии (верхние кривые) и у труб (нижние кривые); б) температура газов вдоль вертикали, проходящей через ось горелки. Обозначения: 1 – 8 горелок; 2– 12 горелок; 3 – одна горелка в центре; 4 – 8 горелок, смещенных к поверхности нагрева на 0.3м.

На рис. 2 приведены распределения температуры продуктов сгорания на оси симметрии цилиндрической топки и у труб (рис. 2а), а также температуры вдоль оси одной из горелок (рис. 2б) по высоте топки для четырех вариантов. На оси симметрии топки для 3-го варианта наблюдается ярко выраженный пик в распределении температуры (рис. 2а). Начиная с высоты $z = 1.2\text{м}$, температура на оси для этого варианта существенно выше. Но ближе к выходу кривые практически выравниваются. Максимальная температура на оси горелки наблюдается для 2-го варианта (рис. 2б) на расстоянии 0.7м от пода печи. При этом для 3-го варианта ось горелки совпадает с осью симметрии топки. При смещении горелок к поверхности нагрева температура труб повышается на начальном участке. С удалением от горелок ($z > 8\text{м}$) кривые 1 и 4 практически совпадают. В третьем варианте (один факел в центре) температура поверхности нагрева получается более равномерной.

На рис. 3а показаны распределения поверхностных плотностей лучистых тепловых потоков к поверхности нагрева по высоте топки. Для вариантов 1, 2, 4 эти распределения соответствуют вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии под углом $\varphi = 45^\circ$ (см. рис. 1). В 4-м варианте имеется острый пик примерно на высоте $z = 0.7\text{м}$. При расположении горелок ближе к поверхности нагрева (кривая 4) максимумы плотностей лучистых тепловых потоков смещаются ближе к поду и являются более выраженными. На расстояниях $z < 4\text{м}$ наблюдается сильное различие в распределениях плотностей тепловых потоков. При расположении одной горелки в центре печи распределения температур и плотностей лучистых тепловых потоков по длине труб получаются более равномерными.

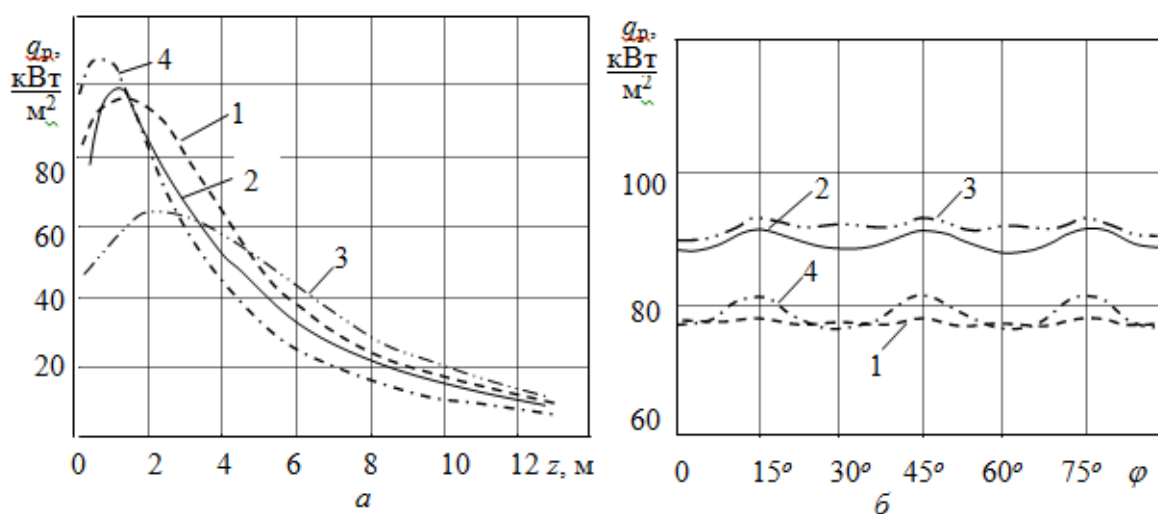


Рис. 3. Распределения поверхностных плотностей лучистых тепловых потоков q_p к трубчатому экрану: а) по высоте топки, обозначения как на рис 2; б) по периметру топки в случае 12 горелок на разных высотах z : 1 – $z = 0.136\text{м}$; 2 – $z = 0.53\text{м}$; 3 – $z = 1.56\text{м}$; 4 – $z = 2.13\text{м}$.

Проанализированы распределения поверхностных плотностей лучистых тепловых потоков к поверхности нагрева q_p и температур по периметру трубчатого экрана на разных высотах z . В их распределениях наблюдается периодический характер с локальными экстремумами, связанный с дискретным расположением горелок. В первом варианте (8 горелок) локальные максимумы расположены посередине между горелками. Колебания температур на одинаковой высоте составляют $10\text{--}15^\circ\text{C}$, а

колебания плотностей $q_p - 7-10 \text{ кВт/м}^2$. При $z \geq 5 \text{ м}$ профили температур по периметру топки выравниваются. Максимальное значение q_p (88930 Вт/м^2) наблюдается при $z = 1.5-2 \text{ м}$ и находится посередине между горелками.

При смещении горелок ближе к поверхности нагрева (на 0.3 м) локальные максимумы в распределениях q_p , T по периметру расположены напротив горелок. В области $z < 2.1 \text{ м}$ наблюдается ярко выраженный периодический характер в распределениях. При $z > 1.65 \text{ м}$ амплитуды колебаний уменьшаются, а при $z > 5.82 \text{ м}$ профили q_p , T выравниваются. Максимальные значения q_p наблюдаются примерно при $z \approx 0.83 \text{ м}$.

Во втором варианте (12 горелок) в распределениях q_p (рис. 3б), T также наблюдается периодический характер. На малых высотах максимумы (рис. 3б) расположены напротив горелок и посередине между ними. При высотах $z > 0.52 \text{ м}$ максимумы q_p располагаются напротив горелок. На высоте $z = 1.56 \text{ м}$ имеются малые и большие пики в распределениях q_p . При этом большие пики находятся напротив горелок, малые – посередине между горелками. Максимальные значения q_p (102 кВт/м^2) наблюдаются примерно при $z=1-1.5 \text{ м}$. Наибольшие колебания q_p составляют 5940 Вт/м^2 при $z = 2.13 \text{ м}$. По мере удаления от пода амплитуда колебаний уменьшается. При $z > 8 \text{ м}$ распределение q_p по периметру почти выравнивается, с малыми локальными максимумами напротив горелок и посередине между ними. В распределениях температур по периметру наблюдается аналогичная картина.

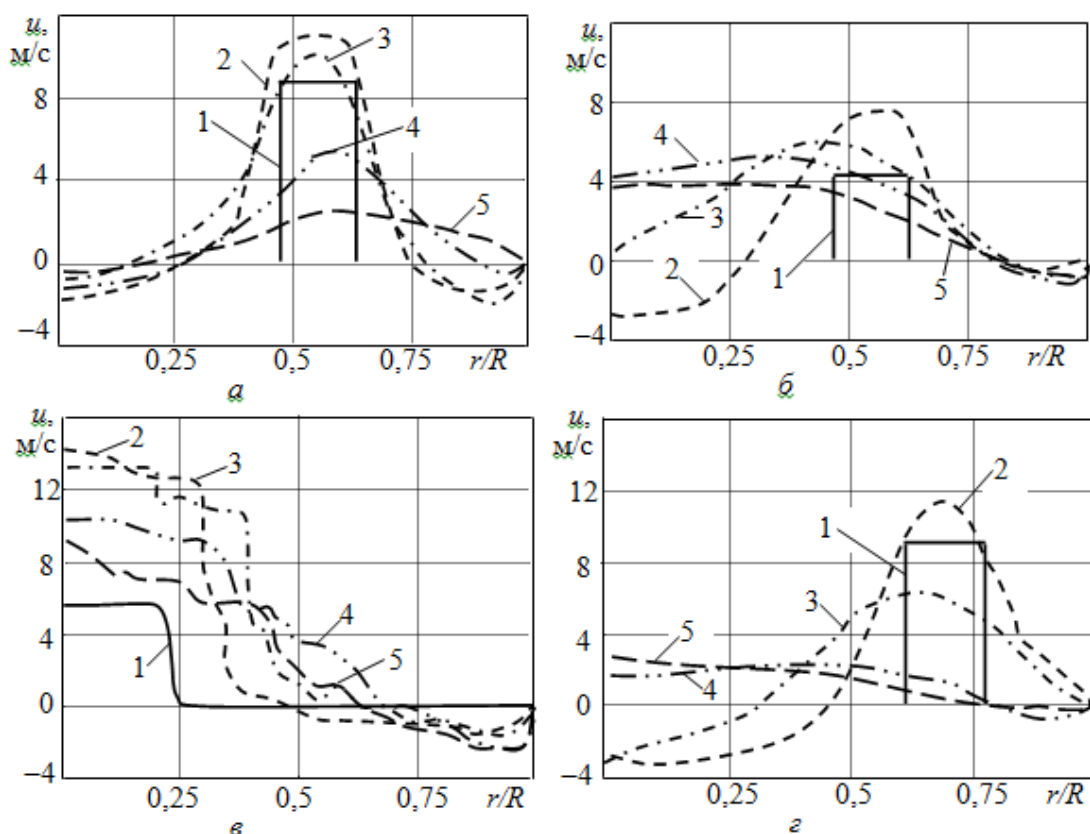


Рис. 4. Профили продольной скорости продуктов сгорания на разных высотах z : 1 – $z = 0$; 2 – $z = 0.5 \text{ м}$; 3 – $z = 1.5 \text{ м}$; 4 – $z = 3 \text{ м}$; 5 – $z = 4.5 \text{ м}$. а – 8 горелок; б – 12 горелок; в – одна горелка в центре; г – 8 горелок, смещенных к поверхности нагрева.

На рис.4 приведены профили продольной скорости поперек печи для плоскости, проходящей через ось симметрии и ось горелки. В 3-м варианте зона обратных токов возникает только около поверхности нагрева. В 1-м и 2-м вариантах зоны обратных токов возникают как в центре, так и возле поверхности нагрева. При расположении 8 горелок ближе к трубам зона обратных токов около поверхности нагрева получается достаточно короткой, а в центре она более широкая по сравнению с первыми двумя вариантами. Увеличение количества горелок приводит к более коротким зонам обратных токов. При большем количестве горелок характер течения быстрее становится двумерным.

При двумерном моделировании невозможно определить неравномерность обогрева труб по периметру топки. В то же время распределения q_p по высоте топки в трехмерном и двумерном случаях получаются почти одинаковыми. Отличия q_p наблюдаются вблизи устьев горелок и вблизи торцов. При $z > 4$ м графики почти совпадают. Трехмерные расчеты теплообмена можно использовать для выбора оптимальных решений при проектировании и реконструкции цилиндрических трубчатых печей. Необходимые распределения тепловых потоков к поверхности нагрева по условиям протекания процессов, допустимую температуру труб можно обеспечить путем выбора горелок соответствующей мощности, конструкции, а также путем их оптимального расположения.

Список литературы:

1. Вафин Д. Б., Садыков А.В. Трехмерная математическая модель внешнего теплообмена в топках трубчатых печей // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2010. – №2. – С.18–23.
2. Вафин Д.Б. Сложный теплообмен: радиационный теплообмен в энергетических установках / Данил Вафин. – Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 251 с.
3. Smith T. F. Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model / T. F. Smith, Z. F. Shen, J. N. Friedman // J. Heat Transfer. – 1982. – №104. – P. 602– 608.
4. Белов И.А., Кудрявцев Н.А. Теплоотдача и сопротивление пакетов труб. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 223 с.

Д. А. Страбыкин д.т.н., М. Н. Томчук к.т.н.

«Вятский государственный университет»
факультет автоматики и вычислительной техники
кафедра электронных вычислительных машин
Россия, г. Киров
strabykin@mail.ru, m.tomchuk@mail.ru

ЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ ДЕДУКТИВНОГО ВЫВОДА

В работе даётся содержательная постановка задачи логического прогнозирования развития ситуаций, приводится формальное описание задачи прогнозирования как задачи дедуктивного вывода и предлагается метод логического прогнозирования на основе дедуктивного вывода, применение которого иллюстрируется на примерах с использованием исчисления высказываний и исчисления предикатов.

Ключевые слова: логическое прогнозирование развития ситуаций, дедуктивный логический вывод заключений, исчисление высказываний, исчисление предикатов первого порядка

В условиях рыночной экономики информация выступает как один из основных товаров. В связи с этим всё большее внимание в организациях различных форм собственности уделяется развитию специальных подразделений: служб, отделов и центров аналитико-прогнозной информации. Успех в деятельности таких подразделений в значительной степени зависит от их компьютерного и программного обеспечения. Современные программные продукты, используемые для прогнозирования развития различных ситуаций, опираются на их математическое моделирование. Представляет интерес исследование возможностей прогнозирования развития ситуаций на основе их логического моделирования.

Содержательная постановка задачи

Для описания задачи логического прогнозирования ситуаций введём ряд основных понятий.

Событие в предметной области характеризуется множеством простейших утверждений – фактов, зафиксированных в определенный момент времени. Наступление события происходит в тех случаях, когда определенные подмножества этих фактов становятся истинными. В простейшем случае событие может представляться одним фактом.

Ситуация в предметной области характеризуется совокупностью событий и отношений между ними. Ситуация складывается тогда, когда наступают характеризующие её события и устанавливаются необходимые отношения между ними. В простейшем случае ситуация может представляться одним событием.

Фаза развития (состояние) ситуации представляется подмножеством событий и отношений, описывающих ситуацию. Ситуация входит в некоторую фазу, как только наступают характеризующие её события и устанавливаются необходимые отношения между ними.

Пространство развития ситуации – это множество фаз (состояний), через которые может проходить развитие ситуации.

Траектория развития ситуации – последовательность фаз, через которые проходит развитие ситуации.

Предсказание траектории развития ситуации – определение для ситуации, находящейся в текущей фазе (состоянии), одной или нескольких фаз (состояний), в которые перейдет ситуация в последующие моменты времени.

Точность предсказания – отношение числа верных предсказаний к их общему числу.

Введённые понятия позволяют сформулировать основную задачу прогнозирования развития ситуаций как задачу предсказания траектории (траекторий) развития ситуации.

Формальное описание задачи прогнозирования как задачи логического вывода

Для упрощения описания задачи прогнозирования как задачи логического вывода введем ряд определений.

Определение 1. Формула $X_1 \& X_2 \& \dots \& X_K \rightarrow Y$ называется формулой логического следования, а символ « $\rightarrow$ » – знаком логического следования, который разделяет формулу на левую (антецедент) и правую (консеквент) части. Знаки конъюнкции в формуле могут быть опущены.

Определение 2. Схемой логического вывода называется ориентированный граф, вершинам которого сопоставлены формулы (номера формул) посылок, причем, входящие дуги помечены переменными из левых, а исходящие – из правых частей формул, и вершины соединены между собой в соответствии с суперпозицией их формул в выводе; переменные свободных входящих дуг графа совпадают с переменными из левой, а свободных исходящих дуг – из правой части формулы заключения.

В качестве примера рассмотрим схему логического вывода заключения $A \rightarrow E$ из множества посылок: 1) $A \rightarrow B$; 2) $A \rightarrow C$; 3) $C \rightarrow D$; 4) $B \rightarrow D$; 5) $B \rightarrow E$; 6) $E \rightarrow K$; 7) $D \rightarrow E$. Схема логического вывода для данного примера приведена на рис. 1а. Номера вершин в схеме соответствуют номерам формул посылок, а соединение вершин выполнено в соответствии с суперпозицией формул в выводе (вершиной с номером 8 представлено заключение).

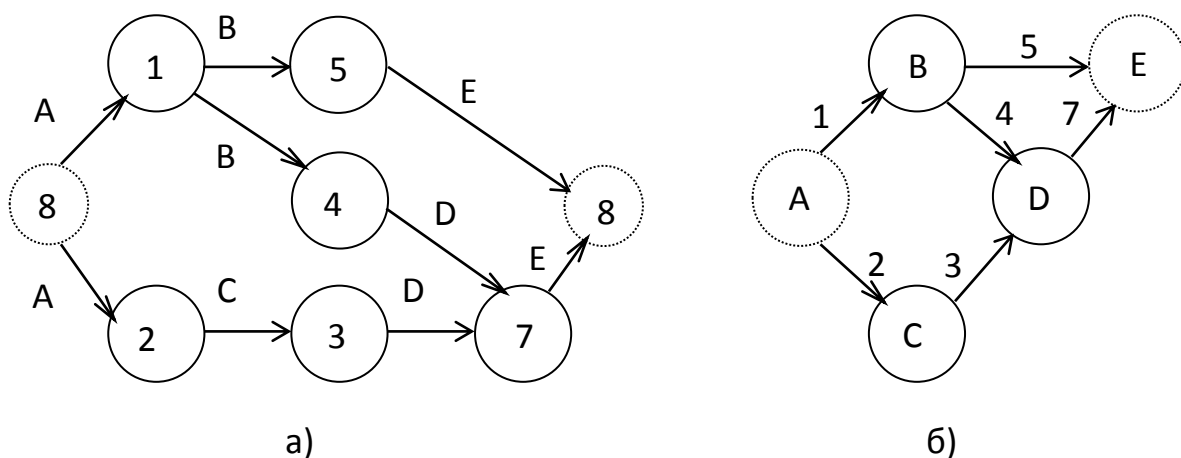


Рис. 1 – Схемы: логического вывода (а) и прогнозирования (б).

Определение 3. Схемой логического прогнозирования называется ориентированный граф, вершинам которого сопоставлены переменные из правых частей формул посылок, а дугам – номера формул посылок, и вершины соединены между собой в соответствии с суперпозицией их формул в выводе.

Схема логического прогнозирования для рассматриваемого примера приведена на рис. 1б.

Формальное описание задач логического прогнозирования P может быть определено следующим образом: $P = \langle m^C, m^S, v, k, r \rangle$, где m^C – множество новых событий; m^S – множество текущих событий и ситуаций с отношениями между ними; $v \in \{v^+, v^-, v^0\}$ – вид запроса: v^+ – прогнозирование последующих (за заданной фазой) событий и фаз, v^- – прогнозирование предшествующих (заданной фазе) событий и фаз, v^0 – прогнозирование последовательностей фаз, которые сменяют друг друга при развитии ситуации от одной заданной фазы до другой; k – конечная фаза (состояние) развития ситуации (может отсутствовать, при $v = v^+$, когда ставится вопрос «какая фаза (состояние) последует за текущей фазой?»); r – множество результатов прогнозирования, которое может содержать схему прогнозирования s , а также прогнозируемые в следующий момент времени фазы (состояния) m^1 и последовательности фаз (состояний) m^L .

Формальное описание задач логического вывода D , соответствующих задачам логического прогнозирования P , можно представить следующим образом: $D = \langle M^F, M^P, V, d, R \rangle$, где M^F – множество новых фактов; M^P – множество текущих фактов и правил; $V \in \{V^+, V^-, V^0\}$ – вид дедуктивного логического вывода: V^+ – вывод логических следствий, V^- – определение фактов, V^0 – вывод заданного заключения; d – заключение (цель) (может отсутствовать, когда ставится вопрос «что выводится из имеющихся фактов?»); R – множество результатов логического вывода, которое может содержать схему вывода S и схему прогнозирования s , а также вершины схемы прогнозирования, непосредственно следующие из вершин текущего шага M^1 и последовательности вершин состояний M^L .

Основные виды задач логического прогнозирования и соответствующие им задачи дедуктивного вывода приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Соответствие задач прогнозирования и вывода

Задача прогнозирования	Задача дедуктивного вывода
В какие состояния возможен переход из текущего состояния?	Вывод логических следствий из заданных фактов
Какие события (состояния) необходимы (предшествуют) для перехода в данное состояние?	Определение фактов, необходимых для успешного вывода заданного следствия (заключения)
Возможно ли достижение некоторого целевого состояния из некоторого заданного состояния и если да, то какие траектории ведут к нему?	Выполнение дедуктивного вывода заданного заключения и построение схемы вывода, определение на схеме возможных нитей вывода

Формальное описание задачи прогнозирования как задачи дедуктивного вывода позволяет строить метод прогнозирования на основе метода логического вывода.

Метод логического прогнозирования на основе дедуктивного вывода заключений

Логическое прогнозирование представляет собой циклический процесс, состоящий из ряда шагов. Перед началом этого процесса задача логического прогнозирования формулируется как задача дедуктивного логического вывода заданного заключения: $D = \langle M^F[t], M^P, V^0, d, R \rangle$, где $M^F[t]$ – множество фактов, поступивших на шаге t (предполагается, что $M^F[t]$ и M^P образуют непротиворечивое множество). Первоначально $t=1$.

В процессе прогнозирования выполняются следующие действия.

1. Принимается новое множество $M^F[t]$ фактов. Если какой-либо поступивший на данном шаге факт совпадает с каким-либо литералом дизъюнкта заключения d , то логический вывод считается завершенным успешно, в дальнейшем прогнозировании нет необходимости. В этом случае выполняется пункт 9, иначе при $t=1$ пункт 3, а при $t>1$ следующий пункт.

2. Проверяется успешность прогноза: совпадение состояний, определяемых новым множеством фактов $M^F[t]$ и ранее спрогнозированных состояний. Если прогноз успешен, то выполняется пункт 6, иначе следующий пункт.

3. Производится решение задачи логического вывода $M^P \& M^F[t] \Rightarrow d$ с поиском всех нитей вывода. Если логический вывод завершается неудачно, то прогнозирование с помощью дедуктивного вывода невозможно. В этом случае выполняется пункт 9, иначе следующий пункт.

4. Строится схема успешного логического вывода S .

5. Строится схема логического прогнозирования s на основе схемы логического вывода S .

6. По схеме s для множества фактов $M^F[t]$ определяются прогнозируемые вершины (состояния – ситуации) $M^1[t]$, которые ожидаются на следующем шаге.

7. По схеме s для множества фактов $M^F[t]$ формируются цепочки вывода $M^L[t]$ от текущего состояния (состояний) до состояния, соответствующего заключению d , которые представляют собой долгосрочные прогнозы.

8. Осуществляется переход к следующему шагу: значение шага t увеличивается на единицу и производится переход к пункту 1.

9. Конец. Прогнозирование завершается.

Пример прогнозирования с использованием исчисления высказываний

Рассмотрим прогнозирование на примере задачи, для представления знаний в которой используется исчисление высказываний. Предположим, что формальное описание задачи логического вывода (соответствующей задаче прогнозирования) имеет следующий вид.

$D = \langle M^F, M^P, V^0, d, R \rangle$. Исходное множество фактов $M^F[1] = \{A\}$. Исходное множество посылок (M^P): 1) $A \rightarrow B$; 2) $A \rightarrow C$; 3) $C \rightarrow D$; 4) $B \rightarrow D$; 5) $B \rightarrow E$; 6) $E \rightarrow K$; 7) $D \rightarrow E$. V^0 – вывод заданного заключения d . Выводимое заключение d : 8) E . Множество решений $R = \{S, s, M^1, M^L\}$. Первоначально $t=1$.

В процессе прогнозирования выполняются следующие действия.

1. Принимается новое множество $M^F[1] = \{A\}$. Поскольку поступивший на данном шаге факт не совпадает с литералом заключения d и $t=1$, то выполняется пункт 3.

2. Производится решение задачи логического вывода $M^P \& M^F[1] \Rightarrow d$ с поиском всех нитей вывода [2]. Логический вывод завершается успешно, поэтому выполняется следующий пункт.

3. Строится схема успешного логического вывода S (рисунок 1а).

4. Строится схема логического прогнозирования s на основе схемы логического вывода S (рисунок 1б).

5. По схеме s для множества фактов $M^F[1]$ определяются прогнозируемые вершины (состояния – ситуации), которые ожидаются на следующем шаге (таблица 2, строка 1).

6. По схеме s для множества фактов $M^F[t]$ формируются цепочки вывода от текущего состояния (состояний) до состояния, соответствующего заключению d , которые представляют собой долгосрочные прогнозы (таблица 2, строка 1).

7. Осуществляется переход к следующему шагу: значение шага t увеличивается на единицу и производится переход к пункту 1.

При выполнении последующих двух шагов для новых фактов B и D подтверждается успешность прогноза (пункт 2) и по построенной на первом шаге схеме s формируются новые множества $M^1[t]$ и $M^L[t]$. Результаты выполнения всех четырех шагов прогнозирования показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Прогноз и его уточнение по шагам

Номер шага, t	Поступившие факты, $M^F[t]$	Прогноз на следующий шаг, $M^1[t]$	Общий прогноз, $M^L[t]$
1	A	B или C	$B \Rightarrow E$ или $B \Rightarrow D \Rightarrow E$ или $C \Rightarrow D \Rightarrow E$
2	B	E или D	E или $D \Rightarrow E$
3	D	E	E
4	E	–	–

Прогнозирование осуществляется на основе схемы прогнозирования на каждом шаге развития ситуации с учётом поступающих фактов. Прогноз завершается на шаге 4, так как поступивший факт совпадает с выводимым заключением.

Пример прогнозирования с использованием исчисления предикатов

Рассмотрим прогнозирование на примере задачи, для представления знаний в которой используется исчисление предикатов.

Пусть даны изначально пустые семи- и пятилитровый сосуды; цель состоит в поиске последовательности действий, которая позволит получить в семилитровом сосуде 4 литра жидкости. Для изменения состояний сосудов можно использовать три типа действий: сосуд можно целиком заполнить, сосуд можно целиком опустошить, жидкость можно перелить из одного сосуда в другой так, что либо первый сосуд станет пустым, либо второй целиком заполнится.

Воспользуемся формальным описанием задачи, предложенным в работе [1]. Будем считать, что предикат $S(u,v)$ обозначает состояние, при котором в семилитровом сосуде находится u литров жидкости, а в пятилитровом – v литров. Отношение $x+y=z$ представим предикатом $R(x,y,z)$, который принимает значение «истина», если $x+y=z$ и «ложь» – в противном случае. Отношение $x \leq y$ представим предикатом $N(x,y)$, который принимает значение «истина», если $x \leq y$ и «ложь» – в противном случае. Будем также считать, что эти отношения уже заданы (например, списком свободных от переменных

утверждений) или могут вычисляться по мере необходимости. Тогда формальное описание задачи представляется в следующем виде.

- 1) $1 \mapsto R(0,0,0), 1 \mapsto R(1,0,1), 1 \mapsto R(0,1,1), \dots$
- 2) $1 \mapsto N(0,0), 1 \mapsto N(0,1), 1 \mapsto N(1,1), 1 \mapsto N(1,2), \dots$
- 3) $S(x_1, y_1) \mapsto S(7, y_1);$ 4) $S(x_2, y_2) \mapsto S(x_2, 5);$
- 5) $S(x_3, y_3) \mapsto S(0, y_3);$ 6) $S(x_4, y_4) \mapsto S(x_4, 0);$
- 7) $R(u_1, v_1, y_5)N(y_5, 5)S(u_1, v_1) \mapsto S(0, y_5);$
- 8) $R(u_2, v_2, x_5)N(x_5, 7)S(u_2, v_2) \mapsto S(x_5, 0);$
- 9) $R(u_3, v_3, w_3)R(7, y_6, w_3)S(u_3, v_3) \mapsto S(7, y_6);$
- 10) $R(u_4, v_4, w_4)R(5, x_6, w_4)S(u_4, v_4) \mapsto S(x_6, 5);$
- 11) выводимая формула: $S(0,0) \mapsto S(4, y_7).$

Правила 3 и 4 определяют действия по заполнению сосудов извне, 5 и 6 – по опустошению сосудов. Правила 7 и 8 задают действия по переливанию из одного сосуда в другой до тех пор, пока первый не станет пустым, а 9 и 10 – пока второй не станет полным.

Дедуктивный логический вывод заключения 11 из посылок 1-10 методом деления дизъюнктов [2] позволяет построить схему прогнозирования, приведенную на рис. 2. Унифицирующие подстановки определяются в процессе логического вывода и имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \{0/x_1, 0/y_1\}, \quad \lambda_2 = \{5/y_7, 4/x_6, 9/w_4, 7/u_4, 2/v_4\}, \\ \lambda_3 &= \{7/u_{4.1}, 0/v_{4.1}, 7/w_{4.1}, 2/x_{6.1}\}, \quad \lambda_4 = \{0/x_{1.1}, 2/y_{1.1}\}, \\ \lambda_5 &= \{2/x_4, 5/y_4\}, \quad \lambda_6 = \{2/y_5, 2/u_1, 0/v_1\}. \end{aligned}$$

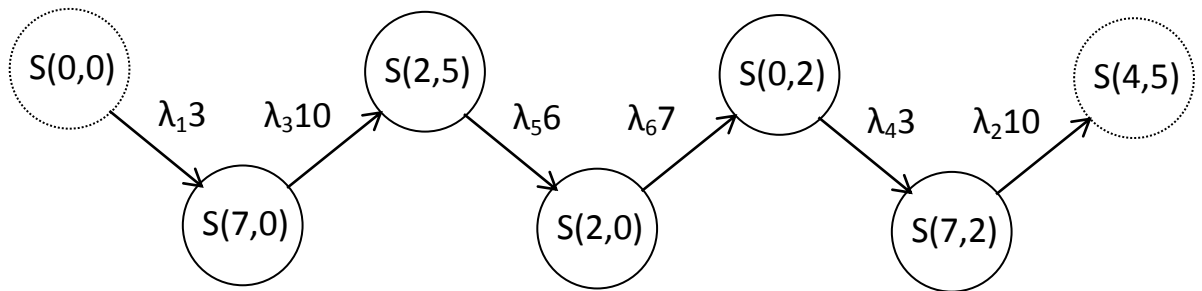


Рис. 2 – Схема прогнозирования.

Последовательность действий, которая оставит в семилитровом сосуде 4 литра жидкости, определяется по схеме логического прогнозирования как путь от начальной вершины $S(0,0)$ до конечной вершины $S(4,5)$. При этом правила перехода от одной вершины к другой применяются с учетом унифицирующих подстановок:

$$\begin{aligned} \lambda_1 3: & S(0,0) \mapsto S(7,0); \\ \lambda_3 10: & R(7,0,7)R(5,2,7)S(7,0) \mapsto S(2,5); \\ \lambda_5 6: & S(2,5) \mapsto S(2,0); \\ \lambda_6 7: & R(2,0,2)N(2,5)S(2,0) \mapsto S(0,2); \\ \lambda_4 3: & S(0,2) \mapsto S(7,2); \\ \lambda_2 10: & R(7,2,9)R(5,4,9)S(7,2) \mapsto S(4,5). \end{aligned}$$

Прогнозирование осуществляется на основе схемы прогнозирования на каждом шаге развития ситуации с учётом поступающих фактов. Пример прогнозирования на два шага по схеме, изображенной на рисунке 3, приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Пример прогнозирования при выполнении двух шагов.

Номер шага, t	Поступившие факты, $M^F[t]$	Прогноз на следующий шаг, $M^1[t]$	Общий прогноз, $M^L[t]$
1	$S(0,0)$	$S(7,0)$	$S(7,0) \Rightarrow S(2,5) \Rightarrow S(2,0) \Rightarrow S(0,2) \Rightarrow S(7,2) \Rightarrow S(4,5)$
2	$S(7,0)$	$S(2,5)$	$S(2,5) \Rightarrow S(2,0) \Rightarrow S(0,2) \Rightarrow S(7,2) \Rightarrow S(4,5)$

Процесс прогнозирования завершается на седьмом шаге, когда поступает факт $S(4,5)$.

Заключение

Предложенный метод логического прогнозирования развития ситуаций на основе дедуктивного вывода позволяет предсказывать траекторию развития ситуации при наличии заданного заключения (конечной фазы развития ситуации). Метод является универсальным и позволяет решать задачи прогнозирования в любой предметной области, которая может быть описана формулами исчисления высказываний или исчисления предикатов первого порядка.

Применение логической модели знаний и методов логического вывода для прогнозирования развития ситуаций представляет интерес для исследований по нескольким причинам, среди которых можно отметить универсальность и естественность представления знаний в виде логических формул, возможность построения семантической картины хода рассуждений, хорошую масштабируемость описания задачи (чего нельзя сказать о многих других моделях).

Немаловажным является наличие методов логического вывода, основанных на процедуре деления дизъюнктов [2], как для исчисления высказываний, так и для исчисления предикатов первого порядка. Эти методы обладают высокой степенью параллелизма, что актуально с учетом современных тенденций развития аппаратных средств вычислительной техники и подходов к разработке программного обеспечения.

Список литературы:

1. Ковальски Р. Логика в решении проблем : Пер. с англ. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – (Пробл. искусств. интеллекта) – 280 с.
2. Страбыкин Д. А. Логический вывод в системах обработки знаний / Под ред. Д. В. Пузанкова; СПбГЭТУ. – СПб., 1998. – 164 с.

Э. В. Урывский

Ухтинский государственный технический университет
факультет информационных технологий
кафедра прикладной математики и информатики
Россия, г. Ухта
Esvilance@gmail.com

АНАЛИЗ АЛГОРИТМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТРЕХМЕРНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ СЦЕН ОКРУЖЕНИЯ

Предлагается новый алгоритм автоматического трехмерного моделирования окружающих объектов. Дается оценка и обоснование алгоритма. Практическое значение исследования состоит в показе взаимосвязи скорости и качества обработки потока изображения для реконструкции трехмерной сцены и характера ее оптимизации с учетом индивидуальных особенностей алгоритма.

Ключевые слова: компьютерное зрение, 3-D сцена, алгоритм реконструкции, машинное зрение.

В современных условиях необходимость в искусственном интеллекте и компьютерном зрении возникает в самых разных областях деятельности человека. На текущий момент применение теории ограничено решением вопросов идентификации и поиска объектов. Сравнительно недавно начало развиваться направление, связанное с автоматизацией процесса создания трехмерных моделей объектов и их восстановления по некоторым известным свойствам. Распознавание двумерных образов достаточно широко развито и эффективно используется в практической деятельности, в то же время, алгоритмы трехмерного «зрения» далеки от совершенства, имеют существенные недостатки и нуждаются в дальнейшем развитии

Задача реконструкции трехмерной модели сцены окружения состоит в определении пространственных координат точек поверхности объектов по изображениям на снимках. В качестве исходных данных используются изображения, содержащие необходимые для реконструкции объекты под разными ракурсами (или видеопоток). Из изображений возможно извлечь пространственные характеристики объектов. В результате обработки исходных данных формируется трехмерная модель сцены, которая корректируется при поступлении и обработке новых данных.

Наиболее распространенный алгоритм работы подобной системы, назовем его базовым, состоит из следующих этапов:

- нахождение калибровок камер;
- нахождение особенностей на изображениях (проекций точки в пространстве);
- сопоставление особенностей для получения пространственных координат точки;
- построение модели по набору точек и ее текстурирование.

Данный алгоритм работает быстро, но очень нестабильно, из-за большого количества погрешностей и ошибок, которые возникают ввиду нестандартизированных и необработанных исходных данных, отсутствия контроля за качеством реконструкции и т.п. Поэтому его использование ограничено системами, где необходимо хотя бы как-то обозначить трехмерную модель или заранее знать какие специфические данные будет необходимо реконструировать.

Был разработан алгоритм повышенной точности, по сравнению с приведенным выше. Он включает в себя следующие этапы:

1. Предобработка, нормализация и сортировка пакета изображений;
2. Калибровка и ректификация изображений;
3. Составление сегментированной панорамы;
4. Нахождение и сопоставление особенностей, слежение за камерой;
5. Построение вершин моделей;
6. Построение и текстурирование моделей;
7. Оптимизация результатов;
8. Выходные процессы.

Рассмотрим данный алгоритм более подробно.

1. Предобработка, нормализация и сортировка пакета.

Предобработка изображений производится с использованием соответствующих фильтров шумоподавления (медианный фильтр) и контрастоповышения (контрастоповышающими фильтрами) [1]. На этапе нормализации изображения приводятся к единому размеру, создаются их уменьшенные копии, что снижает число итераций при расчетах на некоторых этапах.

Сортировка основывается на оптимизации стереобазы (т.е. расстояния между точками съемки изображений). Результатом являются 3 изображения с данными о последовательности – дескриптор порядка. Анализ глубины сцены по одному изображению в принципе невозможен без уточнений и спецификации сцены. Реконструкция по двум изображениям называется стерео [2]. В предлагаемом алгоритме сопоставление особенностей ведется по 3 изображениям. Нахождение особенности на третьем изображении уточняет нахождение особенностей на первых двух изображениях. При этом качество сопоставления особенностей значительно возрастает, т.к. уменьшается количество ложных точек (выбросов).

Выполнение перечисленных процедур на данном этапе способствует уменьшению количества ошибок, связанных с качеством изображений, увеличивает точность построения модели, уменьшает время обработки изображений на следующих этапах благодаря стандартизации.

Оценки показывают, что нормализация одного изображения в среднем занимает: $t_{cp}=0.7$ с при количестве изображений $n=20$.

Пример обработки изображений на первом этапе приведен на рис.1.

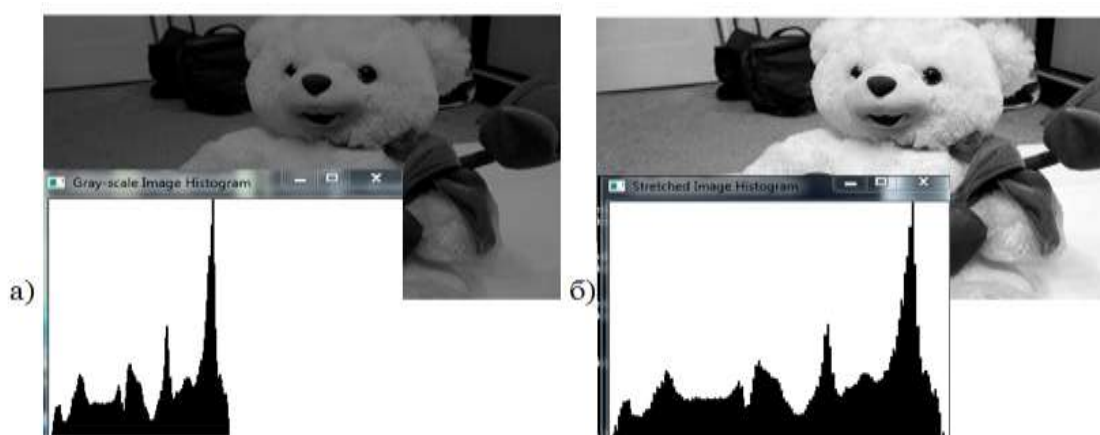


Рис. 1 - Нормализация в градациях серого. а) Исходное изображение, б) результат нормализации.

2. Калибровка и ректификация изображений.

Сцена из проекций трехмерных точек в плоскость изображения формируется на основе модели камеры-обскуры с использованием проективных преобразований:

$$sm' = A[R | t]M'$$

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

Здесь (X, Y, Z) – координаты точки в трехмерном пространстве, (u, v) – координаты проекции точки, A – матрица внутренних параметров камеры (внутренней калибровки), (c_x, c_y) – координаты принципиальной точки, (f_x, f_y) – длина фокуса в пикселях. Матрица внутренних параметров не зависит от вида сцены, рассчитывается один раз. Матрица внешней калибровки $[R | t]$ описывает перемещение и вращение камеры вокруг статической сцены или движения объекта вокруг статической камеры. Таким образом матрица $[R|t]$ преобразует координаты точки (X, Y, Z) в систему координат, зависящую от камеры [3]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + t \quad \begin{aligned} x' &= x / z \\ y' &= y / z \\ u &= f_x * x' + c_x \\ v &= f_y * y' + c_y \end{aligned} \quad (3)$$

Трехмерные точки проецируются на плоскость при данных внутренних и внешних параметрах, рассчитываются внешние параметры при данных внутренних для нескольких трехмерных точек и их проекций, рассчитываются внутренние и внешние калибровки камеры для нескольких видов с заданным калибровочным шаблоном, оценивается относительное положение и ориентация камеры.

Калибровка камеры происходит с использованием вспомогательного предмета (шахматная доска). Ввиду возможности работы системы с хранилищем данных, идет корректировка полученной фундаментальной матрицы с каждым новым циклом.

Поиск особенностей ведется детектором уголков Харриса [4]. Алгоритм Харриса вычисляет для каждого пикселя значение особой функции и отклика угла, что позволяет оценить степень схожести изображения окрестности точки на угол. Для этого вначале рассчитывается матрица:

$$M = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial I}{\partial x} \right)^2 & \left(\frac{\partial I}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial I}{\partial y} \right) \\ \left(\frac{\partial I}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial I}{\partial y} \right) & \left(\frac{\partial I}{\partial y} \right)^2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $I(x, y)$ – яркость изображения в точке (x, y) .

Если оба ее собственных значения велики, то небольшое смещение точки (x, y) в сторону уже вызывает значительные изменения в яркости, что характерно для углов. Неизменность значения функции вдоль края характерно для грани. Мера отклика угла записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} R &= \det M - k(\text{trace} M)^2; \\ \det M &= \lambda_1 \lambda_2; \\ \text{trace} M &= \lambda_1 + \lambda_2. \end{aligned} \quad (5)$$

Параметр k полагается равным 0.04 по предложению Харриса. Соответствующие локальным максимумам точки являются особенностями. Для снижения шумов используется сглаживание по Гауссу. Для уменьшения количества найденных углов накладывается ограничение на минимальное расстояние между найденными окрестностями.

На рис.2 приведен пример поиска особенностей с использованием детектора Харриса.

Найденная калибровка камеры позволяет работать с изображениями дальше, а ректификация изображений уменьшает время работы сопоставления особенностей (особенности на двух изображениях будут лежать на одной прямой, что следует из эпиполярных ограничений).



Рис. 2 – Особенности, найденные с помощью детектора Харриса (показаны красными квадратами). Количество найденных особенностей – 35. Общее время работы метода – 0.13 с. Расчет фундаментальной матрицы – 0.2 с.

3. Составление сегментированной панорамы.

Изображение панорамы составляется из исходных изображений на основе сопоставления особенностей методом «ближайшего соседа» [5], а далее сегментируется алгоритмом разбиения и слияния [6]. Благодаря сегментации изображений значительно увеличивается точность калибровки камер на следующих циклах обработки исходных изображений, что существенно улучшает устойчивость работы системы. Сегментация также упрощает процесс разбиения найденных точек в пространстве по соответствующим моделям.

4. Нахождение и сопоставление особенностей, слежение за камерой.

На данном этапе используется алгоритм SIFT (scale invariant feature transform), основанный на вариации лапласиана. К изображению применяется фильтр с двумя различными коэффициентами σ :

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (6)$$

где L - значение гауссиана в точке с координатами (x, y) , G - гауссово размытие, I - исходное изображение.

Далее находится функция $D(x, y)$ как разность этих двух функций:

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma). \quad (7)$$

Определяются локальные максимумы, которые и будут особыми точками [7].

Учитывая тот факт, что разрабатываемая система характеризуется большим потоком изображений, возникает необходимость усовершенствовать алгоритм сопоставления особенностей. Добавляя к стереопаре третье изображение, мы получим проверку найденных особенностей. При малых расхождениях необходимо проводить усреднение значений координат точки в трехмерном пространстве. При больших значениях расхождения признание данной точки выбросом и переход к обработке следующей найденной особенности является критерием изменения положения точки.

Необходимо также ввести критерий на схожесть окрестностей, т.е. при сильном смещении невозможно сразу проверить, является ли точка видимой или нет [8].

По двум известным проекциям m_1 и m_2 на два изображения с известной калибровкой можно определить положение точки M в пространстве. Поэтому если известна калибровка третьего изображения, то проекция точки M на третий вид может быть определена простой проекцией или с помощью эпиллярной линии найдена третья проекция и по ней уточнена точка M в пространстве на основе метода средней точки, что иллюстрируется на рис.3.

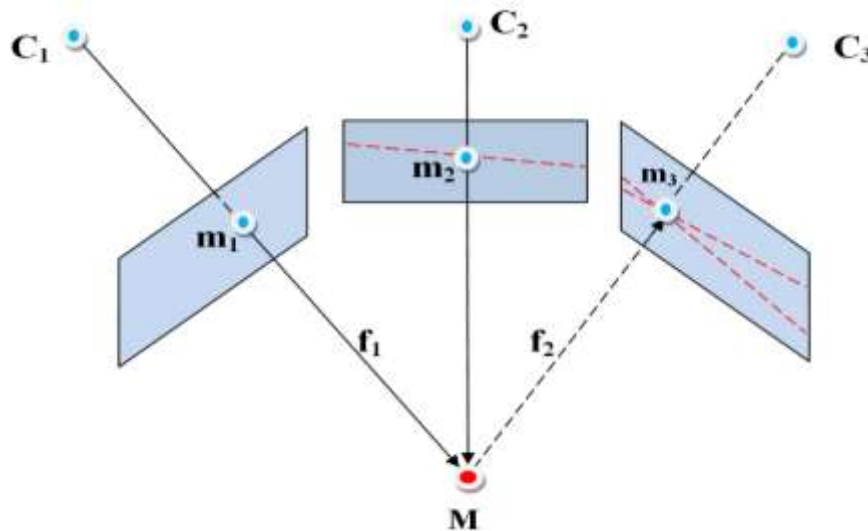


Рис. 3 - Определение положение проекции точки M на третьем виде по двум эпиллярным ограничениям.

Ограничения, накладываемые на положение соответствующих точек более двух изображений, также можно записать в линейной форме. Однако вычисление этих ограничений эквивалентно вычислению калибровки всех трех видов.

$$\begin{cases} m_1^T \varepsilon_{12} m_2 = 0 \\ m_1^T \varepsilon_{13} m_3 = 0, \\ m_2^T \varepsilon_{23} m_3 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

где ε_{ij} - существенная матрица изображений i и j . При этом должно выполняться условие:

$$e_{31}^T \varepsilon_{12} e_{32} = e_{12}^T \varepsilon_{13} e_{23} = e_{12}^T \varepsilon_{23} e_{13} = 0, \quad (9)$$

где e_{ij} - эпиллюса.

Таблица 1 - Сравнение реконструкции по 2-м и по 3-м изображениям

	Реконструкция по 2 изображениям	Реконструкция по 3 изображениям
Полигонов (шт.)	4317	11378
Точек (шт.)	2744	6539
Время работы этапа (с)	7	10
Количество особенностей (шт.)	97	142
Ошибочных особенностей (шт.)	13	9
Ошибочных особенностей (%)	13.4	6.3

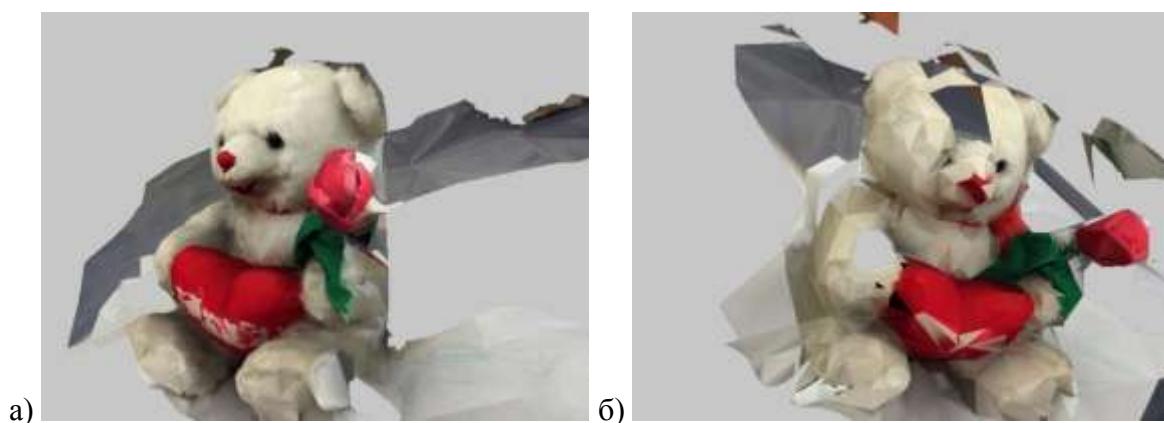


Рис. 4 – Сопоставление особенностей а) на трех изображениях б) на двух изображениях.

Как видно из рис. 4 и таблицы 1, этап сопоставления особенностей сильно влияет на качество восстановления модели.

Для уточнения данного алгоритма используется трекинг, т.е. слежение за камерой (алгоритм Лукаса-Канаде [9]). Запоминаются положения особенностей предыдущих циклов (хранятся в базе данных) и сравниваются с текущими. Таким образом аппроксимируется линия движения камеры и на основе сплайна экстраполируются значения положения особенностей на следующих кадрах. При согласовании результатов данные обоих методов уточняются, а результаты сохраняются в базу данных. Благодаря согласованию результатов работы различных методов качество сопоставления особенностей на изображениях значительно улучшается.



Рис. 5 – Реконструкция с трекингом особенностей на видеопотоке.

Итогом работы данного этапа является корректировка сегментированной панорамы и составление дескрипторов пар особенностей, которые хранят в себе координаты пар точек и среднее значение яркости точки в пространстве (рис.5).

5. Построение вершин моделей.

Из сегментированного изображения составляются дескрипторы моделей. На основе эпиполярной геометрии и дескрипторов пар проекций точек находятся положения точек в пространстве – дескрипторы точек моделей. Разделение точек на группы относительно их принадлежности к объектам происходит на основе дескрипторов моделей и сегментированного изображения. Благодаря данным дескрипторам моделей и построенному сегментированному изображению построение моделей занимает значительно меньше времени ввиду уменьшения количества итераций работы на этапе построения и текстурирования моделей.

6. Построение и текстурирование моделей.

На данном этапе рассчитываются текстурные координаты, идет отсев ложных точек и построение моделей по найденным точкам на основе алгоритма RANSAC [10]. Метод выбран ввиду распространенности и простоты реализации.

7. Оптимизация результатов.

На этапе оптимизации по построенным объектам уточняются дескрипторы моделей и вершин моделей, идет расчет оценки точности реконструированной сцены.

8. Выходные процессы.

На данном этапе работа системы предоставляется пользователю в виде интерактивной трехмерной сцены с настройками системы и возможностью управления самой сценой (управление камерой внутри сцены, наведение на какой-нибудь объект, уточнение результатов и прочее) и просмотром всех важных временных данных каждого этапа работы в виде лог-файлов, графиков и гистограмм. Реконструированную сцену возможно экспортировать в другие системы трехмерного моделирования (Autodesk Maya, Autodesk 3D Studio MAX).

В итоге за первый цикл обрабатывается 1 секунда видеопотока с тремя лучшими кадрами, инициализируются все переменные и необходимые дескрипторы. При всех последующих циклах работы системы идет оптимизация результатов и построение трехмерной сцены реконструированного окружения в реальном времени.

Множество данных хранится в базах данных, что уменьшает время работы системы, когда требуются перерасчеты. Многие расчеты возможно перенести с CPU (центральный процессор) на GPU (графический процессор), а вычисления разбить на потоки, которые могут выполняться одновременно. Все вышеперечисленное позволяет существенно сократить время обработки и сделает возможной работоспособность данной системы как законченного продукта.

Предлагаемый алгоритм отличается значительно более высокой точностью и стабильностью по сравнению с базовым, что достигнуто за счет согласования результатов работы разных методов и оптимизации результатов с использованием базы данных и поточности входных данных.

Данный алгоритм можно использовать практически для любой реконструкции сцен окружения, создания трехмерной сцены квартиры из любительской съемки, реконструкции окружения из фильмов, как художественных, так и документальных или любой другой съемки или фотографий.

Список литературы:

1. Урывский Э.В. Обработка и стандартизация данных для системы реконструкции трехмерных сцен окружения в реальном времени // Системный анализ, управление и обработка информации – Ростов-на-Дону, - 2010. - С. 292-299.
2. Конушин Антон. Геометрические свойства нескольких изображений // Компьютерная графика и мультимедиа - 2006. - №4(3).
<http://cgm.computergraphics.ru/content/view/141> (дата обращения 11.03.2012).
3. OpenCV v2.1 documentation. calib3d. Camera Calibration, Pose Estimation and Stereo. URL:
http://opencv.willowgarage.com/documentation/cpp/calib3d_camera_calibration_and_3d_reconstruction.html (дата обращения 11.03.2012).
4. Harris, C. G., Stephens, M. J. A combined corner and edge detector // Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference (Manchester, UK) - 1988. - P. 147-151.
5. Гужавина И.В. Технологии обработки изображения со спутника // Конструирование и оптимизация параллельных программ. - 2008. - № 16. С. 48-70.
6. Celenk, M. Hierarchical Color Clustering for Segmentation of Textured Images // Proc. of the 29th Southeastern Symposium on system Theory - 1997. - P. 483.
7. Lowe, David G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints // International Journal of Computer Vision - 2004. - №2, P. 91-110.
8. Бобков В.А., Роньшин Ю.И., Кудряшов А.П. Сопоставление линий по трем видам пространственной сцены // Информационные технологии и вычислительные системы - 2006. - №2. С. 71-78.
9. Lucas, B. D. and Kanade, T. (1981) An iterative image registration technique with an application to stereo vision // Proceedings of Imaging Understanding Workshop - P. 121-130.
10. Fischler, Martin A. and Bolles, Robert C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography // Comm. of the ACM 24 - 1981. P. 381–395.

А. Н. Фетяев, С. В. Фокин к.т.н.

Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова
факультет природообустройства и лесного хозяйства
кафедра механизации лесного хозяйства и лесомелиорации
Россия, г. Саратов
feht@mail.ru

ОБ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПОРУБОЧНЫХ ОСТАТКОВ

В работе представлено описание имитационной модели процесса измельчения отходов лесосечных работ машиной для измельчения порубочных остатков. Приводятся результаты изучения влияния конструктивно-технологических параметров устройства на эффективность его работы.

Ключевые слова: порубочные остатки, машина для измельчения порубочных остатков, щепа, отходы лесосечных работ.

В настоящее время утилизация древесных отходов, образующихся на них при проведении рубок ухода и санитарных рубках является большой проблемой, так они представляют низкокачественную древесину средней крупности, вершины, сучья деревьев (порубочные остатки).

Переработка же таких отходов на щепу позволит решить не только проблему утилизации отходов и снижению пожароопасности при проведении лесовосстановительных работ в весенне-летний период, но и получения дохода при продаже ее населению в качестве топлива.

Для реализации данной технологии расчистки нераскорчеванных вырубок от порубочных остатков предложена машина, оснащенная устройством для измельчения порубочных остатков, состоящим из: подъемного устройства, загрузочного патрона, механизма подачи, измельчителя дискового типа, щепопровод [5]. Процесс измельчения порубочных остатков предложенным устройством является сложным и многофакторным [1,2,3,4]. На рисунке 1 показана форма отображения результатов, получаемых в результате проведения компьютерного эксперимента.

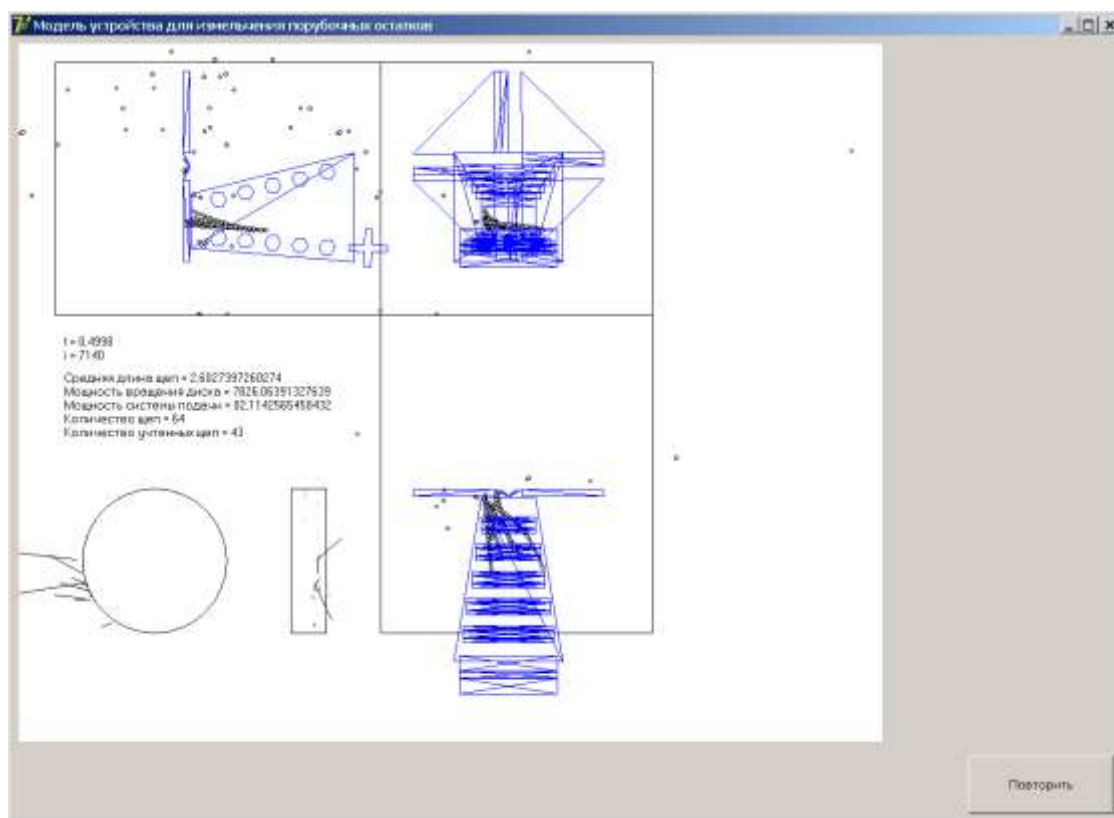


Рисунок 1 – Форма отображения результатов компьютерного эксперимента в программе для моделирования машины для измельчения порубочных остатков

Взаимосвязь входных параметров (факторов) и выходных характеристик имитационной модели (критериев) можно представить в виде выделить следующих групп переменных, относящихся к модели: первая группа: ω_d – частота вращения рубительного диска; ω_v – частота вращения подающих валцов (и одновременно подающего барабана); Δu_c – смещение центра диска в горизонтальном направлении по отношению к центру выходного окна загрузочного патрона; вторая группа: наиболее важный параметр $l_{по}$ – средняя длина порубочных остатков; третья группа: величины, характеризующие производительность, качество обработки и экономические затраты.

В соответствии с этим выбраны три выходных параметра: P – производительность устройства (максимальная в течении компьютерного эксперимента); d – средний размер щеп после измельчения загруженной порции порубочных остатков; N – мощность, потребляемая устройством (максимальная в течении компьютерного эксперимента).

Частота вращения рубительного диска ω_d является одним из наиболее важных параметров устройства для измельчения порубочных остатков. Частота вращения влияет как на производительность машины и качество измельчения, так и на потребляемую устройством мощность.

Для изучения влияния частоты вращения на показатели эффективности устройства провели серию компьютерных экспериментов, в которых варьировали ω_d на уровнях 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30 об/с.

Проведение эксперимента показало, что производительность устройства P имеет максимум при частоте вращения рубительного диска 15 ... 20 об/с. При малой частоте вращения диска (0 ... 10 об/с) рубительный диск сдерживает поток подаваемых ветвей, поэтому производительность мала. При большой частоте вращения диска (25 ... 30 об/с)

при каждом ударе ножа диск сообщает ветвям существенный импульс, который приводит к отскакиванию измельчаемой ветви в случайном направлении, и непрерывность потока порубочных остатков в направлении рубительного диска нарушается.

Размер щеп d минимален в диапазоне частот вращения 10 ... 15 об/с. При малой частоте ω_d (0 ... 5 об/с) за время открытия окна в диске ветвь успевает переместиться на значительное расстояние, поэтому отрубаются щепы значительных размеров. При большой частоте вращения диска (20 ... 30 об/с) нарушается нормальное измельчение из-за хаотичного движения порубочных остатков в загрузочном патроне, вызванного передачей существенных импульсов при контакте с рубительным диском.

С увеличением частоты вращения рубительного диска потребляемая устройством мощность возрастает. Особенно выражено возрастание в диапазоне 5 ... 20 об/с, в котором, с увеличением частоты увеличивается производительность и качество измельчения. При больших частотах вращения (25 ... 30 об/с) мощность возрастает незначительно, так как в данном диапазоне уменьшается производительность и качество измельчения. Совокупный анализ зависимостей $P(\omega_d)$, $d(\omega_d)$ и $N(\omega_d)$ позволяет в качестве оптимального диапазона частот рекомендовать 12 ... 15 об/с. В этом диапазоне наблюдается практически максимальная производительность (70 ... 80 кг/мин), минимальный размер щепы (около 2 см) и достаточно малая потребляемая мощность (5 ... 6 кВт).

Частота вращения рубительного диска практически не оказывает влияние на угол вылета щепы из устройства. Несмотря на постоянство углового распределения скоростей, с увеличением частоты вращения увеличивается, приблизительно пропорционально, средняя скорость движения щепы. Полученные распределения скоростей по углам вылета позволяют обосновать оптимальную конструкцию и форму щепопровода.

Производительность устройства во многом определяется скоростью подачи порубочных остатков на рубительный диск, что в первую очередь зависит от частоты вращения подающих вальцов ω_v . В рамках данной серии компьютерных экспериментов параметру ω_v придавали значения 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30 об/с. С увеличением частоты вращения вальцов производительность плавно растет до частоты 25 об/с, при этом размер щепы, начиная с 8 об/с практически не изменяется и составляет около 2,2 см, а потребляемая мощность, начиная с 8 об/с уменьшается. Таким образом, результаты моделирования позволяют утверждать, что в устройстве целесообразно использовать высокую частоту вращения подающих вальцов 20 ... 25 об/с.

Условия перерубания порубочных остатков могут существенно зависеть от угла между режущими кромками ножа рубительного диска и контрножа. Во многом этот угол определяется положением оси рубительного диска по отношению к окну выхода загрузочного патрона. С помощью модели изучено, как влияет сдвиг Δu_c оси рубительного диска в горизонтальном направлении по отношению к окну загрузочного патрона. Провели серию компьютерных экспериментов, в которой смещение Δu_c составляло от -12 до 9 см с шагом 3 см.

Обнаружено, что смещение рубительного диска практически не влияет на качество измельчения порубочных остатков (размер щепы практически не зависит от Δu_c), а также на потребляемую мощность (последняя также практически не зависит от Δu_c). В то же время производительность устройства выше (приблизительно на 30 %) при смещении диска из центрального положения по отношению к окну так, чтобы ветви прижимало при срубании к верхнему контрножу устройства (отрицательные значения Δu_c). Кроме того, при таком смещении оси диска поток щепы имеет выраженную направленность вверх, что упрощает конструкцию щепопровода и позволяет лучше отводить щепу от устройства. Таким образом, целесообразно в конструкции устройства предусмотреть смещение оси рубительного диска на 10 ... 20 см от центрального положения по отношению к окну загрузочного патрона.

На основании исследований можно сделать выводы о том, что:

1. Оптимальная частота вращения рубительного диска лежит в диапазоне 12 ... 15 об/с. В этом диапазоне наблюдается практически максимальная производительность (70 ... 80 кг/мин), минимальный размер щепы (около 2 см) и достаточно мала потребляемая мощность (5 ... 6 кВт).
2. Частота вращения подающих валцов должна быть не менее 8 об/с и достигать 20 ... 25 об/с.
3. Для увеличения производительности устройства на 30 % и ориентации вверх потока щепы, покидающей рубительный диск, ось диска должна быть смещена на 10 ... 20 см из центрального положения по отношению к окну загрузочного патрона (так, чтобы ветви прижимало при срубании к верхнему контрножу устройства).

Список литературы:

1. Бухтояров, Л. Д. Разработка конструкции и обоснование параметров инерционно-рубящего рабочего органа кустореза для удаления лесной поросли: дис. ... канд. техн. наук / Бухтояров Леонид Дмитриевич – Воронеж., 2004 – 190 с.
2. Дегтярев, Ю.И. Методы оптимизации: Учеб. пособие для вузов. – М.: Сов. радио, 1980. – 272 с.
3. Кузьмичев, Д.А. Автоматизация экспериментальных исследований [Текст] : учеб. пособие / Д. А. Кузьмичев, И. А. Радкевич – М. : Наука. Главн. ред. физико-мат. литер., 1983. – 392 с.
4. Советов, Б. Я., Яковлев, С. А. Моделирование систем: учебное пособие – М.: Высш. шк., 1998. – 319 с.
5. Устройство для измельчения порубочных остатков: Пат. 2354545 Рос. Федерация: А 01 G 23/06 / Цыплаков В. В., Шпортько О. Н., Фокин С.В.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – № 2007147160 ; заявл. 18.12.2007 ; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13.

В. А. Фрилинг

«Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия им. П.А. Столыпина»
инженерный факультет
кафедра «Материаловедение и технология машиностроения»
Россия, г. Ульяновск
friling.vladimir@mail.ru

ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКИ ПОВЕРХНОСТИ ОТВЕРСТИЯ НА ГЛУБИНУ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ

В работе рассмотрены причины вызывающие потерю работоспособности гладких цилиндрических подвижных сопряжений, испытывающих одностороннюю радиальную нагрузку. Проведены экспериментальные исследования, направленные на снижение интенсивности изнашивания сопряжений. Выявлены наиболее значимые факторы, влияющие на глубину упрочненного слоя.

Ключевые слова: износ, цилиндрические сопряжения, контактное взаимодействие, микротвердость, упрочнение, математическая модель, поверхность отклика.

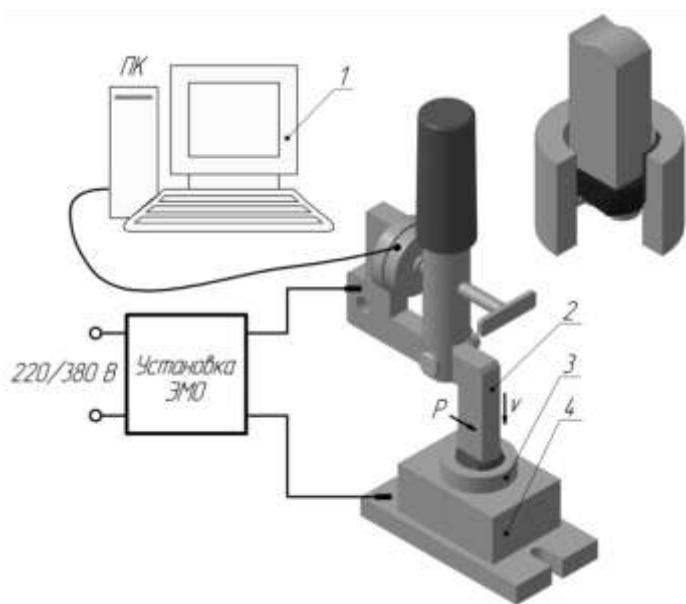
В конструкциях машин и механизмов различного назначения большое распространение имеют гладкие цилиндрические подвижные сопряжения. В данных сопряжениях отверстие может выполнять функцию опоры для вала, также и вал, установленный в отверстии, может служить для данной детали опорой [1, 2].

Отверстия деталей, выполняющие роль опоры для вала в процессе эксплуатации испытывают неравномерность распределения контактного давления и скорости скольжения, многократные смещения и проскальзывания сопрягаемых поверхностей друг относительно друга, циклический характер приложения нагрузки, что приводит к дополнительным пластическим деформациям и изменению геометрии профиля, контактному, усталостному разрушению неровностей последнего, а в некоторых случаях - к возникновению микрорезания.

Все это вызывает достаточно быструю потерю работоспособности данных пар трения.

С целью снижения интенсивности изнашивания опорного отверстия детали в условиях кафедры «Материаловедение и технология машиностроения» Ульяновской ГСХА разработана технология избирательной электромеханической закалки (рисунок 1).

Данная технология заключается в электромеханической закалке трибонагруженного участка фасонным бронзовым инструментом, перемещающимся вдоль оси отверстия.



1 - персональный компьютер; 2 - инструмент; 3 – втулка; 4 – оправка.

Рисунок 1. Схема процесса избирательного электромеханического упрочнения поверхности отверстия.

Для подтверждения эффективности предлагаемой технологии применительно к закалке трибонагруженного участка поверхности отверстия, были проведены экспериментальные исследования, направленные на установление эффективности применения разработанной технологии избирательной электромеханической закалки трибонагруженного участка поверхности отверстия.

Параметром, определяющим эффективность, предлагаемой технологии была принята микротвердость и глубина упрочнения поверхности отверстия.

В качестве образцов для исследования из стали 45, и чугуна СЧ 20 были изготовлены втулки с диаметром отверстия $d = 25$ мм, наружным диаметром $D = 45$ и высотой $h = 50$ мм (рисунок 2).

Отверстия образцов обрабатывались развертыванием до шероховатости $Ra 2,5$, так как такая чистота соответствует поверхностям большинства рассматриваемых сопряжений.

При исследовании поверхностного слоя, на эмпирически подобранных режимах, была выявлена белая нетравящаяся зона повышенной твердости 59...63 HRC (рисунок 3, 4).



Рисунок 2. Экспериментальные образцы: а – чертеж втулок для исследований; б – распределение упрочненной зоны после обработки.

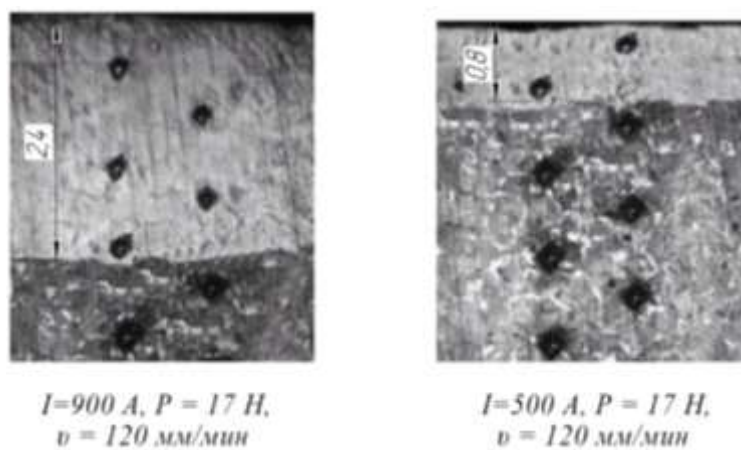


Рисунок 3. Микроструктура поверхностного слоя после избирательной электромеханической закалки стали 45.

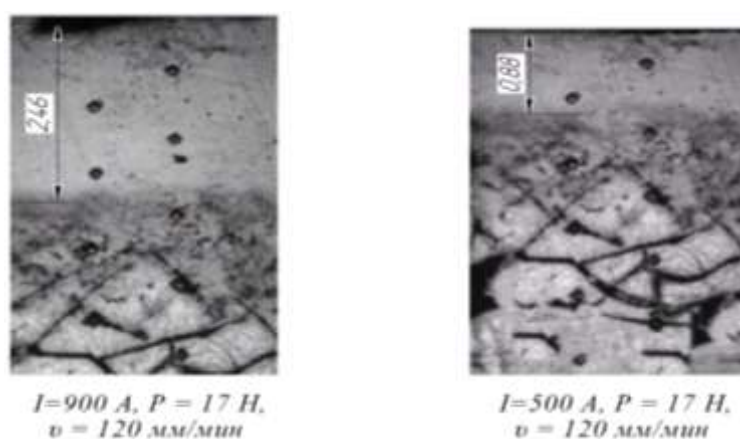


Рисунок 4. Микроструктура поверхностного слоя после избирательной электромеханической закалки чугуна СЧ20.

Анализ литературы в области электромеханической обработки показывает, что наибольшее влияние на глубину упрочнения оказывает сила электрического тока, усилие прижатия инструмента, а также скорость обработки. Чтобы объективно установить степень влияния каждого из вышеперечисленных факторов, получить максимум информации при минимуме затрат, применяется метод математического планирования эксперимента, который позволяет при минимальном количестве опытов получить математическую модель процесса.

Такая модель может быть с успехом использована для нахождения необходимых режимов технологического процесса и управления им.

Для оптимизации режимов упрочнения с целью последующего их рационального выбора для конкретного случая был проведен полный факторный эксперимент 2^3 на трех уровнях [3]. Соответствие технологических факторов и уровней приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения исследуемых факторов

Уровень	Факторы			Глубина Упрочнения, h, мм
	Сила тока, А	Усилие прижатия инструмента, Р, Н	Скорость обработки, v мм/мин	
Нижний (-1)	500	10	120	0,8
Средний (0)	700	17	140	1,6
Верхний (+1)	900	24	160	2,4
Интервал варьирования	200	7	20	0,8
Кодовое обозначение	X_1	X_2	X_3	Y

После обработки данных в программе Statistica 6.0 была получена математическая модель глубины упрочненного слоя, позволяющая получить упрочненный слой заданной толщины:

$$h = 0,681 + 0,00281 \cdot I + 0,233 \cdot P - 0,525 \cdot v + 0,000000907 \cdot I^2 - 0,00577 \cdot P^2 + 0,000178 \cdot v^2 \quad (1)$$

Для выявления влияния каждого из факторов на глубину упрочнения, для математической модели были получены уравнения регрессии в натуральных и кодированных значениях факторов при фиксации двух факторов на верхнем, среднем и нижнем уровнях.

Уравнение регрессии в кодированных значениях факторов, характеризующее влияние силы тока и усилия прижатия на глубину упрочненного слоя имеет вид:

$$Y = 1,6181 + 0,7703 \cdot X_1 + 0,5377 \cdot X_2 - 0,0076 \cdot X_1^2 + 3,0096 \cdot 10^{-5} \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,0052 \cdot X_2^2 \quad (2)$$

Анализ уравнения показывает, что наибольшее влияние среди линейных членов уравнения на параметр оптимизации оказывает сила тока, причем его увеличение приводит к увеличению критерия оптимизации. Меньшее воздействие оказывает усилие прижатия инструмента. Среди нелинейных членов уравнения наибольшее влияние также оказывает сила тока, возведенная в квадрат, при увеличении которой

критерий оптимизации увеличивается. Меньшее воздействие оказывает усилие прижатия, возведенное в квадрат, при увеличении которого критерий оптимизации уменьшается.

Уравнение регрессии, характеризующее влияние силы тока и скорости обработки на глубину упрочненного слоя имеет вид:

$$Y = 1,3335 + 0,7717 \cdot X_1 - 0,1222 \cdot X_3 - 0,0074 \cdot X_1^2 - 7,7528 \cdot 10^{-6} \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0012 \cdot X_3^2 \quad (3)$$

Анализ уравнения показывает, что наибольшее влияние на параметр оптимизации из линейных членов оказывает сила тока, которая увеличивает параметр оптимизации. Меньшее влияние оказывает скорость обработки, с увеличением которой параметр оптимизации уменьшается. Среди нелинейных членов наибольшее влияние оказывает сила тока, возведенная в квадрат, причем с её увеличением параметр оптимизации уменьшается. Меньшее влияние оказывает скорость обработки, возведенная в квадрат, повышающая параметр оптимизации.

Уравнение регрессии, характеризующее влияние усилия прижатия инструмента и скорости обработки на глубину упрочненного слоя имеет вид:

$$Y = 1,5407 + 0,5393 \cdot X_2 - 0,1221 \cdot X_3 - 0,0052 \cdot X_2^2 - 1,2944 \cdot 10^{-5} \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,0012 \cdot X_3^2 \quad (4)$$

Анализируя коэффициенты уравнения, видим, что наибольшее воздействие на параметр оптимизации среди линейных членов оказывает усилие прижатия инструмента, которое увеличивает параметр оптимизации. Меньшее влияние среди линейных членов оказывает скорость обработки, при увеличении которой параметр оптимизации уменьшается. Среди нелинейных членов уравнения наибольшее влияние оказывает так же усилие прижатия, возведенное в квадрат, при увеличении которого параметр оптимизации уменьшается. Меньшее воздействие оказывает скорость обработки, возведенная в квадрат, при увеличении которой параметр оптимизации увеличивается.

На основании полученных зависимостей (2, 3, 4) можно сделать определенные выводы о влиянии каждого из факторов на параметр оптимизации.

На глубину упрочненного слоя оказывает сила тока, так как при ее увеличении возрастает температура в зоне контакта инструмента с обрабатываемым отверстием, и усилие прижатия инструмента, что влечет за собой лучшую прокаливаемость обрабатываемой поверхности и увеличение глубины упрочненного слоя.

Выше изложенное также подтверждается графическим изображением (рисунок 5).

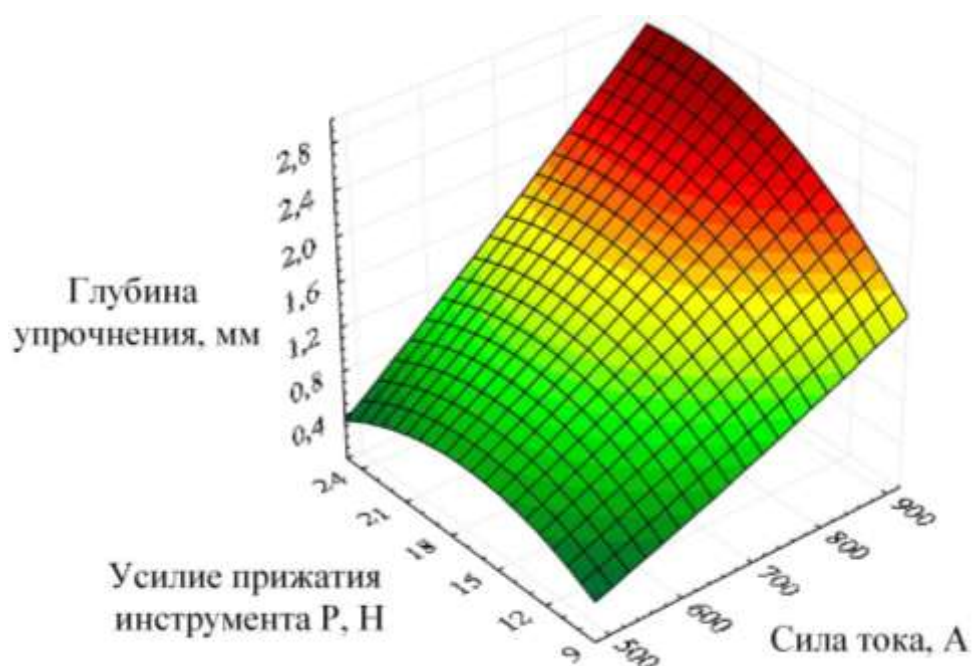


Рисунок 5. Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия силы тока и усилия прижатия инструмента в натуральных значениях факторов при избирательной электромеханической обработке на основании которого можно рационально подбирать режимы избирательного электромеханического упрочнения в зависимости от условий эксплуатации и требований, предъявляемых к обрабатываемому отверстию.

Список литературы:

1. Морозов А.В., Фрилинг В.А. Характер эксплуатационного износа гладких цилиндрических подвижных сопряжений применяемых в сельскохозяйственной технике// «Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения»: сб. материалов III Междунар. научн. – прак. конф. Ульяновск, 2011. с. 271 – 275.
2. Морозов А.В., Фрилинг В.А., Салов В.Б. Анализ причин и характера износа отверстия коромысла клапана ГРМ двигателя Камаз 740.11-240//Техника и технологии: пути инновационного развития: сб. материалов Междунар. Научн.–прак. Конф. Курск, 2011. с. 93–96.
3. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов. Методические указания. М.: Изд. Стандартов, 1978. – 112 с.

Г. Ю. Шакирова

Камская государственная инженерно-экономическая академия
автомеханический факультет
кафедра электротехники и электроники
Россия, г. Набережные Челны
guzya81@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО ПОРОШКА ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Повышение эффективности процесса получения качественных и количественных ферромагнитных порошков, необходимых для изготовления электрических машин с широким диапазоном выходных характеристик, достигается лишь применением автоматизированных систем управления. Для достижения данной цели в данной работе, разработана система автоматизированного управления технологической плазменной электротермической установки, обеспечивающая оптимизацию и стабилизацию ее параметров

Ключевые слова: ферромагнитный порошок, плазменная электротермическая установка, дисперсность, реле завершения процесса.

Создание новых материалов с заданными характеристиками — важнейшая научно-техническая проблема. Прогресс в области энергетики, электроники, микропроцессорной техники, ракетостроения и других важнейших отраслей базируется на новых материалах, способных обеспечить высокие служебные характеристики и надежную работу оборудования.

Высокие темпы развития производства ферромагнитных порошков достигнуты благодаря; разработке более дешевых и простых способов их получения, прежде всего железа, меди и сплавов на их основе — основного сырья для порошковой технологии, а также порошков алюминия. Основными промышленными методами производства порошков на основе железа являются восстановление и распыление.

В последнее время все больше внимания привлекают к себе электрические разряды в парогазовой среде с нетрадиционными электродами, в которых одним из электродов являются различные электролиты. Применение этого метода связано с простыми способами управления режимами горения парогазового разряда путем изменения входных электрических параметров, а также концентрации и состава электролита, что позволяет легко осуществить автоматизацию производства.

Качество ферромагнитного порошка имеет сложную зависимость от технологических параметров процесса, что вызывает необходимость управления процессом посредством поддержания этих параметров в требуемых пределах.

Поэтому исследование зависимостей технологических параметров процесса получения ферромагнитного порошка для создания системы автоматического управления плазменной электротермической установкой с жидким катодом (техническая вода с ненормируемыми характеристиками), способной получать ферромагнитный порошок с заданными свойствами при атмосферном давлении является актуальной задачей.

Управление электрическим разрядом на технологической плазменной электротермической установке (ТПЭТУ) осуществляется за счет изменения параметров тока, напряжения, межэлектродного расстояния, электропроводности, температуры электролита, процентного состава углерода и диаметра стального электрода.

В состав ТПЭТУ (рис.1) входит источник напряжения, в котором имеются силовые цепи, преобразующие ток и напряжение сети электропитания в воздействующие на модифицируемую поверхность импульсы, и система управления этими силовыми цепями.

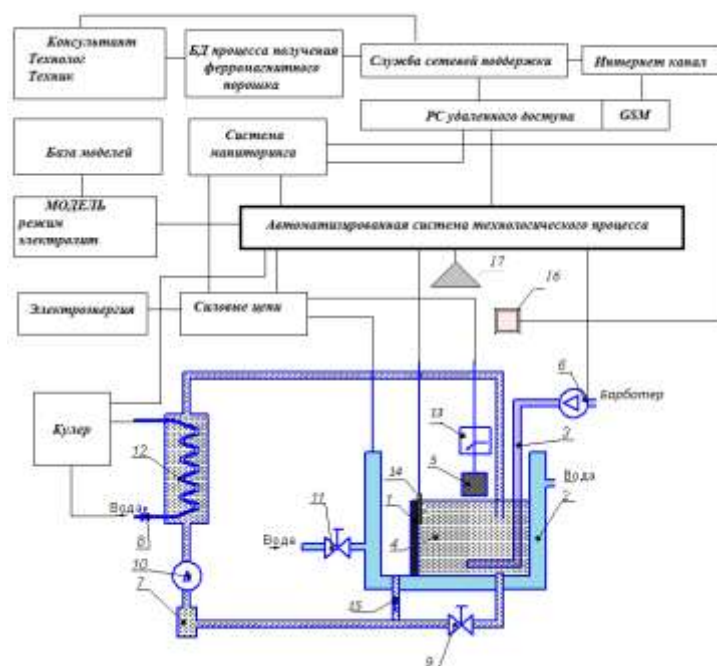


Рис.1. Обобщенная блок-схема установки ТПЭТУ

1-электролитная ванна, 2 – рубашка водяного охлаждения, 3- барботер, 4 – электролит, 5 – деталь датчик расхода воздуха в барботере, 6 – воздушный компрессор, 7 – фильтр, 8, 9, 11 - запорная арматура, 10 - насос; 12 - бак с теплообменником; 13 - координатное устройство; 14 –термометр, 15 - обратный клапан, 16 – камера, 17- вентиляционная система.

Контроль функционирования оборудования установки ТПЭТУ осуществляется с помощью датчиков измерения температуры электролита (2), расхода воздуха в барботере (5) и вытяжной вентиляции (6), а также давления воды (7) в системе охлаждения электролитной ванны, системой автоматического поддержания межэлектродного расстояния (САМЭР) между электролитом (8). В зависимости от показаний этих датчиков система автоматизации технологического процесса разрешает проведение процесса исследований разряда, а также корректирует его ход.

В систему управления ТПЭТУ интегрирована база данных, в состав каждой записи этой базы входит описание технологического режима получения порошка и применяемого электролита.

Для контроля за процессом получения порошка и проведения научных исследований ТПЭТУ оборудована системой мониторинга технологического процесса, который позволяет в режиме реального времени измерять и сохранять электрические параметры, температуру электролита и захватывать видеоизображение разряда.

Аппаратный интерфейс удаленного доступа и GSM-модем позволяют организовать обмен информацией с ТПЭТУ по сети Интернет и каналам сотовой связи.

Наличие каналов связи обеспечивает доступ к базе данных научно-консультационного центра с возможностью проведение в режиме реального времени удаленных консультаций со специалистами этого центра, и возможна также пересылка по GSM-каналу связи в виде SMS-сообщений протокола работы установки эксплуатирующему ее персоналу.

В системы управления и автоматизации ТПЭТУ входят устройства, фиксирующие и предотвращающие явления, негативно влияющие на технологический процесс получения ферромагнитного порошка, такие как предельно допустимые температура и степень выработки электролита. Предельно допустимая температура электролита в ванне в системе автоматизации ТПЭТУ контролируется датчиком температуры.

При превышении предельно допустимого значения температуры электролита с датчика температуры поступает сигнал, в результате чего процесс получения ферромагнитного порошка прекращается [2] (РЗП) (рис.2).

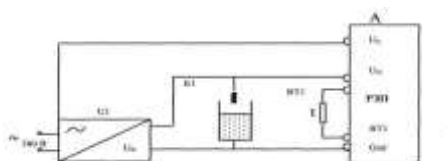


Рис.2. Схема реле завершения процесса.

РЗП возобновляет процесс получения порошка при достижении допустимого значения температуры электролита. Температура электролита измеряется медным термометром сопротивления RT1 марки TCM-50. Термометр сопротивления включен в мостовую измерительную цепь R1-R3 (рис.3), ее нагрузкой служит дифференциальный входной усилитель ВУП, на выходе которого для усреднения измеряемой величины установлен фильтр нижних частот УНЧ. Учитывая сравнительно невысокую скорость изменения температуры в электролитной ванне, для аналого-цифрового преобразования может быть применен преобразователь напряжение — частота УНЧ (КР1108ПП1)[1]. Затем сигнал поступает в гальванически развязанный мультиплексный канал измерения частоты импульсов, который состоит из гальванической развязки (ГР), мультиплексора MS. ЭВМ выбирает канал измерения частоты сигналами A0, A1. Импульсы измеряемой частоты следования поступают на вход C/T0 ЭВМ, где подаются на счетный вход встроенного таймера-счетчика C/T0, работающего в режиме счета внешних импульсов. Длительность интервала измерения частоты формируется встроенным в ЭВМ дополнительным таймером - счетчиком и программным счетчиком-делителем. Этот интервал измерения составляет 100 мс.

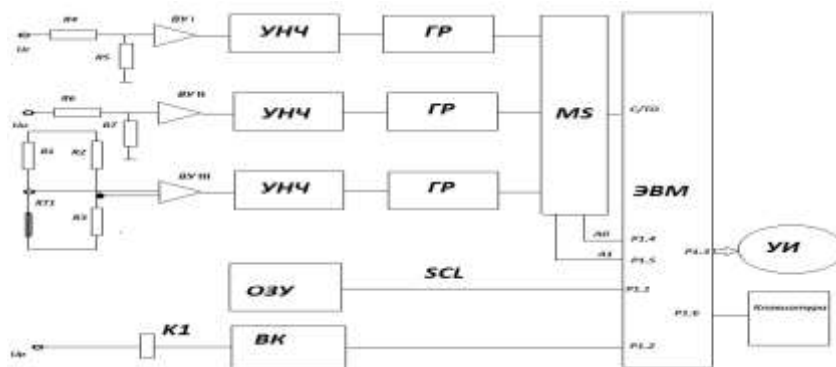


Рис.3. Функциональная схема РЗП.

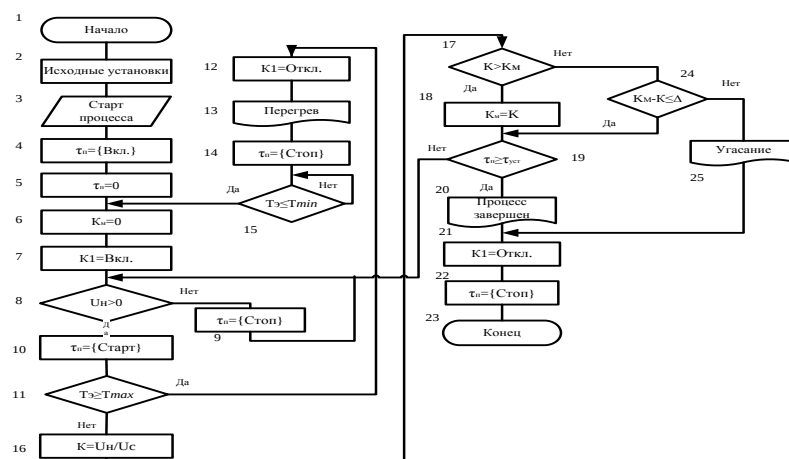


Рис.4. Алгоритм управления РЗП.

Приведенный на (рис.4) алгоритм управления РЗП объясняет, как исходные данные плазменной электротермической установки предельно допустимой температуры электролита t_{max}^o , допустимой рабочей температуры электролита t_{min}^o , допустимого относительного уменьшения Δ амплитудного напряжения на гальванической нагрузке и продолжительности процесса $T_{уст}$ устанавливаются в блоке 2. После прихода команды оператора «старт процесса» (блок 3) запускается внутренний таймер1 ОЭВМ (блок 4) и тем самым разрешается формирование временных интервалов в РЗП, сбрасывается текущее время процесса T_n (блок 5) и переменная K_m (блок 6) максимального значения отношения U_n/U_c и включается (блок 7) реле К1 рис.3, разрешающее проведение процесса. Длительность процесса учитывается только при наличии напряжения на гальванической нагрузке (блоки 8-10). Если РЗП фиксирует превышение предельно допустимой температуры электролита в ванне, то выполняется прерывание процесса для охлаждения электролита до допустимой температуры. В течение этой паузы текущее время процесса останавливается (блок 11-15). Контроль угасания разряда производится в соответствии с операциями, указанными в блоках 17, 18, 24, 25. При достижении T_n уставки $T_{уст}$ продолжительности процесса получения порошка завершается (блоки 19-23).

Заключение.

Предлагаемая методика автоматизации управлением технологическим процесса получения ферромагнитного порошка позволяет контролировать параметры процесса и получать порошок с заданными свойствами.

Список литературы:

1. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия Телеком, 2009. – 100с.
2. Дунькин О.Н., Людин В.Б., Суминов И.В.Ю, Шичков Л.П., Эпельфельд А.В. Система цифрового управления и мониторинга установок плазменно-электролитической обработки. //Приборы, 2003.№4. – с.30-44; №5. с.27-41; №6. С.-35-45.

АННОТАЦИИ ABSTRACTS

А.С. Березин, Т.Т. Зинкичева,
Р.Р. Назмутдинов В.К. Половняк,
А.М. Сайфутдинов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА МОЛЕКУЛЯРНОГО ЙОДА ЧЕРЕЗ МЕЖФАЗНУЮ ГРАНИЦУ ВОДА/АЛКАН

В работе обсуждаются результаты моделирования переноса молекулярного йода через границу раздела фаз между гептаном и водой. Поверхность потенциальной энергии, описывающей перенос иона, построена на основе феноменологических представлений с использованием результатов квантово-химических расчётов. Константа скорости преодоления барьера рассчитывалась с использованием теории Крамерса и методом броуновской молекулярной динамики. Полученные данные позволяют интерпретировать результаты экспериментов по исследованию кинетики окисления тиосульфата йодом на межфазной границе гептан/вода.

Ключевые слова: йод, тиосульфат, межфазная граница жидкость-жидкость, перенос иона, теория Крамерса, броуновская молекулярная динамика.

Б.Н. Иванов, Р.Н. Костромин,
В.С. Минкин, В.В. Чистяков
ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИФИКАТОРА НА
ВУЛКАНИЗАЦИЮ ПОЛИСУЛЬФИДНЫХ
ОЛИГОМЕРОВ

Выявлено влияние пластификатора на второй момент линии ЯМР при низких температурах для вулканизатов ПСО. Определена прямая корреляция между плотностью эффективных цепей полимерной сетки и значениями времен спин-спиновой релаксации вулканизатов. Предложен способ контроля скорости процесса вулканизации по изменению времени спин-спиновой релаксации, который легко осуществляется в лабораторных условиях и может рассматриваться как экспресс-метод изучения кинетики отверждения олигомеров.

A.S. Beresin, T.T. Zinkicheva,
R.R. Nazmutdinov, V.K. Polovnyak,
A.M. Saifutdinov

MODELLING OF MOLECULAR IODINE TRANSFER ACROSS aLCANE/WATER INTERFACE

In this work we report some results on the modeling of an iodine molecule transfer across a heptane/water interface. The potential energy surface describing ion transfer is built in a phenomenological way using results of quantum chemical calculations. Rate constant of the barrier overcoming is calculated in terms of the Kramers theory, as well as by using Brownian molecular dynamics. The results of model calculations are used to interpret experimental data on the kinetics of oxidation of a tiosulphate ion by iodine at a heptane/aqueous electrolyte solution interface.

Keywords: iodine, tiosulphate, liquid-liquid interface, ion transfer, Kramers theory, Brownian molecular dynamics.

B.N. Ivanov, R.N. Kostromin, V.S. Minkin,
V.V. Chistyakov
PLASTIFICATOR'S IMPACT ON
VULCANIZATION OF POLYSULFIDE
OLIGOMERS

Impact of plastificator on the second momentum of NMR line for vulcanizate in low-temperature conditions is estimated. Straight correlation between polymer net's effective chains density and vulcnizate's spin-spin relaxation time was defined. A control method is found for the vulcanization speed, using spin-spin relaxation time changes, which can be easily used in laboratory and is considered to be an express-method for studying the olygomer's hardening kinetics.

Keywords: polysulfide olygomers, plastificator,

Ключевые слова: полисульфидные олигомеры, пластификатор, вулканизация, ядерный магнитный резонанс.

И.С. Балафендиева, Д.В. Бережной,
Д.А. Егоров
РАСЧЕТ ОСАДОК В МНОГОСЛОЙНОМ
ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОМ ГРУНТЕ ПРИ
ПРОКЛАДКЕ ТОННЕЛЕЙ
МЕТРОПОЛИТЕНА

В работе представлена методика решения задач деформирования элементов конструкций, взаимодействующих между собой и с окружающим их физически нелинейным грунтом. Описан специальный контактный конечный элемент. В качестве примера приведен расчет осадки грунта над прокладываемыми тоннелями метрополитена.

Ключевые слова: пластическое деформирование грунта, контактный конечный элемент, метод конечных элементов.

А.В. Доль
ОДНОМЕРНАЯ СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ
ДИНАМИКИ КРОВОТОКА В КРУПНЫХ
КРОВЕНОСНЫХ СОСУДАХ

В работе рассмотрена математическая модель гемодинамики крупных кровеносных сосудов. Предложена одномерная замкнутая система уравнений, описывающая движение крови по сосудам. Приведены основные этапы осреднения трехмерной основной замкнутой системы динамики кровотока.

Ключевые слова: кровоток, кровеносный сосуд, система уравнений.

В.В. Трегулов
ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР
CdS/Si(p)

Приведены результаты исследования влияния факторов технологического процесса изготовления гетероструктур CdS/Si(p) на величину плотности поверхностных состояний и электрофизические характеристики. Установлено оптимальное

vulcanization, nuclear magnetic resonance.

I.S. Balafendieva, D.V. Berezhnoi,
D.A. Egorov
THE ESTIMATE OF SETTLEMENTS IN THE
MULTILAYER MATERIALLY
NONLINEAR GROUND BY THE
UNDERGROUND TUNNELS LAYING

In the research the problem solving methodology for deformation of constructional elements interacting between themselves and with surrounding them physically nonlinearly deformable ground is presented. Special contact finite element is described. As an illustration, the estimate of soil settlement above layed underground tunnels is given.

Key words: plastic deformation of ground, contact finite element, finite element method.

A.V. Dol
1-DIMENTIONAL SYSTEM OF BLOOD
FLOW DYNAMICS IN LARGE-SCALE
BLOOD VESSELS

This paper presents haemodynamics of blood vessels mathematical model. There is closed system of equations describes blood flow. Paper contains main steps of blood flow 3-dimentional main closed system of equations averaging.

Keywords: blood flow, blood vessel, system of equations.

V.V. Tregulov
OPTIMIZATION OF THE
MANUFACTURING TECHNOLOGY OF
HETEROSTRUCTURES CdS/Si(p)

The research results of influence factors of the technological process of manufacturing heterostructure CdS/Si (p) on the value of the density of surface states and electrophysical characteristics is presented. The optimum ratio of components in the hydrochemical method of

соотношение компонентов при гидрохимическом методе формирования гетероструктур.

Ключевые слова: гетероструктура, гидрохимическое осаждение, поверхностные состояния, фотоэлектрический преобразователь.

**А.И. Хазбулатов
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРЯМОТОЧНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО
СЕПАРАТОРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗА ОТ
МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ**

Представлено устройство для очистки газа (воздуха) – прямоточно-центробежный сепаратор. Выявлены оптимальные параметры работы и установлена зависимость степени очистки данного устройства от размеров частиц механических примесей.

Ключевые слова: вихревая камера, сепарационная щель, тангенциальный лопаточный завихритель, степень очистки.

**А.В. Басов, В.Н. Басов, О.И. Бахирева
ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЬ
ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
МЕТАЛЛОВ И ИХ СОЕДИНЕНИЙ**

Рассмотрена возможность прогнозирования электрохимических свойств металлов и их соединений на примере электропревращения вспомогательного реактива в гальваностатической кулонометрии. При построении графической зависимости «Разность между химической энергией гидратации – граничный потенциал области преобладания» выявлено 3 семейства кривых, где кривая 1 включает элементы с незаконченным 18-электронным внешним слоем, кривая 2 – законченным 2, 8 и 18-электронными внешними слоями, кривая 3 – элементы III группы. При сравнении с пирамидальной формой таблицы Д.И. Менделеева указанных кривых выявлено в основном их соответствие соединительным линиям для выражения реальных смещений элементов, соответствующих различию их

deposition heterostructures is found.

Key words: heterostructure, hydrochemical deposition, surface states, photoelectric converter.

**A.I. Hazbulatov
DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE
DIRECT FLOWING-CENTRIFUGAL
SEPARATOR FOR GAS CLEARING FROM
MECHANICAL IMPURITIES**

The device for gas (air) clearing – direct flowing-centrifugal separator is presented. Optimal parameters of work are revealed and dependence of extent of cleaning of this device on particle size of mechanical impurities is established.

Keywords: vortical chamber, separating crack, tangential blade vortex generator, zone of return currents, clearing degree.

**A.V. Basov, V.N. Basov, O.I. Bahireva
PERIODIC REGULARITY OF CHEMICAL
ELEMENTS AND ELECTROCHEMICAL
PROPERTIES OF METALS AND THEIR
COMPOUNDS**

Possibility of forecasting of electrochemical properties of metals and their compounds on an example of electrotransformation of an auxiliary reactant in galvanostatic coulometry is considered. At construction of graphic dependence «the Difference between chemical energy of hydration – boundary potential of area of prevalence» 3 families of curves where the curve 1 includes elements with an incomplete 18-electronic external layer, a curve 2 – finished 2, 8 and 18-electronic external layers, a curve 3 – elements of III group are revealed. At comparison with the pyramidal form of table Mendeleev of the specified curves it is revealed in the basic their conformity to connecting lines for expression of real displacement of the elements corresponding to distinction of their electronic structures.

электронных строений.

Ключевые слова: электрохимические свойства металлов, электропревращение, кулонометрия, электрогенерация.

А.В. Басов, В.Н. Басов, О.И. Бахирева
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
АМАЛЬГАМ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ
ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ Д.И.
МЕНДЕЛЕЕВА

Показана возможность прогнозирования электрохимических свойств амальгам металлов исходя из их положения в периодической системе. Требованиям проведения электролиза с эффективностью по току 100 % отвечают р-элементы подгрупп галлия, германия, мышьяка, цинка.

Ключевые слова: электрохимические свойства металлов, амальгамы металлов, кулонометрия.

В.Н. Басов, О.И. Бахирева,
В.В. Вольхин, Л.С. Пан
СИНТЕЗ СОРБЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ ВЕРМИКУЛИТА И
МИКРООРГАНИЗМОВ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ
ИОНОВ И РАДИОНУКЛИДОВ СТРОНЦИЯ
Рассмотрена возможность создания сорбционных материалов на основе природного минерала вермикулита и культуры микроорганизмов, способной поглощать ионы стронция из водных растворов. Исследованы условия применения полученных биосорбентов для очистки растворов от ионов стронция в повторяющихся циклах сорбция – десорбция – регенерация.

Ключевые слова: сорбционные материалы, биосорбенты, сорбция, десорбция, регенерация.

Л.Х. Абдулхаликова
РЕШЕНИЕ ОДНОЙ ЗАДАЧИ
ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ
МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
В статье обобщены точные методы

Keywords: electrochemical properties of metals, electrotransformation, kulonometry, electrogeneration.

A.V. Basov, V.N. Basov, O.I. Bahireva
FORECASTING OF ELECTROCHEMICAL
PROPERTIES OF AMALGAMS OF
METALS ON THE BASIS OF PERIODIC
SYSTEM D.I. MENDELEYEV

Possibility of forecasting of electrochemical properties of amalgams of metals proceeding from their position in periodic system is shown. Carrying out requirements of electrolysis with efficiency on a current of 100 % are answered with p-elements of subgroups of gallium, germanium, arsenic, zinc.

Keywords: Electrochemical properties of metals, amalgams of metals, kulonometry.

V.N. Basov, O.I. Bakhireva, V.V. Volhin,
L.S. Pan
SYNTHESIS OF SORPTION MATERIALS
BASED ON VERMICULITE AND
MICROBIAL EXTRACTION FOR IONS
AND STRONTIUM RADIONUCLIDES

The possibility of the creation of sorption materials based on natural mineral vermiculite and culture of microorganisms capable of absorbing strontium ions from aqueous solutions. The conditions for an application of biosorbents for the treatment of solutions of strontium ions in repeated cycles of sorption - desorption - regeneration.

Keywords: sorption materials biosorbent, sorption, desorption, regeneration.

L.H. Abdulhalikova
THE SOLUTION OF THE
THERMOELASTICITY PROBLEM FOR
MULTILAYERED STRUCTURES

The paper summarizes the exact methods for

решения задач термоупругости для многослойных конструкций. Для решения нестационарной задачи теплопроводности для двухслойного полого цилиндра с граничными условиями 4-го рода на поверхности контакта слоев и неоднородными несимметричными граничными условиями 3-го рода на внешних границах использован метод конечных интегральных преобразований.

Ключевые слова: термонапряжения, перемещения, многослойная конструкция.

А.П. Абызов, О.И. Тарабарин
ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С
УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ
В ВИДЕ ТРЕЩИН

Приводятся результаты комплексного исследования влияния дефектов конструктивных элементов деталей конструкций машин и трубопроводов в виде трещин на несущую способность. Получены аналитические формулы, позволяющие рассчитать коэффициенты трещиностойкости в зависимости от геометрических параметров трещины, а так же коэффициенты, определяемые протяженностью и направлением дефекта. Численные значения коэффициентов позволяют оценить влияние дефектов на прочностные характеристики конструктивных элементов.

Ключевые слова: трещина ; временное сопротивление материала; разрушающее напряжение.

С.Н. Алехин
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
ВИБРАЦИОННОГО ПОЛЯ ПОДВЕСНОЙ
ЧАСТИ СТИРАЛЬНЫХ МАШИН

В статье рассматриваются вопросы оценки динамических характеристик стиральных машин путем определения параметров плоского вибрационного поля в произвольных поперечных плоскостях системы. Приведены схемы формирования вибрационного поля при

solving thermoelasticity problems for multilayered structures. The solution for the heat conduction problem with the boundary conditions of the 4th sort on the surface of the contact layers and heterogeneous asymmetric boundary conditions of third sort on the external borders by the finite integral transforms method is given.

Keywords: thermotensions, moving, multi-layered structure.

A.P.Abysov, O.I.Tarabarin
DEFINITION OF MACHINE PARTS
CONSTRUCTIVE ELEMENTS BEARING
CAPACITY WITH REGARD TO DEFECTS
IN THE FORM OF CRACKS

Complex research results of machines and pipelines design parts constructive elements defects influence in the form of cracks on bearing capacity are illustrated. The analytical formulas are received, allowing calculating fracture strength coefficients depending on geometrical parameters of a crack, as well as coefficients, specified by the length and direction of defect. Numerical values of coefficients allow estimating influence of superficial defects on strength characteristics of constructive elements.

Keywords: a crack; material ultimate strength; rupture stress.

S.N. Alekhin
FEATURES OF FORMATION OF A
VIBRATING FIELD OF A PENDANT PART
OF WASHING MACHINES

The article deals with the evaluation of dynamic characteristics of washing machines by defining the parameters of the plane of vibration of the field in an arbitrary transverse plane of the system. The schemes of the formation of the vibration field in the linear

линейных и угловых колебаниях подвесной части стиральных машин. Рассмотрены основы определения параметров вибрационного поля, характеризующие его форму и размеры.

Ключевые слова: вибрация стиральных машин, линейные и угловые колебания, вибрационное поле, амплитуды колебаний

**В.В. Андреев, А.А. Бухалов
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ПРОВЕДЕНИЯ
ИСПЫТАНИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ
НАГРУЖЕНИИ С ПОМОЩЬЮ
ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

В работе представлены результаты использования нейронных сетей для определения информации об условиях проведения испытаний на усталость. На примере металлических конструкционных материалов (сталей и сплавов) приведены результаты применения нейронных сетей для определения действующих факторов. Исследованы различные типы нейронных сетей и показатели точности восстановления информации в зависимости от числа определяемых факторов.

Ключевые слова: прогнозирование показателей сопротивления усталости металлов, восстановление информации, искусственная нейронная сеть.

**Ю.А. Анисимов, В.Л. Долганов,
С.Х. Загидуллин, Б.Е. Шенфельд
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ПРОИЗВОДСТВА ГРАНУЛИРОВАННОЙ
СЕРЫ В ООО «ЛУКОЙЛ-
ПЕРМНЕФТЕОРГСИНТЕЗ»**

Предложен новый эффективный метод отвода тепла из грануляторов серы в производстве глубокой переработки нефти ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез». Проведены численные эксперименты, моделирующие различные тепловые режимы работы грануляторов. Полученные результаты подтвердили перспективность нового метода охлаждения грануляторов серы.

and angular vibrations of the suspension of washing machines. The bases of determining the parameters of the vibration field, describing its shape and size.

Keywords: the vibration of washing machines, linear and angular vibrations, vibration field, the oscillation amplitude

**V.V. Andreev, A.A. Buhalov
DEFINITION OF THE TEST UNDER
CYCLIC LOADING USING ARTIFICIAL
NEURAL NETWORK**

The paper presents the results of the neural networks using to identify information about the terms of the fatigue test. In the case of metallic structural materials (steels and alloys), the results of the neural networks application to determine the relevant factors are presented. Various types of neural networks and measures of the data recovery accuracy, are presented with depending on the identified factors number.

Keywords: forecasting of fatigue resistance of metals, recovery of information, artificial neural network

**U.A. Anisimov, V.L. Dolganov,
S.H. Zagidullin, B.E. Shenfeld
PERFECTION OF PRODUCTION OF
GRANULATED SULPHUR IN LTD.
«LUKOIL-PERMNEFTEORGSINTEZ»**

The new effective method of heat removal from the sulfur granulators in manufacture of deep oil refining of LTD «LUKOIL-Permnefteorgsintes» is offered. The numerical experiments modeling various thermal operating modes sulfur granulators are made. The received results have confirmed perspective of a new method of cooling granulators of sulfur.

Key words: sulfur, granulation, evaporative cooling, dimensionless equations.

Ключевые слова: сера, гранулирование, испарительное охлаждение, критериальные уравнения.

Е.А. Архангельская, М.В. Грушичева
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ
ИЗМЕРЕНИЙ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ
ТЕЛ ВРАЩЕНИЙ

В статье приведены результаты сравнения трудоемкости измерений блока кулаков ремизных СТБ-05.000.42.0 СБ некоторыми средствами. Анализировались координатно-измерительные машины, ОДГ-3, приборы для измерений линейных перемещений и т.д. Данные получены экспериментальными и аналитическими методами.

Ключевые слова: трудоемкость измерений, сложнопрофильные детали вращения, средства измерений, информационно-измерительные системы.

В.И. Асташенко, Р.А. Бикулов,
М.С. Колесников, И.О. Леушин
ПРИМЕНЕНИЕ
АЛЮМИНИЗИРОВАННОГО ЧУГУНА ДЛЯ
ОПОРНОГО СЛОЯ ЛИТЫХ
БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ШТАМПОВ
ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В работе представлены результаты исследования в области создания новых материалов для производства литой биметаллической пресс-оснастки путем регулируемой направленной кристаллизации в условиях форсируемого охлаждения.

Ключевые слова: штампы для горячего деформирования, биметаллические штампы, алюминизированный чугун.

М.М. Башаров, А.Г. Лаптев,
М.В. Сaitбаталов
МОДЕЛЬ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В
НАСАДОЧНОЙ КОЛОННЕ С
ПЕРЕМЕННЫМИ МАССОВЫМИ
РАСХОДАМИ ПО ВЫСОТЕ

В статье рассмотрена математическая модель и метод расчета насадочных противоточных теплообменников колонн. На основе диффузионной модели

Е.А. Archangelskaja, M.V. Grushicheva
THE EFFICIENCY ANALYSIS FOR
COMPLEX SOLIDS OF REVOLUTION
MEASURING DEVICES

The article presents the analysis of time consumption of main measurement processes applied to complex solids of revolution. We presented our results for block group STB-05.000.42.0 SB. The data obtained by experimental and analytical methods.

Keywords: time consumption of measurement, measuring devices, complex solids of revolution, information and measurement systems.

V.I. Astashchenko, R.A. Bikulov, M.S.
Kolesnikov, I.O. Leushin
APPLICATION OF ALUMINUM-BACKED
CAST IRON FOR BASIC LAYER OF HOT
STRAINING CAST BIMETALLIC PRESS
TOOLS

Research results in the field of new materials creation for manufacture of cast bimetallic press equipment by an adjustable oriented crystallization in conditions of forced cooling are presented in the paper.

Keywords: hot-working press tools, bimetallic press tools, aluminum-backed cast iron.

М.М. Basharov, A.G. Laptev, M.V. Saitbatolov
THE MODEL OF HEAT AND MASS
TRANSFER IN PACKED COLUMN WITH
VARIABLE MASS FLOWS THROUGH
HEIGHT

The mathematical model and calculation method of counterflow packed heat-mass transfer column has been considered in this article. On the basis of diffusion model of flows pattern has been developed the system of

структуры потоков получена балансовая система дифференциальных уравнений, позволяющая получить профили концентраций целевого компонента и температуры по высоте колонны. Межфазный тепло- и массоперенос рассчитывается используя характеристики турбулентного пограничного слоя. В качестве примера приведен расчет колонны охлаждения пирогаза водой в производстве этилена.

Ключевые слова: массообмен, пленочное течение, насадки, колонные аппараты, математическое моделирование.

**В.Ф. Беккер
ДИНАМИКА МЕХАНИЧЕСКОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВИЖНОЙ ШАРОВОЙ
НАСАДКИ**

В соответствии с положениями теории бильярдной Синаи рассматривается взаимодействие подвижной насадки внутри замкнутого рабочего объема, которое ведет к рассеянию направленной кинетической энергии. Приняты допущения, описана методика расчета динамических оценок для разного количества элементов: числа столкновений, быстрого промежутка времени, энергии всей массы подвижной насадки. Приведены вычислительные эксперименты и анализ полученных результатов.

Ключевые слова: подвижная насадка, теория бильярдной, число столкновений, быстрый промежуток времени.

**А.В. Беляев к.т.н., А.С. Григоров
ОБНАРУЖЕНИЕ АТАК НА БАЗЫ
ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ
ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ
РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫПОЛНЕНИЯ SQL-
ЗАПРОСОВ**

В данной работе представлены результаты эксперимента, показывающего применимость в качестве инструмента для обнаружения инсайдерских атак на базы данных метода обнаружения аномалий в

differential equations that allow to determine a profiles of target component concentration and temperature through column height. Interphase heat- and mass transfer is computed using characteristics of turbulent boundary layer. As example has been presented the calculation of column for cooling pyro gas by water when in using by ethylene production.

Keywords: mass transfer, film flow, packing, column devices, mathematical simulation

**V.F. Bekker
DYNAMICS OF MECHANICAL
INTERACTION
OF THE BALL MOVABLE NOZZLES**

In accordance with the theory of Sinai billiards be regarded interaction of ball attachment inside a closed working volume, which leads to the scattering of directed kinetic energy. Accepted assumptions, describes the method of calculating the dynamic estimates for the different number of elements: the number of collisions, fast intermediate scary time, energy, the mass of moving heads. Presents the computational experiments and analysis of the results.

Keywords: ball movable nozzle, the theory of billiards, the number of collisions, a quick period of time.

**A.V. Belyaev, A.S. Grigоров
DETECTION OF ATTACKS TO
DATABASES ON THE BASIS OF THE
ASSESSMENT OF INTERNAL
STRUCTURE OF RESULTS OF
PERFORMANCE OF SQL-REQUESTS**

This paper presents experimental results showing the applicability a method of detecting anomalies in the SQL-database queries based on an assessment of the relationship between the data from the query result for detection of

SQL-запросах, основанного на оценке взаимосвязей между данными, попавшими в результат выполнения запроса.

Ключевые слова: обнаружение аномалий, системы обнаружения вторжений, инсайдерские атаки.

Г.Н. Беляев, В.Л. Долганов, С. Х. Загидуллин,
Ю. И. Хвастухин, Б. Е. Шенфельд
ГРАНУЛИРОВАНИЕ ГЛИНИСТО-СОЛЕВЫХ ШЛАМОВ – ОТХОДА ПРОИЗВОДСТВА КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ

Установлена принципиальная возможность совместного гранулирования глинисто-солевых шламов и пылевидного хлористого калия в аппарате с псевдоожиженным слоем. Агрохимические испытания показали высокую эффективность полученного калийного удобрения на урожайность силосных культур. Результаты исследования могут быть использованы для проектирования укрупненной опытной установки гранулирования производительностью 2-3 т/ч.

Ключевые слова: пылевидный хлористый калий, глинисто-солевые шламы, псевдоожиженный слой, гранулирование.

Р.А. Бикулов, Ф.Г. Карих, Н.Н. Сафронов
ЛИТАЯ ВСТАВКА ШТАМПА ГОРЯЧЕГО ОБЪЁМНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ИЗ ДИСПЕРСНЫХ ОТХОДОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ

В работе представлены результаты по сравнению свойств отливок вставки штампа из стали 3Х5МФНСП и стали, полученной из дисперсных отходов машиностроения методом прямого синтезирования в специализированном электротермическом плавильном агрегате.

Ключевые слова: штампы горячего объемного деформирования, поковка, сталь 3Х5МФНСП, формовочная смесь, дисперсные отходы машиностроения.

А.П. Буйносов

insider attacks against the database.

Keywords: anomaly detection, intrusion detection systems, insider attacks.

G.N. Beljaev, V.L. Dolganov, S.H. Zagidullin,
J.I. Hvastuhin, B.E. Shenfeld
GRANULATION OF CLAY-SALINE SLUDGE – WASTE PRODUCTION OF POTASSIUM FERTILIZERS

The principal possibility of joint granulation of clay-saline sludge and dusty potassium chloride in a fluidized bed apparatus is shown. Agrochemical tests have shown high efficiency of the received potash fertilizer on productivity of silage cultures. The results of the study can be used for the design of an experimental plant granulation capacity of 2-3 tons/h.

Key words: dusty potassium chloride, clay-saline sludge, fluidized bed, granulation.

R.A. Bikulov, F.G. Karih, N.N. Safronov
HOT VOLUME STRAINING CAST INSERT PRESS TOOL MADE OF MACHINE-BUILDING DISPERSE WASTES

Results in comparison of press tool insert castings properties from a steel 3Х5МФНСП and a steel gained from disperse wastes by a method of direct synthesizing in the specialized electro thermal melting facility are presented in the paper.

Keywords: hot volume straining press tools, forging, a steel 3Х5МФНСП, a molding sand, machine-building disperse waste.

A.P. Buinosov

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РЕСУРСА
БАНДАЖЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР
ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В статье приведена методика определения ресурса бандажей колесных пар тягового подвижного состава основанная на полиномиальной зависимости контролируемых параметров от пробега. Приведены результаты расчета ресурса до обточки бандажей по предельному износу гребня колесных пар электровозов ВЛ11 по существующей и предлагаемой методикам.

Ключевые слова: локомотив, колесная пара, бандаж, ресурс, методика, полиномиальная регрессия.

А.П. Буйносов, И.М. Пышный
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ
РАЗНОСТИ ДИАМЕТРОВ БАНДАЖЕЙ С
УЧЕТОМ ЗАТРАТ НА РЕМОНТ
КОЛЕСНЫХ ПАР ЭЛЕКТРОВОЗОВ

В статье приведен метод расчета и определены допустимые разности в диаметрах бандажей колесной пары в эксплуатации с учетом затрат на ремонт для различных депо и серий пассажирских и грузовых электровозов, находящихся в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: электровоз, колесная пара, бандаж, износ, затраты на ремонт, разность диаметров.

Т.В. Бурнышева, А.Ф. Разин,
О. А. Штейнбрехер
ОЦЕНКА ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ
СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ОБОЛОЧЕЧНОЙ
КОНСТРУКЦИИ ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ
Рассчитываются поля напряжений составной оболочечной конструкции при осевом сжатии. Приведено сравнение численного решения с данными натурного эксперимента. Оценено влияние толщин обшивок составных частей конструкции и потери устойчивости крышек люков на осевые перемещения.

Ключевые слова: сетчатые оболочечные

TECHNIQUE OF THE ESTIMATION OF
THE RESOURCE OF
BANDAGES OF WHEEL PAIRS TRACTION
ROLLING STOCK

In article the procedure of definition of a resource of bandages of wheel pairs a traction rolling stock based on polynomial fit dependences of controllable parameters on run is resulted. Results of calculation of a resource before turning bandages on limiting wear of a crest of wheel pairs electric locomotives ВЛ11 on existing and offered procedures are resulted.

Keywords: The locomotive, wheel pair, bandage, resource, technique, polynomial fit regress.

А.П. Buinosov, I.G. Pishniy
DEFINITION OF THE ADMISSIBLE
DIFFERENCE OF DIAMETERS OF
BANDAGES TAKING INTO ACCOUNT
COSTS OF REPAIR OF WHEEL PAIRS OF
ELECTRIC LOCOMOTIVES

The method of calculation is given in article and admissible differences in diameters of bandages of wheel pair in operation taking into account costs of repair for various depots and series of the passenger and cargo electric locomotives being in various service conditions are defined.

Keywords: electric locomotive, wheel pair, bandage, wear, costs of repair, difference of diameters.

Т.В. Burnysheva, A.F. Razin,
O.A. Shteinbreher
EVALUATION OF THE MUTUAL
INFLUENCE OF THE PARTS SHELL
STRUCTURES UNDER AXIAL
COMPRESSION

The problem of the stress-strain state of composite shell structures under static loading is solved. Comparison of numerical solutions with those of full-scale experiment is presented. Effect of cladding thickness and the component parts of the design buckling manhole covers on the axial displacement evaluated using computer simulation.

конструкции, композиционные материалы, вычислительный эксперимент, численное решение.

В.М. Бушуев, Р.К. Мусин, И. . Синани
СТРУКТУРА ШЛИКЕРНОГО ПОДСЛОЯ И
ФОРМИРОВАНИЕ НА ЕГО
ПОВЕРХНОСТИ ПИРОУГЛЕРОДНОГО
ПОКРЫТИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ
ГЕРМЕТИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА
ОСНОВЕ УУКМ

В статье представлены результаты исследования микроструктуры шликерного подслоя после насыщения пироуглеродом и механизм формирования на его поверхности пироуглеродного покрытия при пиролизе метана с использованием изотермического способа. Показано, что шликерный подслей состоит из конгломератов, которые состоят из блоков слоистого строения, имеющих высокодисперсную структуру, что является основной структурной предпосылкой увеличения прочностных характеристик шликерного подслоя. Осаждение пироуглеродного покрытия на поверхности шликерного подслоя начинается с образование мелких зародышей, дальнейший рост которых подчиняется правилу геометрического отбора и кристаллиты растут с максимальной скоростью в направлении их вершин, что формирует столбчатую структуру, почти с теоретической плотностью.

Ключевые слова: шликерный подслей, конгломераты, пироуглеродное покрытие, пиролиз метана, высокодисперсная структура, микроструктура, зародыши, кристаллит, УУКМ, столбчатая структура.

А.Б. Ветошкин, Д.В. Куделин,
Т.Н. Несиоловская
ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ИСПЫТАНИЯ НА
ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА УСИЛЕНИЯ
НАПОЛНЕННЫХ БУТАДИЕН-
СТИРОЛЬНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ

Показано, что эффективность применения наполнителей в некристаллизующихся

Keywords: ribbed shell structures, composite materials, computational experiment, numerical solution.

V.M. Bushuev, R. K. Musin, I. L. Sinani
THE STRUCTURE OF SLIP SUB-LAYER
AND SURFACE PYROCARBON COATING
FORMATION AT MANUFACTURING
HERMETIC CONSTRUCTIONS ON THE
BASE OF CCCM

Analysis results of slip sub-layer microstructure after its Pyrocarbon saturation and the mechanism of its surface Pyrocarbon coating formation at methane thermal decomposition are given in the article. It has been shown that slip sub-layer is consisted of conglomerates including blocks of foliation, having fine-grained structure, which is the main structural background for the increase of slip sub-layer properties.

Deposition of Pyrocarbon coating on the slip sub-layer surface begins with the formation of small nuclei, further growth of which is obeyed to the rule of geometric selection, and crystal grains grow in the direction of their tips with maximum rate. This process is resulted in columnar structure practically with apparent density.

Keywords: slip sub-layer, conglomerates, Pyrocarbon coating, methane thermal decomposition, fine-grained structure, microstructure, nuclei, crystal grains, CCCM, columnar structure.

A.B. Vetoshkin, D.V. Kudelin,
T.N. Nesiolovskaya
THE INFLUENCE OF TESTING
CONDITIONS ON DISPLAY OF
REINFORCEMENT EFFECT OF STYREN-
BUTADIENE ELASTOMERS

It was shown, that the effectiveness of fillers in non-crystallizing elastomers determine with

эластомерах определяется геометрическим усилением, ориентацией макромолекул при деформировании, распределением цепей по натяжениям, характером тяжей. Превалирующее влияние того или иного фактора, определяющего уровень свойств наполненных резин, зависит от условий испытания.

Ключевые слова: сложнодеформированное состояние, одноосное растяжение, деформационно-прочностные свойства, сопротивление раздиру, геометрическое усиление.

Д.В. Вожегов, Д.А. Страбыкин
МЕТОД ПАРАЛЛЕЛЬНОГО
АБДУКТИВНОГО ЛОГИЧЕСКОГО
ВЫВОДА С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ФАКТОВ

Предлагается метод параллельного абдуктивного вывода с определением фактов. Дается формальная постановка задачи. Описываются основные процедуры метода. Приводится пример логического вывода.

Ключевые слова: абдуктивный логический вывод, определение фактов, параллельные вычисления.

В.И. Воловач, А.С.О. Мамедов,
А.А. Попов
АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ
КОГЕРЕНТНОГО И НЕКОГЕРЕНТНОГО
МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ В
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ
ОХРАНЫ

В статье рассматривается помехоустойчивость радиотехнических устройств охраны и обосновывается возможность использования когерентного и некогерентного методов обнаружения. Показано, что предпочтительным для использования является когерентное обнаружение. Вводится показатель количественной оценки помехоустойчивости радиотехнических устройств охраны.

Ключевые слова: радиотехническое устройство обнаружения,

geometrical reinforcement, strain orientation of macromolecules, distribution of chains according to its tension and the character of tense structures. Prevail influence of this or that factor, determine the level of filled rubbers properties, depends on testing conditions.

Keywords: combined stress condition, simple tension, stress-strain properties, tear resistance, geometrical reinforcement.

D.V. Vozhegov, D.A. Strabikin
THE PARALLEL METHOD ABDUCTIVE
INFERENCE WITH FACTS
DETERMINATION

Developed a method for the abductive inference of conclusions with facts determination. Describes formal statement of the problem. Describes the basic procedures of the method. An example is given of the method.

Keywords: abductive inference, determination of the facts, parallel computing.

V.I. Volovach, A.S.O. Mamedov,
A.A. Popov
ANALYSIS OF COHERENT AND
INCOHERENT NOISE DETECTION
METHODS IN RADIO PROTECTION
DEVICES

The article deals with immunity of radio devices and justified the use of coherent and incoherent detection methods. It was shown that preferred to use a coherent detection. We introduce indicators to measure noise immunity of radio devices.

Keywords: Radio-detection device, noise immunity, coherent and incoherent detection, the detection rate of optimality.

помехоустойчивость, когерентное и некогерентное обнаружение, показатель оптимальности обнаружения.

В.И. Воловач, А.А. Попов, А.В. Савенко
РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБНАРУЖЕНИЯ И
РАЗЛИЧЕНИЯ СИГНАЛОВ В
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ
ОХРАНЫ, ИСПОЛЗУЮЩИХ ПРИНЦИПЫ
АКТИВНОЙ И ПОЛУАКТИВНОЙ
ЛОКАЦИИ

Рассмотрена задача обнаружения и различения сигналов радиотехническими устройствами охраны для случаев активной и полуактивной радиолокации. Получено одно из возможных выражений для определения отношения правдоподобия. Приведены практически важные выражения для определения условных вероятностей правильного и ложного обнаружения.

Ключевые слова: задача обнаружения и различения сигналов, активная радиолокация, полуактивная радиолокация, зондирующий сигнал, оптимальный приемник, отношение правдоподобия, критерий Неймана-Пирсона.

Д.А. Габриелян
МАГНИТОТЕПЛОВОЙ ДВИГАТЕЛЬ.
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
МАГНИТОТЕПЛОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Работа посвящена магнитотепловой технологии и ее развитию в двигателестроении с учетом современного состояния энергетики. Целью применения магнитотепловой технологии является создание экологически безопасных и эффективных двигателей и генераторов электрического тока. Устройства, основанные на такой технологии, могут получить применение почти в любой сфере деятельности человека.

Ключевые слова: магнитотепловая технология, магнитотепловой двигатель, альтернативная энергетика.

А.М. Гирфанов, А.В. Дворянкин,
Д.В. Неделько, С.А. Михайлов,
Т.А. Мухаметшин

V.I. Volovach, A.A. Popov, A.V. Savenko
THE DECISION OF THE PROBLEM OF
DETECTION AND DISTINCTION OF
SIGNALS IN THE RADIO ENGINEERING
DEVICES OF PROTECTION USING
PRINCIPLES OF THE ACTIVE AND
SEMIACTIVE LOCATION

The problem of detection and distinction of signals by radio engineering devices of protection for cases of an active and semi-active radar-location is considered. One of possible expressions for definition of the relation of credibility is received. Almost important expressions for definition of conditional probabilities of correct and false detection are resulted.

Keywords: a problem of detection and distinction of signals, an active radar-location, the semi-active radar-location, a probing signal, the optimum receiver, the credibility relation, Neumann-Pearson's criterion.

D.A. Gabrielyan
THERMOMAGNETIC ENGINE.
DEVELOPMENT PROSPECTS OF
THERMOMAGNETIC TECHNOLOGY

The work is devoted to the thermomagnetic technology and to its prospects of development in propulsion engineering including current state of energetics. The purpose of the thermomagnetic technology is to create environmentally safe and effective engines and generators of electricity. Devices based on this technology can get application in any field of human activity.

Keywords: alternative energetics, thermomagnetic technology, thermomagnetic engine.

A.M. Girfanov, A.V. Dvorankin,
D.V. Nedelko, S.A. Mikhailov,
T.A. Mukhametshin

К ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОСНОВНЫХ
АГРЕГАТОВ ВЕРТОЛЕТА

Предложен способ определения остаточного ресурса основных агрегатов вертолета с учетом фактических условий его эксплуатации. Для определения характеристик режима полета по ограниченному числу параметров полета, регистрируемых штатными защищенными бортовыми самописцами, использована технология искусственных нейронных сетей.

Ключевые слова: вертолет, ресурс, повторяемость режимов полета, искусственные нейронные сети.

Г.М. Гончаров, И.С. Гуданов, А.А. Ломов,
В.С. Черепенин
ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ПАРАМЕТРОВ ЭЛАСТИЧЕСКОГО
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИ ЭКСТРУЗИИ
ПРОТЕКТОРНЫХ ЗАГОТОВОК
АВТОМОБИЛЬНЫХ ПИШ

Рассмотрена математическая модель гидродинамики экструзии с учётом эластического восстановления. Описаны особенности экструзии резиновых смесей через каналы со сложной геометрией грани. Выявлены закономерности, связывающие формообразование свободной поверхности с режимными параметрами экструзии.

Ключевые слова: экструзия, протекторные формующие головки, длинномерные профильные изделия, вязкоупругие жидкости, резиновые смеси, постэкструзионное разбухание, численные методы.

М.С. Гринкрug, Н.А. Новгородов,
Ю.И. Ткачева
ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ
ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НИЗКОГО
НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КОММУТАЦИИ
НАГРУЗОК

Данная статья затрагивает проблему надежности работы основных элементов городских и сельских электрических сетей при управляемой коммутации нагрузок:

TO THE PROBLEM OF
DETERMINING THE RESIDUAL LIFE
HELICOPTER MAIN UNITS

A method is proposed for determination of residual life of major components of helicopter based on the actual conditions of use. To determine the characteristics of the flight regimes for a limited number of flight parameters recorded by the protected flight recorders, the used technology artificial neural networks.

Keywords: Helicopter, a resource, the frequency of flight regimes, artificial neural networks.

G.M. Goncharov, I.S. Gudanov,
A.A. Lomov, V.S. Cherepenin
NUMERICAL DETERMINATION OF
PARAMETERS OF ELASTIC RECOVERY
FOR EXTRUSION PROTECTION BILLET
ROAD TIRES

A mathematical model of the hydrodynamics of the extrusion, taking into account the elastic recovery. The features of the extrusion of rubber compounds through the channels with complex geometry boundaries. The regularities connecting the shaping of the free surface with regime parameters of the extrusion.

Keywords: extrusion, tread molding dies, lengthy profile articles, viscoelastic fluids, rubber blends, extrusion swell, numerical methods.

M.S. Grinkrug, N.A. Novgorodov,
Y.I. Tkatcheva
ELEMENTS OF ELECTRICAL
DISTRIBUTION NETWORKS
RELIABILITY IMPROVING IN LOW
VOLTAGE LOADS SWITCHING

This article addresses the basic elements of urban and rural power grids reliability problem in the controlled loads switching: step-down transformer substations with different power step-down transformers, diesel-

понижающих трансформаторных generator units.
подстанций с понижающими
трансформаторами (ПТ) различной
мощности, дизель-генераторных агрегатов.

Keywords: step-down transformer, diesel-generator, distribution network, single-phase load, transient, loads switching.

Ключевые слова: понижающий трансформатор, дизель-генератор, распределительная сеть, однофазная нагрузка, переходный процесс, коммутация нагрузок.

А.М. Долганов, Т.Н. Иванова
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ТЕПЛООБМЕНА НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ
ПОЛЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ПЛАСТИН ПО
КРОМКЕ

Исследование температуры при шлифовании пластин по кромке позволило установить закономерности распространения тепла с учетом охлаждения и определить влияние коэффициента теплообмена на температурное поле.

Ключевые слова: шлифование, пластина, кромка, теплообмен.

А.М. Dolganov, T. N. Ivanova
RESEARCH OF HEAT EXCHANGE
INFLUENCE ON TEMPERATURE FIELD
AT GRINDING OF PLATES ON EDGE

Research of temperature at grinding of plates on edge allowed to establish laws of heat diffusion in view of cooling and to define influence of heat exchange factor on temperature field.

Keywords: grinding, plate, edge, wedge, thermal processes.

А.А. Захаров, Е.Р. Кожанова
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТДЕЛЬНОГО
КОЛЬЦЕВОГО МАГНИТА С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-
ФУНКЦИИ ГАУССА ВТОРОГО ПОРЯДКА

В статье рассматривается построение математической модели продольного распределения магнитного поля отдельного кольцевого магнита с использованием вейвлет – функции Гаусса 2-го порядка.

Ключевые слова: магнитное поле, продольное распределение магнитного поля, математическая модель, вейвлет – функция Гаусса 2-го порядка, аппроксимация.

А.А. Zaharov, E.R. Kozhanova
MATHEMATICAL MODELLING OF THE
MAGNETIC FIELD OF THE SEPARATE
RING MAGNET WITH USE WAVELET-
FUNCTIONS GAUSS OF THE SECOND
ORDER

In article creation of mathematical model of longitudinal distribution of a magnetic field of a separate ring magnet with use wavelet – functions Gauss of the 2nd order is considered.

Keywords: magnetic field, longitudinal distribution of a magnetic field, mathematical model, wavelet - function Gauss of the 2nd order, approximation.

М.В. Зильберман, Е.А. Пичугин,
Н.Б. Ходяшев, М.В. Черепанов,
Б.Е. Шенфельд
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОСТАВА БУРОВЫХ
ШЛАМОВ НА КЛАСС ОПАСНОСТИ ДЛЯ
ОКРУЖАЮЩЕЙ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ
Разработка нефтяных и газовых

М.В. Zilberman, E.A. Pichugin,
N.B. Hodyashev, M.V. Cherepanov, B.E.
Shenfeld,
EVALUATION OF THE INFLUENCE OF
DRILL CUTTINGS COMPOSITION ON
HAZARD CLASS FOR THE
ENVIRONMENT

месторождений связана с образованием большого количества буровых шламов, представляющих собой отходы бурения и оказывающих значительное негативное воздействие на окружающую среду. Состав буровых шламов, образующихся при выделении измельченной горной породы из буровых растворов, весьма разнороден и зависит от геологических условий, технологического оформления процесса очистки бурового раствора, а также от стадии бурения, которой соответствует отход. В работе представлены результаты изучения влияния химического состава твердой фазы и водной вытяжки образцов буровых шламов на класс опасности для окружающей природной среды.

Ключевые слова: буровой шлам, минерализация, биотестирование, класс опасности.

С.М. Зраенко
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ
АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
РАСФОКУСИРОВКИ
РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ
Предложены эмпирические параметры оценки степени расфокусировки изображения цели в радиолокаторе с синтезированной апертурой. Проведены исследования по определению точности и диапазона оценки квадратичной фазовой ошибки синтеза на моделях распределенной цели.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, распределенная цель, расфокусировка изображения, эмпирические параметры.

А.М. Игнатова
МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ
НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В
СТАЛЯХ

В работе представлены результаты изучения морфологии неметаллических включений в сварных соединениях, интерпретация результатов направлена на подтверждение теории о поведением неметаллических

Development of oil and gas deposits is associated with the formation of a great number of drill cuttings, that represents drilling waste and a significant negative impact on the environment. Drill cuttings composition which is formed with the allocation of crushed rock from the drilling solution is very heterogeneous and depends on geological conditions, technological process of cleaning of drilling fluid, as well as from the stage of drilling, that corresponds to the waste. The results of studying the influence of chemical composition of solid phase and aqueous extracts of samples of drill cuttings on the class of risk to the environment is shown in this work.

Key words: drill cuttings, mineralization, bioassay, hazard class

S.M. Zraenko
STUDY OF EMPIRICAL ALGORITHMS
FOR DETERMINING THE RADAR IMAGE
DEFOCUSING

Proposed the empirical assessment of the parameters of image defocusing targets of synthetic aperture radar. Investigations to determine the accuracy and range of estimates of the quadratic phase error synthesizing in the models of distributed targets.

Keywords: synthetic aperture radar, a distributed target, defocusing of the image, the empirical parameters.

A.M. Ignatova
MECHANISM
OF FORMATION NONMETALLIC
INCLUSIONS IN STEEL

The results of studying the morphology of nonmetallic inclusions in the welded joints, the interpretation of the results aimed to confirm the theory about the behavior of non-metallic inclusions M. Flemings.

включений М. Флемингса.

Ключевые слова: сварка, неметаллические включения, синтетические минеральные сплавы.

Keywords: welding, non-metallic inclusions, synthetic mineral alloys

И.Н. Ищенко
МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ

В статье описывается метод повышения производительности гидроабразивного резания, основанный на внешнем воздействии на гидроабразивную струю, проводятся предварительные исследования применимости такого метода.

Ключевые слова: гидроабразивное резание, повышение производительности, соударение струй.

I.N. Ishchenko
A METHOD FOR INCREASING THE
PRODUCTIVITY WATERJET CUTTING
This paper describes a method for increasing the productivity Waterjet Cutting, based on the external impact on the waterjet stream, carried out preliminary studies of the applicability of the method.

Keywords: hydroabrasive cutting, increasing productivity particular, the collision of the jets.

А.В. Козлова, В.Я. Модорский,
В.Ю. Петров, А.Н. Поник
ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА
ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАСТРОЕК
ГАЗОХОДА ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ
ДЛЯ ОТВОДА И ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЯЧИХ
ГАЗОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
Разработана инженерная методика определения настроек газохода переменного сечения для отвода и охлаждения горячих газов энергетических установок различного назначения. Определены области допустимой работы газохода.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, численный эксперимент, газоход переменного сечения, форсунки, испарение, инженерная методика, допустимые режимы.

A.V. Kozlova, V.Ya. Modorsky, V.U. Petrov,
A.N. Ponik
ENGINEERING TECHNIQUE OF
DEFINITION OF SETTING SCHANNEL OF
VARIABLE SECTION FOR BRANCH AND
COOLINGS OF HOT GASES POWER
ENGINE

The engineering technique of definition of settings channel variable section is developed for branch and cooling of hot gases of power engine of different function. Areas of admissible work channel are defined.

Keywords: computational fluid dynamics, numerical experiment, channel variable section, nozzle, evaporation, engineering technique, admissible modes.

Г.А. Козлова, Н.Б. Ходяшев, Б.Е. Шенфельд
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТРАБОТАННЫХ
ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ТРАВильНЫХ
РАСТВОРОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ
ПРОИЗВОДСТВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ
ВОД И ПОЛУЧЕНИЯ ПИГМЕНТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ

В работе рассмотрено использование отдельных типов железосодержащих травильных растворов гальванических

G.A. Kozlova, N.B. Hodyashev, B.E. Shenfeld
USE OF WORKED-OUT IRON
CONTAINING ETCHING SOLUTIONS IN
GALVANIC PRODUCTION FOR WASTE
WATER TREATMENT AND RECEIPT
OF PIGMENT MATERIALS

This article examines the use of certain types of iron-containing etching solutions in galvanic production for waste water treatment containing ions of Cr(VI, III), Zn^{2+} , Cu^{2+} , and

производства для очистки сточных вод, содержащих ионы Cr(VI, III), Zn²⁺, Cu²⁺, а также получения железистоокисных пигментных материалов.

Ключевые слова: железосодержащие травильные растворы, очистка сточных вод, железистоокисные пигменты.

Л.М. Котляр, Г.Ю. Шакирова
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМ
ЭЛЕКТРОДОМ

Приведенный анализ и экспериментальные исследования электрического разряда между стальным электродом и жидким катодом позволили получить вольтамперные характеристики, зависимости плотности тока от тока разряда, распределение потенциала и напряженности электрического поля. Применяв критерии подобия свободных дуг, получены эмпирические уравнения для расчета плазменных электротермических установок.

Ключевые слова: электрический разряд, вольтамперная характеристика, диффузия заряженных частиц, положительный столб, плазма, критериальные уравнения.

Д.В. Куделин, Т.Н. Несиоловская
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К
ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТОНКОСТЕННЫХ
РЕЗИНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Сформулирован подход к проектированию тонкостенных резиновых изделий, включающий решение трех взаимосвязанных задач: разработку методов лабораторных испытаний, адекватно воспроизводящих напряженно-деформированное состояние изделий; описание кинетики развития дефектности материала; моделирование процессов, вызывающих максимальное повреждение материала.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, кинетика накопления дефектов, разрушение.

Л.Е. Мальцев, Т.В. Мальцева, А.В. Минаева,

also obtain iron oxide pigment materials.

Keywords: iron-containing etching solutions, waste water treatment, iron oxide pigments.

L.M. Kotlyar, G.Yu. Shakirova
MATHEMATICAL MODEL OF THE
ELECTRIC DISCHARGE WITH LIQUID
ELECTRODES.

Volt-ampere characteristic, potential and electric field strength distribution as well as current density versus current plot of the electrical discharge between steel anode and liquid cathode had been obtained in experimental research. Empirical equations for calculation of the plasma thermo-electrical installations had been obtained utilizing similarity criterions of an arc discharge.

Keywords: electrical discharge, volt-ampere characteristic, diffusion of charged particles, positive column, plasma, criterion equations.

D.V. Kudelin, T.N. Nesiolovskaya
COMPLEX APPROACH TO THING
WALLED RUBBER PRODUCTS DESIGN

An approach to thing walled rubber products design was formulated, included a decision of three interdependent problems: a development of laboratory tests, adequately reconstituting a tens-straining state of products, a description of material's deficiency kinetics and modeling of processes, causing a maximal material's fault.

Keywords: tens-straining state, defect accumulation, fracture.

L.E. Maltsev, T.V. Maltseva, A.V. Minayeva,

А.В. Набоков
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
АРМИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА
ПЕСЧАНОГО ЦИЛИНДРА

В статье на основе решения осесимметричной задачи Ламе предложена методика расчета радиальных перемещений в элементе из геосинтетического материала, армирующего песчаную сваю.

Ключевые слова: песчаная свая, армирующий элемент, геосинтетический материал, радиальные и тангенциальные напряжения, радиальные перемещения, осесимметричная задача Ламе.

Нгуен Ба Нгок, А.Ф. Тузовский
ОПТИМИЗАЦИЯ ХРАНЕНИЯ СЛОВАРЯ
ТРИПЛЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ЧИСЛОВЫХ ИДЕНТИФИКАТОРОВ

Словарь триплетов является важным компонентом поисковых систем по метаописаниям. В статье представлен метод замена каждого уникального элемента триплетов на числовой идентификатор с помощью словаря строк URI. Также описан алгоритм сжатия словаря URI путем удаления общих фрагментов.

Ключевые слова: сжатие без потери, словарь триплетов, семантические метаописания, поисковая система.

Нгуен Ба Нгок, А.Ф. Тузовский
МЕТОД СЕМАНТИЧЕСКОГО ПОИСКА В
КОЛЛЕКЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ
ДОКУМЕНТОВ

В существующих подходах семантического поиска на основе онтологии, как правило, используются оценки близости между экземплярами и понятиями. В данной статье представлен метод вычисления оценки семантической близости между триплетами. На основе данной оценки семантической близости представлена теоретическая модель семантического поиска с использованием представления документов и запросов как наборов триплетов.

A.V. Nabokov
DEFINITION OF DISPLACEMENT
REINFORCING ELEMENT SANDY
CYLINDER

The paper by solving the axisymmetric problem of Lamé proposed method of calculation radial displacements in an element of the geosynthetic material reinforcing its sandy pile.

Key words: sandy pile, reinforcing element, geosynthetic material, radial and tangential tension, radial displacement, axisymmetric task to the Lamé.

Nguyen Ba Ngoc, A.F. Tuzovski
OPTIMIZATION TRIPLE DICTIONARY
STORE BASED ON NUMERICAL
IDENTIFICATION

Triple dictionary is a crucial component for semantic search systems by metadata. In this paper we propose a method to convert each unique element of triples to numeric identification. A compression method for the triple sets based on the exclusion of common fragment is also described.

Key words: Lossless compression, triple dictionary, semantic metadata, information retrieval system.

Nguyen Ba Ngoc, A.F. Tuzovski
A SEMANTIC SEARCH APPROACH IN
THE INTELLENT DOCUMENT
COLLECTIONS

Typically, the current ontology-based semantic search approaches use the semantic similarity between the ontology concepts and individuals like the basic building blocks. In this paper, we propose a semantic similarity scheme for triples. Base on the proposed semantic similarity, a theoretical model of semantic search using the presentation of documents and queries like the triple sets was described.

Key words: ontology, semantic similarity, semantic search, intelligent document, fuzzy set

model.

Ключевые слова: онтология, семантическая близость, семантический поиск, семантические метаописания, модель нечеткого множества.

Д.В. Неделько
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
РАБОТОЕМКОСТИ РЕССОР
ПОЛОЗКОВОГО ШАССИ ВЕРТОЛЕТА ПО
РЕЗУЛЬТАТАМ КОПРОВЫХ
ИСПЫТАНИЙ

Предложена методика выполнения энергетического анализа условий поглощения заданного уровня работоемкости рессоры ползкового шасси вертолета в соответствии с требованиями норм АП-29. Введено понятие показателя энергопоглощающей способности рессоры ползкового шасси вертолета.

Ключевые слова: вертолет, ползковое шасси, рессора, копровые испытания, работоемкость.

А.В. Новичихин
РАЗРАБОТКА ПРОЦЕДУРЫ
ПЛАНИРОВАНИЯ В СОЦИАЛЬНО-
ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
ТОПЛИВНО-СЫРЬЕВОГО РЕГИОНА
Рассматриваются методические особенности разработки процедуры планирования в социально-экономических системах топливно-сырьевого региона. Представлены постановка и решение задачи выхода на траекторию устойчивого развития региона.

Ключевые слова: процедура, планирование, адаптивное управление, социально-экономические системы.

Д.А. Осипович, С.Г. Ярушин
ВЫЯВЛЕНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ
СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРА И
НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ В
ПРОМЫШЛЕННЫХ МАСШТАБАХ НА
ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА
Приведен анализ наиболее изученных способов получения ультра и наноразмерных

D.V. Nedelko
THE ENERGY ANALYSIS
LABORIOUSNESS OF SPRINGS
HELICOPTER SKID LANDING GEAR ON
RESULTS OF HOISTING THE TESTS

Proposed a method implementation of the energy absorption analysis of the conditions specified level laboriousness spring helicopter skid landing gear in accordance with the requirements of the AP-29. The notion of index of energy absorbing ability to spring a helicopter skid landing gear

Keywords: helicopter, skid landing gear, spring, hoisting tests, laboriousness.

A.V. Novitchihin
WORKING OUT THE planning procedure OF
SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS IN FUEL
RESOURCES REGION

There is considered methodical features of development of planning procedure in socio-economic systems in fuel resources region. The statement and solution of a problem of an exit to a trajectory of a sustainable development of the region is offered.

Keywords: procedure, planning, adaptive management, socio-economic systems.

D.A. Osipovich, S.G. Yarushin
ANALYSIS AND SYSTEMATIZATION
PRODUCTION AND APPLICATION
ULTRA AND NANOPOWDER TECHNICAL
PROBLEMS

The most popular ways to production ultra and nanopowder are analyzed. Their major advantages and limitations were indicated. It

порошков. Выявлено, что в процессе экспериментальной проверки способов из поля зрения упущены вопросы разработки технологии получения порошков в промышленном масштабе и вопросы экологической безопасности. В результате делается вывод о необходимости продолжения поиска рациональных методов получения порошков.

Ключевые слова: нанодисперсные материалы; промышленная технология; экологическая безопасность.

А.В. Садыков, Д.А. Садыкова, Д.Б. Вафин
ТРЕХМЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ
АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОВЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ТРУБЧАТЫХ ПЕЧЕЙ

Проведены численные исследования пространственного распределения температуры, осредненных значений скоростей турбулентного течения продуктов сгорания газообразного топлива в топочных камерах трубчатых печей цилиндрического типа нефтехимической промышленности. Сложный теплообмен в камере радиации моделируется трехмерными дифференциальными уравнениями сохранения энергии, компонентов количества движения, неразрывности, $k-\varepsilon$ модели турбулентности, одноступенчатой модели горения, интегро-дифференциальным уравнением переноса энергии излучения. Изучено влияние трехмерного изменения параметров потока на распределение плотностей тепловых потоков по трубчатому экрану, и др. параметров.

Ключевые слова: теплообмен, излучение, турбулентность, трубчатые печи.

Д.А. Страбыкин, М.Н. Томчук
ЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
РАЗВИТИЯ СИТУАЦИЙ

was educed, that questions of development industrial powders production technologies, environmental safety questions and number of other problems with powder characteristics have been overlooked during research in powder production methods. The following conclusions have been made resulting system engineering analysis: none of described nanopowder production method is industrial, it means, streamlining questions these technologies still actual. It is necessary to consider environmental safety aspect in nanopowder production technologies development.

Keywords: nanodisperse materials; industrial technology; ecological safety

A.V.Sadykov, D.A.Sadykova, D.B.Vafin
THREE-DIMENSIONAL CALCULATIONS
OF AERODYNAMICS AND THERMAL
CHARACTERISTICS OF CYLINDRICAL
TUBULAR FURNACES

The spatial distributions of temperature, averaged values of turbulent flow velocities for combustion products of gaseous fuel in furnace chambers of industrial cylinder type tubular furnaces has been numerically studied. Complicated heat exchange in radiation chamber is simulated by the three-dimensional differential equations for conservation of energy, components of movement quantity, indissolubility, $k-\varepsilon$ models of turbulence, one-stage burning model, the integral-differential equation of carrying radiation energy. The influence of three-dimensional change of stream parameters on distribution of thermal stream densities on the tubular screen, etc. parameters is also explored.

Keywords: heat exchange, radiation, turbulence, tubular furnaces.

D.A. Strabykin, M.N. Tomchuk
LOGICAL FORECASTING OF
SITUATIONS DEVELOPMENT

НА ОСНОВЕ ДЕДУКТИВНОГО ВЫВОДА

В работе даётся содержательная постановка задачи логического прогнозирования развития ситуаций, приводится формальное описание задачи прогнозирования как задачи дедуктивного вывода и предлагается метод логического прогнозирования на основе дедуктивного вывода, применение которого иллюстрируется на примерах с использованием исчисления высказываний и исчисления предикатов.

Ключевые слова: логическое прогнозирование развития ситуаций, дедуктивный логический вывод заключений, исчисление высказываний, исчисление предикатов первого порядка

Э.В. Урывский

АНАЛИЗ АЛГОРИТМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТРЕХМЕРНОЙ

РЕКОНСТРУКЦИИ СЦЕН ОКРУЖЕНИЯ

Предлагается новый алгоритм автоматического трехмерного моделирования окружающих объектов. Дается оценка и обоснование алгоритма. Практическое значение исследования состоит в показе взаимосвязи скорости и качества обработки потока изображения для реконструкции трехмерной сцены и характера ее оптимизации с учетом индивидуальных особенностей алгоритма.

Ключевые слова: компьютерное зрение, 3-D сцена, алгоритм реконструкции, машинное зрение.

А.Н. Фетяев, С.В. Фокин

ОБ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПОРУБОЧНЫХ ОСТАТКОВ

В работе представлено описание имитационной модели процесса измельчения отходов лесосечных работ машиной для измельчения порубочных остатков. Приводятся результаты изучения влияния конструктивно-технологических параметров устройства на эффективность его работы.

Ключевые слова: порубочные остатки,

ON THE BASIS OF DEDUCTIVE LOGICAL INFERENCE

A substantial statement of a problem of logical forecasting of situations development is given in the paper, a formal description of the problem of forecasting as a problem of deductive inference is resulted, and a method of logical forecasting on the basis of a deductive inference is offered. The method is illustrated by examples for propositional calculus and first-order predicate calculus.

Keywords: logical forecasting of situations development, deductive logical inference, propositional calculus, first-order predicate calculus

E.V. Uryvsky

ALGORITHM ANALYSIS OF THREE- DIMENSIONAL RECONSTRUCTION OF SCENES ENVIRONMENT

A new algorithm of automatic 3D modeling of the surrounding objects is offered. An estimate and justification of the algorithm is given. The practical significance of the research is to show the relationship of speed and quality of the image processing for reconstructing 3D scene and the character of its optimization to suit the individual features of the algorithm.

Keywords: computer vision, 3D-scene, reconstruction algorithm, segmentation.

A.N.Fetyaev, S.V.Fokin

SIMULATION MODEL OF THE PROCESS OF GRINDING FOREST RESIDUES

This paper describes a simulation model of the grinding process of logging waste papers for shredding machine logging residues. The results of studying the influence of structural and technological parameters on the device efficiency.

Keywords: felling residues, a machine for shredding forest residues, wood chips, waste from logging operations.

машина для измельчения порубочных остатков, щепа, отходы лесосечных работ.

В.А. Фрилинг

**ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКИ
ПОВЕРХНОСТИ ОТВЕРСТИЯ НА ГЛУБИНУ
УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ**

В работе рассмотрены причины вызывающие потерю работоспособности гладких цилиндрических подвижных сопряжений, испытывающих одностороннюю радиальную нагрузку. Проведены экспериментальные исследования, направленные на снижение интенсивности изнашивания сопряжений. Выявлены наиболее значимые факторы, влияющие на глубину упрочненного слоя.

Ключевые слова: износ, цилиндрические сопряжения, контактное взаимодействие, микротвердость, упрочнение, математическая модель, поверхность отклика.

Г.Ю. Шакирова

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
ПЛАЗМЕННОЙ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ
УСТАНОВКОЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
ФЕРРОМАГНИТНОГО ПОРОШКА
ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ**

Повышение эффективности процесса получения качественных и количественных ферромагнитных порошков, необходимых для изготовления электрических машин с широким диапазоном выходных характеристик, достигается лишь применением автоматизированных систем управления. Для достижения данной цели в данной работе, разработана система автоматизированного управления технологической плазменной электротермической установки, обеспечивающая оптимизацию и стабилизацию ее параметров

Ключевые слова: ферромагнитный порошок, плазменная электротермическая установка, дисперсность, реле завершения процесса.

V.A. Friling

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF
PROCESSING CONDITIONS OF ELECTION
ELECTROMECHANICAL SURFACE
OPENINGS IN DEPTH HARDENED LAYER**

The paper discusses the reasons causing the loss of efficiency of smooth cylindrical movable joints undergoing unilateral radial load. Experimental studies aimed at reducing the wear rate of conjugation. Identified the most significant factors affecting the depth of the hardened layer.

Keywords: wear, cylindrical interface, contact interaction, micro-hardness, hardening, a mathematical model, the response surface.

G.Yu. Shakirova

**TECHNOLOGICAL PLASMA ELECTRO –
THERMAL PLANT CONTROL FOR A
GIVEN DISPERSION PRODUCTION
FERROMAGNETIC POWDER**

The article deals with the production increase of qualitative and quantitative ferromagnetic powders necessary for electrical machines manufacture with different parameters using automatic production system. The automatic production system with technological electro – thermal plasma plant providing optimization and stabilization of its parameters is developed for this purpose is done here.

Keywords: ferromagnetic powder, plasma electrothermal installation, dispersion, relay of completion of process.

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 "Научно-технический вестник Поволжья" осуществляется обработка персональных данных, предоставленных авторами статей в рамках сообщения своих редакционных 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 обработке его персональных данных.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ВЕСТНИК
ПОВОЛЖЬЯ**

Сборник научных статей

№2 2012

Направления:

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ
ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

www.ntvp.ru

Свидетельство № ПИ № ФС77-41672 от 13 августа 2010г.

Подписано в печать 20.04.2012 Формат 60 x 84 1/8. Печать цифровая.

15,4 усл.печ.л. 17,7 уч.изд.л. Тираж 900 экз. Заказ 608.

© Научно-технический вестник Поволжья

тел.(843) 216-30-35

факс:(843) 238-32-08

Отпечатано с готового оригинал-макета

ООО «Научно-технический вестник Поволжья»